한국수소 및 신에너지학회 논문집(2010. 6), 제21권 제3호
Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society(2010. 6), Vol. 21, No. 3, pp. 167~183

연료전지 자동차 세계기술규정의 감전보호기준 연구

황보천*†, 이규명*, 유경준*
*서울대학교 전기·컴퓨터공학부

Research on Standards for Protection against Electric Shock in Global Technical Regulations of Fuel Cell Vehicle

CHEON HWANGBO*†, KYUMYONG LEE*, KYEONGJUN YOU*
**System Electronics Laboratory, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University, San 56-1, Shinrim-dong, Gwanak-gu, Seoul 151-742, Korea*

ABSTRACT

This paper analyzes the backgrounds of the standards for protection against electric shock in Global Technical Regulations (GTR) of Fuel Cell Vehicle (FCV). Targets on research were high voltage criteria, safety current, isolation and grounding resistance, time limitation, energy, adequate clearance, and test procedure. Based on human impedance and effect of current in IEC 60479-1, safety of human was examined. Then, isolation and grounding circuit model of FCV were analyzed theoretically. The results give several suggestions: touch voltage less than 25V, AC energy less than 0.0813J, separation considering middle finger length, grounding resistance less than 0.2Ω, maximum AC ground voltage of 1V (rms), and isolation resistance between earth and electrical chassis. In MATLAB/Simulink environment, error characteristics of isolation resistance measurement procedure using internal DC sources were analyzed under variations of internal resistance of voltmeter and isolation resistance.

KEY WORDS : Standards(기준), Protection(보호), Electric shock(감전), Global technical regulations(세계기술규정), Fuel cell vehicle(연료전지 자동차)

Definition

High voltage : classification of an electric component or circuit, if its maximum working voltage is > 60V and ≤ 1500V d.c. or > 30V and ≤ 1000V a.c.

Working voltage : the highest value of an electrical circuit voltage, specified by the manufacturer, which may occur between any conductive parts in open circuit conditions or under normal operating conditions.

Live parts : conductive part (s) intended to be electrically energized in normal use.

Protection degree : protection provided by a barrier/enclosure related to the contact with live parts

†Corresponding author : blue@snu.ac.kr
[접수일 : 2010.5.30 수정일 : 2010.6.23 게재확정일 : 2010.6.25]

by a test probe, such as a test finger (IPXXB) or a test wire (IPXXD).

Exposed conductive part : the conductive part which can be touched under the provisions of the protection degree IPXXB, and which becomes electrically energized under isolation failure conditions.

Electrical chassis : a set made of conductive parts electrically linked together, whose potential is taken as reference.

Active driving possible mode : vehicle mode when application of pressure to the accelerator pedal (or activation of an equivalent control) will cause the electric power train to move the vehicle.

Service disconnect: device for deactivation the electrical circuit when conducting checks and services of the RESS, fuel cell stack, etc.

Dry condition: skin condition for a human taking a rest under normal environment.

Water-wet condition: skin condition for a human exposed to public use water (resistivity ρ=3,500 Ω · cm, pH=7-9) for 1 minute.

Saltwater-wet condition: skin condition for a human exposed to 3% saltwater (resistivity ρ=30Ω·cm, pH=7-9) for 1 minute.

Nomenclature

C	: capacitance, F
I	: current, A
IPXXB	: the protection degree related to joint test finger bent up to 90° with its full length of 80 mm, stop face of ∅50 mm·20 mm, and test force of 10N±10%
IPXXD	: the protection degree related to test wire with its full length of 100 mm, stop face of sphere ∅35 mm, and test force of 1N±10%
R	: resistance, Ω
V	: voltage, V
Z	: impedance, Ω
ε	: error
ρ	: resistivity, Ω·cm

Subscripts

C	: electrical chassis
E	: exposed conductive parts
f	: fault current
G	: grounding
H	: human
i	: isolation
$meas$	: measured value
N	: negative side of high voltage bus
o	: standard known resistance
P	: positive side of high voltage bus
S	: power source
$stray$	: stray capacitance
$Tire$	: tire
$true$	: true value
Vm	: voltmeter
ε	: error

Abbreviation

AC	: alternating current
ANSI	: american national standards institute
DC	: direct current
ELSA	: electric safety
FCV	: fuel cell vehicle
FMVSS	: federal motor vehicle safety standards
IEC	: international electrotechnical commission
IEEE	: institute of electrical and electronics engineers
GRSP	: working party on passive safety
GTR	: global technical regulations
RESS	: rechargeable energy storage system
UNECE	: united nations economic commission for europe
VF	: ventricular fibrillation
WP.29	: working party 29, world forum for harmonization of vehicle regulations

1. 서 론

2010년대에 국내 상용화될 예정인 연료전지 자동차(FCV)는 2040년 기준으로 약 16%의 에너지 소비 감소 효과를 나타낸다고 분석되는 친환경 전

Table 1 Contents and brief descriptions of ELSA-7-09
(*): target for study

Contents	Brief description
1. General	Electric vehicles after crash test(s)
2. Definitions	23 items
3. Requirements	
3-1 Electrolyte spillage from RESS	≦ 5.0 ℓ, after 30 min outside passenger compartment
3-2 Traction battery retention	Not inside passenger compartment
3-3 Electrical safety	
3-3-1 Isolation resistance	AC: 500Ω/V(*) DC: 100Ω/V(*)
3-3-2 Voltage	AC: < 30V(*) DC: < 60V(*)
3-3-3 Energy	DC: < 0.2J(*)
3-3-4 Physical protection	Grounding: 0.1Ω(*) Test current: 0.2A
4. Test conditions	
4-1 Vehicle conditions	Energized
4-2 RESS state of charge	Maximum, 95%, or nominal
4-3 Energy conversion system	(Not established)
5. Test procedures	
5-1 Test setup and equipment	10MΩ of voltmeter(*)
5-2 Bus voltage	After 5 seconds
5-3 Resistance isolation	Tolerance of Ro : ±20%(*)
5-4 Electrical energy	Integration of Vb·Ie
5-5 Physical barrier	Using access probe
Attached sheet 1 - Protection degrees	IPXXB(*), IPXXD

Table 2 Contents and brief descriptions of ELSA-7-10
(*): target for study

Contents	Brief description
1. General	Electric vehicles in use
2. Definitions	26 items
3. Requirements for protection against electrical Shock	
3-1 Protection against direct contact	
3-1-1	Passenger and luggage compartments: IPXXD
3-1-2	The other compartments: IPXXB(*)
3-1-3 Connectors	Less than high voltage within 1 second after separation(*)
3-1-4 Service disconnect	Easily accessible under IPXXB(*)
3-1-5 Marking	High voltage equipments The outer covering of cables and harness
3-2 Protection against indirect contact	Grounding: 0.1Ω(*) Test current: 0.2A Earth grounding in charging
3-3 Isolation resistance	AC: 500Ω/V(*) DC: 100Ω/V(*) 1MΩ for coupling system
4. Requirements for RESS	Ventilation, no overheat
5. Requirements for functional safety	Indication of active driving possible mode
Attached sheet 1 - Isolation resistance measurement method	Using the vehicle's own RESS as DC voltage source - 10MΩ of voltmeter(*) - Ro: ±20%(*) Using DC voltage from off-vehicle sources
Attached sheet 2 - Confirmation method for functions of on-board isolation resistance monitoring system	Test of warning activation by inserting a resistor
Attached sheet 3 - Protection against direct contacts of parts under voltage	Using access probe IPXXB(*), IPXXD

기 동력 자동차이다[1]. 하지만 이 차량에는 고전압(high voltage) 시스템으로 인해 충돌과 감전의 위험성이 있고 수소폭발 등의 화재 위험요소가 있다. 그리고 최근 하이브리드 차량의 안전성 관리 부실에 따른 사고로 인해 업체 및 국가 차원의 피해가 있었으며, 책임 소재가 불명확하여 소비자와 제작업체간 갈등이 있었다[2].

이와 같은 사례를 볼 때, 연료전지 차량에 대한 국내 시행세칙 마련이 필요하다. 현재 국내 연구기관은 제도 정책, 수소안전성, 운행안전성, 전기안전성 등 크게 4개 분야로 연료전지차 안전성평가 연구를 나누어 시행하고 있다. 본 논문은 전기안전성

분야와 관련이 있다.

근래에 UNECE WP.29는 차량의 세계 공통 규제(GTR)를 만들기 위한 논의를 진행하였다. 그리고 WP.29의 산하 부서인 GRSP가 전기 동력차량(순수 전기차, 하이브리드, 연료전지차)의 전기 안전성 규제안을 특별히 논의하기 위해 비공식 단체인 ELSA를 구성하였고 각국 차량 전문가들이 모인 상태에서 회의가 진행되었다[3].

ELSA 6, 7차 회의 결과 초안(draft)이 ELSA 7-09, ELSA-7-10 문서로 기록되었고 그 내용의 요약은 Table 1 및 Table 2와 같다[4,5]. ELSA 7-09는 차량 충돌 후 전기안전성 규제안이며, 전해질 누출, 견인 배터리 유지, 격리 저항, 전압, 에너지, 물리적 보호에 대한 요구사항을 설명하고, 차량 조건, RESS의 충전 상태 등의 시험 조건과 함께 버스 전압, 격리 저항, 전기 에너지, 물리적 배리어(barrier) 보호 수준(protection level)에 관한 측정 방법을 명시하고 있다.

ELSA-7-10은 차량 사용 중 전기안전성 규제안이며 객실 및 짐칸, 커넥터(connector), service disconnect의 보호 수준, 표식(marking) 등의 직접 접촉에 관한 연구와 함께, 접지 저항 등의 간접 접촉에 관한 연구, 그리고 격리 저항 보호 기준 및 측정 방법, RESS 화재 방지, 기능적 안전, 차량 탑재 격리 감시 시스템 검사법을 제시하고 있다.

ELSA 규제안이 확정되어 세계 공통 규제(GTR)에 포함되면 대한민국을 비롯한 협정 가입국이 이를 따라야 한다. 그러므로 국가적으로 ELSA의 평가 기준 및 평가 방법에 대해 합리성을 판단하고 대응을 하는 것이 필요하다. 기존에 제시된 연료전지 자동차 전기안전성 규제 작성 방법론[6]을 통해 규제안의 체계적 완성도를 개선할 수 있으나, 기준안을 정량적으로 분석하기 위해서는 인체의 특성과 감전 회로 모델을 해석할 수 있다.

본 논문에서는 ELSA의 사용 중/충돌 후 규제 안의 감전보호기준을 이러한 관점에서 분석해 보았다. 특히 Table 1 및 Table 2에 (*)로 표시된 고전압 기준, 허용 전류, 격리 및 접지 저항, 허용 시간, 에너지, 이격 거리, 격리 측정 시험 과정을 분석하였다. 분석 과정은 인체 분석과 회로 모델의 이론적인 분석, 그리고 컴퓨터 시뮬레이션으로 구성되었다.

인체 분석을 위해 KS C IEC 60479-1 : 2007 기준에 나와 있는 인체 총 임피던스의 경향을 분석하였다[7]. 그리고 IEC의 생리학적 곡선을 통해 불수 전류(let-go current), 심실세동(ventricular fibrillation) 전류 등의 인체 통전 특성을 분석해 보았다[8~11]. 또한 인체 손의 치수 조사 결과를 시험 손가락(test finger) 표준 길이와 비교 하였다[12].

회로 모델의 경우 차량에 인체가 접촉한 상황을 가정한 회로와 차량에 대한 계측기 연결 회로를 해석하였다. 인체 접촉 회로에서는 고전압 전원, 노출 도전부(exposed conductive part), 전기 섀시(electrical chassis), 대지(earth) 등의 노드, 그리고 그들 사이의 저항을 설정하였다. 그리고 인체가 각 노드에 접촉한다는 가정 하에 인체 전류와 누설(leakage) 전류를 수식으로 풀고 값을 구하여 감전 위험성을 평가하고 격리 및 접지 저항 기준을 검증하였다[13,14]. 계측기 회로에서는 RESS와 전압계(voltmeter)를 이용한 격리 저항 측정 절차의 오차를 전압계 내부 저항과 표준 기지 저항(standard known resistance)의 오차를 통해 수식으로 분석하였다[15~17].

시뮬레이션에서는 MATLAB/Simulink를 이용 하여 등전위 본딩(equipotential bonding)이 이루어진 격리 회로를 구성하고 RESS와 전압계를 이용한 격리 저항 측정 과정을 재연하여 격리 저항 측정의 상대 오차를 분석해 보았다.

2. 이론적인 분석

2.1 인체 분석

2.1.1 인체 임피던스

인체 임피던스는 피부 임피던스, 내부 임피던스로 구성되어 있으며 전압과 습기가 커지면 피부 임피던스가 작아져서 내부 임피던스로 가까이 간다. KS C IEC 60479-1 : 2007에서는 5%, 50%, 95%의 인구 분포에 대해 접촉전압(touch voltage), 접촉조건(수분/염분), 접촉 면적, 접촉 경로, 접촉 시간, 주파수(DC, 50/60Hz 등)에 대해 변화하는 인체 임피

Table 3 Human impedance of 5% population with respect to contact condition, contact area, and touch voltage in KS C IEC 60479-1: 2007

Contact condition	Contact area [mm^2]	25V [Ω]	50V [Ω]	75V [Ω]	100V [Ω]	200V [Ω]	400V [Ω]	700V [Ω]
Dry	10,000	1,750	1,375	1,125	990	900	850	825
Water-wet	10,000	1,175	1,100	1,025	975	900	850	825
Saltwater-wet	10,000	960	940	920	880	850	830	810
Dry	1,000	11,125	7,150	4,625	3,000	2,350	1,800	1,550
Water-wet	1,000	5,050	4,100	3,400	2,800	2,350	1,800	1,550
Saltwater-wet	1,000	1,795	1,765	1,740	1,715	1,685	1,660	1,525
Dry	100	91,250	74,800	42,500	23,000	12,875	7,200	4,000
Water-wet	100	39,700	29,800	22,600	17,250	12,875	7,200	4,000
Saltwater-wet	100	5,400	5,105	4,845	4,590	4,330	4,000	3,700

던스 크기가 제공된다. 접촉 전압은 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 400, 500, 700, 1000V이고, 접촉 면적에 대한 변화는 10,000, 1,000, 100mm^2에 대해 나타나고 있다. 통전 시간에 대해서는 0.1초를 기준으로 하고 있고 손-손 접촉 자료를 나타낸다.

Table 3은 KS C IEC 60479-1 : 2007의 자료 중에 접촉 조건, 접촉 면적, 전압에 대한 인체 임피던스에 대해 5% 인구 분포의 임피던스 경향을 정리한 것이다. 접촉 면적이 클수록 인체 임피던스는 감소하며, 접촉표면에 수분/염수가 있으면 임피던스가 감소하는 경향을 보이고 있다. 접촉 전압이 커지면 피부 임피던스가 감소하여 700V 이상에서는 내부 임피던스로 접근하게 된다. 또한, 5% 인구 비율의 임피던스 크기가 50%와 95%의 인구 비율의 그것보다 작다.

2.1.2 인체 통전반응

KS C IEC 60479-1 : 2007에서는 DC와 AC(15-100Hz)에 대한 손-발 접촉의 인체 통전 반응이 그래프로 나타나 있다. 그리고 DC, AC에 대해 인체의 생리학적 반응이 각각 4개 영역으로 나누어진다. DC의 경우 DC-1은 감지 전류, DC-2는 일반적인 해로움이 없는 영역, DC-3은 비자의적인 근육 반응과 심장 기능 장애가 일어날 수 있는 영역, DC-4는 심장마비 및 심실세동 가능성이 일어날 수 있는 영역이다. 심실세동이 일어나면 인체의 맥박이 제대로 뛰지 않아 인체의 생명을 위협할 수 있다. DC-4 영역에서는 5%, 50%, 95%의 확률 곡선 사이에 DC-4.1, 4.2, 4.3 영역이 표시되어 있다.

Table 4는 이 자료를 근거로 하여 10, 100, 2000, 10000ms의 통전시간에 대해 각 생리학적 영향에 대한 영역에 해당하는 통전 전류 범위를 표시한 것이다. 주의할 점은 40mA이상의 통전 전류가 흐를 경우 5% 이상의 인구에 대해서 차단기를 통해 통전 전류를 끊지 않는 한 계속 인체에 위험전류가 흘러 영역 3의 반응이 일어나 인체의 심실세동이 일어날 수 있다는 것이다.

ELSA 규제안에서 제시하는 감전방지기준과 관련된 부분을 해석하면, AC 고전압 최소 기준인 30V

Table 4 Human current limits of KS C IEC 60479-1: 2007(*)

	10ms	100ms	2000ms	10000ms
DC-1	0-2mA	0-2mA	0-2mA	0-2mA
DC-2	2-200mA	(*)	2-25mA	2-25mA
DC-3	200-500mA	(*)	25-140mA	25-140mA
DC-4	≦500mA	(*)	≦140mA	≦140mA
AC-1	0-0.5mA	0-0.5mA	0-0.5mA	0-0.5mA
AC-2	0.5-200mA	0.5-50mA	0.5-10mA	0.5-5mA
AC-3	200-500mA	50-400mA	(*)	5-40mA
AC-4	≦500mA	≦400mA	(*)	≦40mA

Table 5 Safety of human current path at 25V touch voltage based on KS C IEC 60479-1: 2007

Current path	Skin impedance factor(%)	Skin impedance [Ω]	Body impedance factor(%)	Body impedance [Ω]	Total impedance	Human current [mA]	Heart current factor	5% VF limit [mA]	Decision
Left hand to foot	100	385	100.00	608	993	25.16	1.0	40.00	
Left hand to feet	75	289	74.25	452	741	33.76	1.0	40.00	
Both hands to feet	50	193	50.65	308	501	49.93	1.0	40.00	Dangerous
Left hand to right hand	100	385	94.50	575	960	26.04	0.4	100.0	
Right hand to foot	100	385	100.00	608	993	25.16	0.8	50.00	
Right hand to feet	75	289	74.25	452	741	33.76	0.8	50.00	
Back to right hand	100	385	52.40	319	704	35.52	0.3	133.3	
Back to left hand	100	385	52.40	319	704	35.52	0.7	57.14	
Chest to right hand	100	385	52.40	319	704	35.52	1.3	36.77	
Chest to left hand	100	385	52.40	319	704	35.52	1.5	26.67	Dangerous
Seat to hand	100	385	56.50	344	729	34.30	0.7	57.14	
Seat to both hands	75	289	32.90	200	489	51.13	0.7	57.14	
Left foot to right foot	100	385	104.30	635	1020	24.52	0.04	1000	

는 인체를 1000Ω으로 보았을 때 5% 분포의 심실세동 기준 40mA 아래인 30mA에 해당한다. DC 격리 저항 100Ω/V는 DC-3 10초 한계치에 해당하는 25mA보다 2.5배 낮은 10mA의 역수이다. AC 격리 저항 500Ω/V는 AC-3 10초 한계치에 해당하는 5mA 보다 2.5배 낮은 2mA의 역수이다. 0.2J의 DC 에너지와 관련된 부분은 인체 1000Ω 및 안전계수 2를 기준으로 10ms에서 200mA의 DC-3 한계치이다[11]. 커넥터 분리 후 1초 이내 고전압 이하 기준에 대해서 같은 통전 시간을 가진 영역은 인체 1000Ω 및 안전계수 2를 기준으로 AC-4 한계치의 1초, 50mA에 대해서 25V의 접촉 전압 이하 영역이다.

우선 고전압의 AC 기준에 대해 인체의 안전성을 분석하였다. 이를 위해 25V의 접촉 전압, 5% 인구 분포, 염수에 젖은 상태, 넓은 접촉면적, 손-손 전류 경로, 0.1초 통전 시간, 50/60Hz 주파수를 고려한 960Ω 임피던스를 선정하였다.

Table 5와 같이 각 통전 경로 별 인체의 임피던스와 전류를 KS C IEC 60479-1 : 2007을 기준으로 구해보았다. 이 자료에서는 Table 5 항목에 있는 통전 경로들에 대해 심장전류계수(heart current factor)를 명시하고 있으며, 손-발을 심장전류계수의 기준값으로 둔다. 손-발을 기준으로 한 심실세동 전류 기준은 심장전류계수에 반비례하여 바뀐다.

내부 임피던스는 5% 분포의 총 임피던스의 점근선인 575Ω으로 설정하였다. 통전 경로 별 내부 임피던스 비율은 IEC 기준에서 제공하는 인체의 부분별 내부임피던스 비율에 575Ω을 곱하여 도출되었고 병렬연결을 고려하였다.

피부 임피던스는 3군데 이상 접촉시 양손 또는 양발 접촉의 피부에 대해 병렬회로로 등가화 하였다. 기준 피부 임피던스 385Ω는 960Ω의 총 임피던스에 대해 내부 임피던스 575Ω을 감산한 것이다.

통전 경로 별 내부 및 피부 임피던스를 합하여 총 임피던스를 도출하였고 25V 접촉 전압에 대해 나누기 연산을 하여 통전 전류를 계산하고 심실세동 전류 기준과 비교하였다. 그 결과 인체의 최소 저항은 대략 500Ω으로 나타났으며 양손-양발, 가슴-왼손에 대한 통전 전류가 40mA를 초과하는 것으로 나타났다. 그러므로 전압 30V는 인체 500Ω 기준으로 최소의 안전한 전압이 아니며, 0.1초 통전 전류를 기준으로 안전한 전압은 25V 미만의 범위 내에 존재하는 것으로 나타났다.

한편, ELSA는 DC의 최소 위험 에너지를 규정하

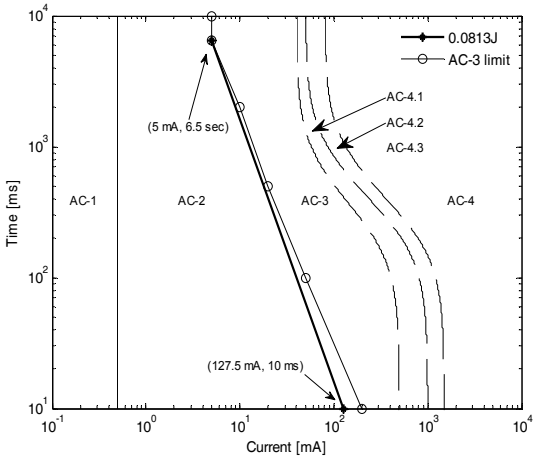

Fig. 1 AC energy limit curve of 0.0813J in conventional time/ current zones of effect of AC-current on persons (Fig. 20 of KS C IEC 60479-1: 2007).

고 있으나, AC의 최소 위험 에너지를 규정하지는 않고 있다. FCV에서는 AC회로가 존재하므로 이에 대한 연구를 할 수 있다. 우선 AC 최소 위험 에너지를 분석하기 위해 Fig. 1에 나타난 IEC의 AC 생리학적 곡선을 분석해 보았다. 인체 500Ω, 약 6.5초 9)의 5mA 통전전류에 대해 에너지를 구한 결과 약 0.0813J로 나타났다. 이 에너지에 해당하는 다른 지점은 10ms에 대해 127.5mA로서, 두 지점 사이를 직선으로 그어 보았을 때 그 직선의 점들은 AC-2 영역에 속한 것으로 나타났다.

2.1.3 인체치수 분석

ELSA 규제안은 인체가 외함의 통풍구 등을 통해 전장품 내부 고전압에 접촉되지 않기 위해 손가락과 와이어에 대한 보호 수준을 정의하고 있다. 보호 수준은 손가락에 대해서는 IPXXB, 와이어에 대해서는 IPXXD라는 기호로 표시되며, 이것에 대해서 손가락 및 와이어 모형의 치수가 정의된다. 손가락 모형은 joint test finger라고 불리고, 손가락 길이는 80mm이며, 멈춤면(stop face)을 통해 손가락 부분만 들어갈 수 있도록 설계되어 있다.

본 논문에서는 IPXXB에 대한 시험 손가락 모형의 길이와 한국인의 손가락 길이를 비교 분석하였다[12]. Table 6은 손직선길이, 손바닥직선길이, 가운데 손가락 길이, 집게손가락 길이를 나타낸 것이다. 이것들은 20~60대 성인을 대상으로 각 연령대별 치수 백분위의 1%, 50%, 99%에 대해 평균을 취한 것이다. 가운데 손가락 길이는 손직선길이에 대해 손바닥직선길이를 뺀 것이다. 분석 결과 백분위 99%의 평균에 대해 집게손가락 길이는 IPXXB의 손가락 모형 길이인 80mm 미만인 것으로 나타났지만, 가운데 손가락 길이는 80mm를 넘는 것으로 나타났다. 그러므로 고전압과 노출 도전부 사이 이격거리는 IPXXB 기준뿐만 아니라 실제 인체 손가락 치수를 고려하여 설계될 수 있다.

Table 6 Mean hand sizes of South Korean adults

Length [mm]	The number of measurements	Mean percentile		
		1%	50%	99%
Hand length	2579	165.9	185.4	204.0
Palm length perpendicular	2581	93.29	106.7	120.1
Middle finger length	2579	72.57	78.71	83.86
Index finger length	2579	59.86	69.86	79.43

2.2 회로 해석

2.2.1 격리 접지 회로 모델 설정

Fig. 2는 ELSA 규제안에 있는 내부 전원을 이용한 격리 저항 측정 방법에 나와 있는 차량 전기 회로를 포함한 연료전지 차량의 격리 접지 모델을 나타낸 것이다. 고전압 버스와 전기 섀시 사이에는 격리 저항이 존재하며, 에너지 변환 시스템 조립품(assembly)과 RESS 조립품은 전기 섀시에 접지되어 있는 것을 알 수 있다. 고전압 버스는 릴레이 등의 스위치가 연결된 상태에서 DC 전압이 인가되어 전력 변환기(converter)의 인덕터(inductor) 등이 생략되었다.

이를 기초로 하여 격리 접지 회로를 새로 모델링하였다. ELSA 규제안의 격리 접지 회로는 접지가 등전위 섀시로 간주되고 있다. 하지만 인체가 여기

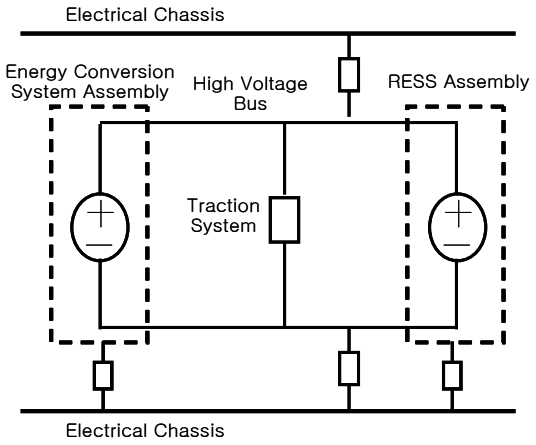

Fig. 2 Isolation and grounding model of electrical power train in FCV given by ELSA.

에 접촉하였음에도 회로가 형성되지 않아 감전이 되지 않으므로 등전위가 아닌 접지상태를 가정하고 격리 접지 회로를 Fig. 3과 같이 만들었다. 이 회로에 대해서는 노출 도전부 하나와 섀시 사이를 등전위로 가정하지 않고 각 회로에 흐르는 전류를 구하였다. 전류 식 (1)~(8)은 회로 이론의 mesh current 분석법을 통해 도출된 것이다.

$$A[I_1\ I_2\ I_3] = [V_1\ V_2\ V_3] \tag{1}$$

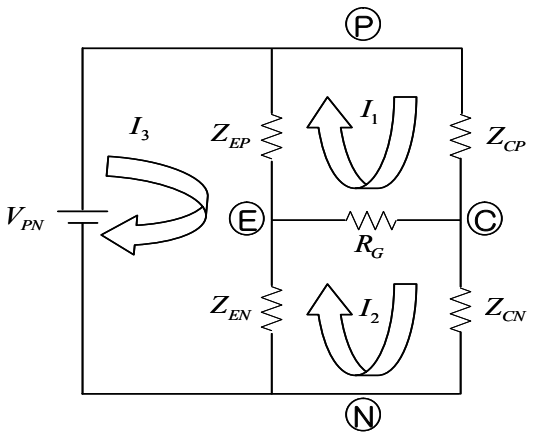

Fig. 3 Isolation and grounding model of high voltage bus, an exposed conductive part, and electrical chassis.

$$A = \begin{pmatrix} R_{CP}+R_{EP}+R_G & -R_G & -R_{EP} \\ -R_G & R_G+R_{CN}+R_{EN} & -R_{EN} \\ -R_{EP} & -R_{EN} & R_{EP}+R_{EN} \end{pmatrix} \tag{2}$$

$$I_{EP} = \frac{V_{PN}(R_{CP}R_G + R_{CP}R_{CN} + R_{CP}R_{EN} + R_GR_{CN})}{R_D} \tag{3}$$

$$I_{EN} = \frac{V_{PN}(R_{CP}R_G + R_{CP}R_{CN} + R_{CN}R_{EP} + R_GR_{CN})}{R_D} \tag{4}$$

$$I_{CP} = \frac{V_{PN}(R_GR_{EN} + R_GR_{EP} + R_{CN}R_{EP} + R_{EN}R_{EP})}{R_D} \tag{5}$$

$$I_{CN} = \frac{V_{PN}(R_{CP}R_{EN} + R_{EN}R_{EP} + R_GR_{EN} + R_GR_{EP})}{R_D} \tag{6}$$

$$I_{EC} = \frac{V_{PN}(R_{CP}R_{EN} - R_{CN}R_{EP})}{R_D} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} R_D = {} & R_{CP}R_GR_{EP} + R_{CP}R_GR_{EN} + R_{CP}R_{CN}R_{EP} \\ & + R_{CP}R_{CN}R_{EN} + R_{CP}R_{EN}R_{EP} + R_{EP}R_{CN}R_{EN} \\ & + R_GR_{CN}R_{EP} + R_GR_{CN}R_{EN} \end{aligned} \tag{8}$$

Fig. 3을 보면 (+) 단자에서 나온 전류의 일부는 노출 도전부를 거쳐 섀시를 지나간 다음 (-) 단자에 들어갈 수 있다. 노출 도전부와 섀시 사이에 흐르는 전류의 분자는 $R_{CP}R_{EN}$과 $R_{CN}R_{EP}$의 차이라는 것을 알 수 있다. 그러므로 노출 도전부와 섀시 사이 전류가 크려면 이 항들의 차이가 커야 한다. 그리고 노출 도전부와 섀시 사이 전압이 크려면 R_{CP}과 R_{CN}의 저항차이가 커서 이들 전압 분배의 불균형 정도가 높아야 하는 것으로 나타났다.

2.2.2 인체 접촉 회로

제시된 모델을 바탕으로 노출 도전부와 섀시 사이에 인체가 접촉한 상태에서 연료전지 차량의 격리와 접지의 의미를 분석하였다.

Fig. 4에서는 ELSA에서 제시한 500Ω/V의 의미를 격리 및 접지의 관점에서 분석한 것이다. Fig. 4(a)에서 가정한 상황을 설명하자면, AC 고전압 전원에 대해 전압 단자 하나가 노출 도전부에 격리 있고 다른 단자가 섀시에 격리되어 있는 회로가 구성되며 노출 도전부는 섀시에 등전위로 접지되어 섀

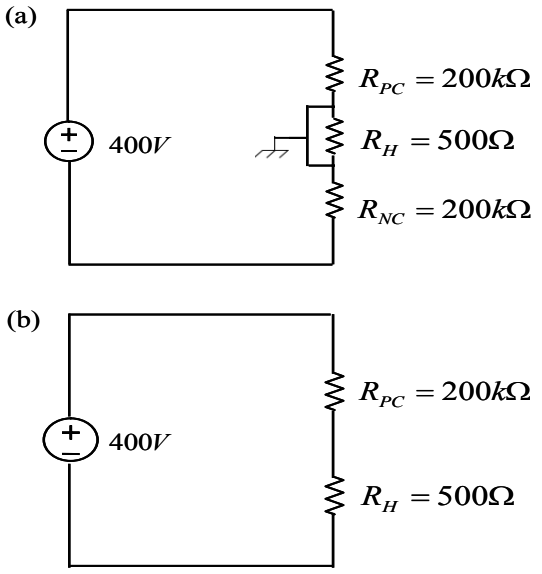

Fig. 4 Circuit model of isolation and grounding resistance; (a) two isolation resistance and equipotential grounding, (b) the circuit with insulation broken down and without grounding.

시가 된다.

ELSA 규정에 의하면 고전압 버스와 새시 사이 격리 저항은 AC 기준으로 500Ω/V에 대해 고전압 버스 최대 동작 전압(working voltage)을 곱하도록 되어 있다. 400V AC 전원을 기준으로 각 격리 저항은 200kΩ로 계산된다.

Fig. 4(b)는 고전압 (-)단자에 연결되어 있던 격리 저항이 파괴되고, 접지가 제거된 상태를 나타내고 있다. 이 상태에서 500Ω 인체에 흐르는 전류를 계산한 결과는 식 (9)와 같다.

$$\frac{400\,V}{200k\Omega + 500\Omega} = 1.995mA \tag{9}$$

이 전류는 ELSA의 AC 격리 기준인 2mA보다 작은 값이다. 그러므로 ELSA에서 제시하는 격리 시스템은 격리 하나가 파괴되더라도 다른 격리 저항이 인체를 보호하도록 이중 보호를 하고 있음을 알 수 있다.

한편, Fig. 4(b) 회로에서는 인체가 고전압(+) 단자에 접촉하고 있다는 것을 알 수 있다. 비록 200kΩ

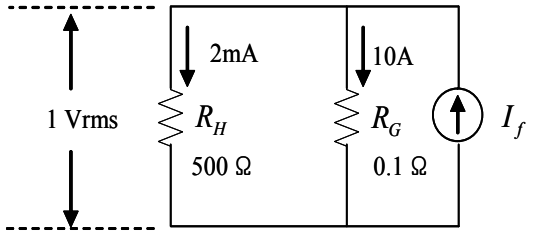

Fig. 5 AC fault current bypass model in FCV.

이상의 격리 저항에 의해 인체가 보호받고 있지만, 이 격리 저항마저 파괴된다면 인체가 위험할 수 있다. 그러므로 고전압 단자 하나에 대해서도 인체가 접촉하지 않도록 설계하는 것이 안전하다.

접지의 의미를 분석하기 위해 ANSI/IEEE Standard 80에 설명된 접촉 전압 회로를 바탕으로 Fig. 5와 같이 접지 회로를 모델링하였다[13]. 회로는 500Ω 인체와 ELSA 기준의 0.1Ω 접지 저항, 그리고 고장 전류원 I_f으로 구성되었다. ELSA의 허용 누설 전류 2mA가 인체에 흐를 조건을 분석하였다. 그 결과, 인체에 2mA의 전류가 흐르는 고장 전류 조건은 식 (10)과 같다.

$$I_f = \frac{I_H(R_H + R_G)}{R_G} = \frac{2mA(0.1\Omega + 500\Omega)}{0.1\Omega} = 10.002A \tag{10}$$

즉, 0.1Ω의 접지의 기능은 고장 전류 10.002A가 인체와 접지의 병렬 회로에 들어왔을 때, 접지에 10A의 위험 전류가 흘러서 인체에 2mA의 전류가 흐르도록 하는 것이다. 그리고 2mA가 흐르는 500Ω 인체의 접촉 전압은 1V(rms)이다.

접지 저항의 변화에 대해 고장 전류의 변화 양상을 Table 7과 같이 나타내었다. ELSA의 AC 기준이 2mA인 것과 IEC 인체 생리학적 곡선의 AC-3 영역의 최소한계치가 약 6.5초 이상에서 5mA임을 고려하였다. 접지 저항이 0.05Ω에서 1000Ω으로 커질수록, 인체와 접지의 병렬 회로의 저항 R_{GH}가 커져서 동일 전압의 전원에 대한 고장 전류는 작아질 수 있으나, 인체에 안전한 전류가 흐르기 위한 최대

Table 7 Safety of grounding resistance in FCV

R_G [Ω]	R_{GH} [Ω]	$I_f(I_H$=2mA) [A]	$I_f(I_H$=5mA) [A]	R_t(5mA) [Ω/V]
0.05	0.049995	20.002	50.0050	0.0200
0.10	0.099980	10.002	25.0050	0.0400
0.15	0.149955	6.6687	16.6717	0.0600
0.20	0.199920	5.0020	12.5050	0.0800
0.25	0.249875	4.0020	10.0050	0.1000
0.5	0.499500	2.0020	5.0050	0.1998
1	0.998004	1.0020	2.5050	0.3992
10	9.803922	0.1020	0.2550	3.9216
100	83.33333	0.0120	0.0300	33.333
1000	333.3333	0.0030	0.0075	133.33

고장 전류는 작아지는 것으로 나타났다. 10.005A의 고장 전류를 기준으로 최대 안전 접지 저항은 0.25 Ω으로 나타났다.

이 의미를 분석하기 위해 인체 허용 전압과 격리 저항의 의미를 연계하였다. 2mA와 5mA의 기준치를 만족하는 R_H에 대한 전압은 1V, 2.5V이며, 이를 R_{GH}에 대해 나누어 Ω/V를 구한 결과를 Table 7에 표시하였다. 0.1Ω과 0.25Ω의 접지 저항의 최소 안전 격리 저항은 약 0.04Ω/V, 0.1Ω/V로 200Ω/V(5mA)에 비해 매우 작은 것으로 나타났다. 그러므로 격리 저항의 설계 기준을 높일 경우 0.2Ω의 접지 저항도 설계 가능한 것으로 분석된다.

또한 접지 저항이 커지면 인체에 위험한 전류를 방지하기 위해 격리 저항이 커져야 한다. 1000Ω의 접지 저항인 경우는 2mA, 5mA 전류에 대해 각각 333.33Ω/V, 133.33Ω/V의 격리 저항을 만족해야 하는 것으로 나타났다. 이는 AC의 격리 저항 기준치인 500Ω/V에 근접하는 것이다. 그러므로 접지 저항만으로는 인체를 보호할 수 없으며 격리 저항도 보장이 되어야 한다는 것을 알 수 있다.

다음으로, 노출 도전부-노출 도전부의 인체 접촉에 대비한 접지 저항을 도출하였다. Fig. 6(a)은 차량에서 각 노출 도전부가 섀시에 접지되어 있는 것을 나타내며, 인체가 노출 도전부의 1번과 2번 노드에 접촉한 것을 묘사하고 있다. 이를 간단히 하기

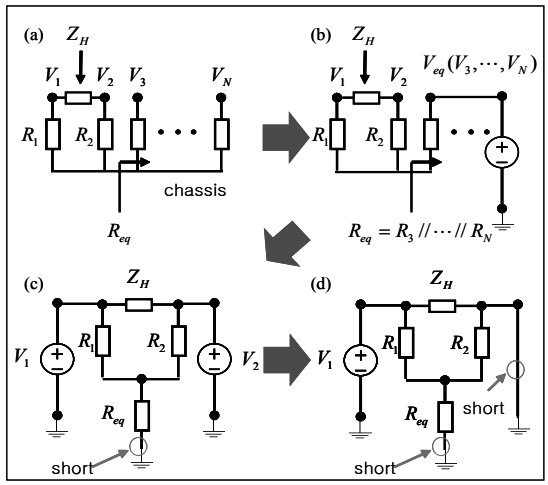

Fig. 6 Circuit model of multi-point grounding; (a) human touch between exposed conductive parts, (b) Thevenin equivalent circuit of grounding, (c), (d) simplified model using short circuit of power source.

위해 Fig. 6(b)와 같이 인체가 접촉하지 않은 노드들에 대해 테브난(thevenin) 등가회로를 만들었다. 그리고 Fig. 6(c)~(d)와 같이 1번 노드의 전원을 제외한 나머지 전원을 단락시켜서 1번 전원에서 바라본 등가 임피던스를 식 (11)과 같이 구하였다.

$$R_{GH} = Z_H \| (R_1 + R_2 \| R_{eq}) \tag{11}$$

접지 저항 R_1과 R_2가 각각 0.1Ω일 때 등가 저항 R_{eq}가 0Ω이면 R_{GH}는 500Ω과 0.1Ω의 병렬 저항이 되어 ELSA의 0.1Ω 접지 기준을 만족한다. 하지만 R_{eq}가 개방되는 상황에서는 R_{GH}는 500Ω과 0.2Ω의 병렬 저항이 된다는 것을 알 수 있었다. 즉, 노출 도전부-섀시의 접지 저항이 0.1Ω이 되면 노출 도전부 사이의 등가 저항이 최대 0.2Ω이 되며, 이는 ELSA의 기준치를 넘어서는 것이다.

그렇지만 앞에서의 격리 저항 분석 결과를 비추어볼 때 0.2Ω의 기준치도 고려할 수 있기 때문에 노출 도전부-노출 도전부 사이의 0.1Ω의 기준을 0.2Ω으로 완화하는 것을 제시할 수 있다. 단, 노출 도전부-섀시 사이의 접지 저항은 노출 도전부-노출 도전부 접지 저항의 기준 만족을 전제로 하여 설계할

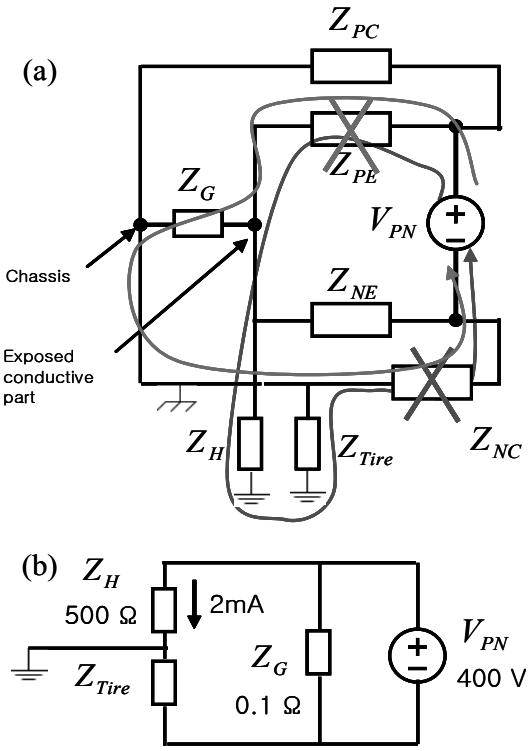

Fig. 7 Electrical shock model of insulation breakdown between high voltage bus, exposed conductive part, and electrical chassis; (a) current path, (b) equivalent circuit.

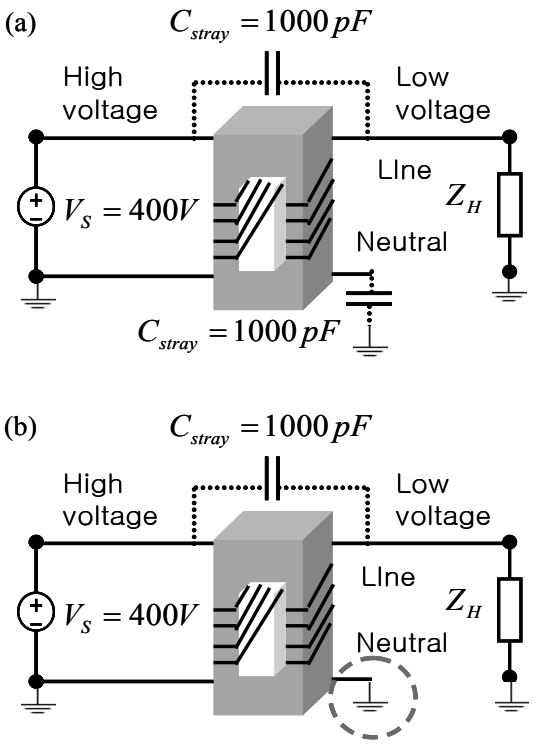

Fig. 8 Human with isolated converter; (a) stray capacitance at neutral line, (b) grounded neutral line.

수 있다.

한편, ELSA 규제안에는 섀시-대지에 대한 격리 저항, 저전압 도선-섀시에 대한 접지 규정이 없어서 이에 대한 회로 해석을 하였다[14]. Fig. 7은 인체가 대지와 노출 도전부를 접촉하고 있고 타이어가 섀시와 대지에 연결되어 있는 격리 접지 회로를 나타내고 있다. Fig. 7(a)와 같이 고전압 버스와 노출 도전부, 섀시 사이 격리 저항이 파괴되면 Fig. 7(b)의 등가회로로 나타낼 수 있다.

이 등가회로에서는 인체와 타이어 저항이 직렬로 연결되어 있으며 접지 저항이 병렬로 연결되어 있지만 고전압 전원이 직접적으로 회로에 인가되므로 접지 저항을 제외시켜도 동일한 회로가 된다. 이 상태에서 인체에 2mA 미만의 AC 전류가 흐를 수 있는 조건으로는, 타이어가 500Ω/V 이상의 격리 저항을 만족하는 것이다. 그러므로 이를 참고하여 관련 규정을 검토할 수 있다.

한편, 차량에 대해 절연형 컨버터를 사용시 감전 가능성에 대해 Fig. 8과 같이 분석하였다. Fig. 8(a)에서는 고전압 400V가 변압기를 통해 저전압으로 변환되는데, 변압기의 코일 사이, 저전압 중성선과 접지 사이에 부유 용량(stray capacitance) 1000pF가 존재한다. 이 때 저전압 선에 인체가 접촉하고 있다고 가정하고 전압 분배 법칙을 이용하여 인체 전압을 식 (12)와 같이 나타내었다.

$$V_H = V_S \frac{\dfrac{Z_H}{1+j\omega C_{stray} Z_H}}{\dfrac{1}{j\omega C_{stray}} + \dfrac{Z_H}{1+j\omega C_{stray} Z_H}} \tag{12}$$

50kHz에서 V_H를 계산해보면, 약 60V(AC)가 인가되는 것을 확인할 수 있었다. 이 전압에 대한 전류를 계산해보면 500Ω 인체를 기준으로 120mA로,

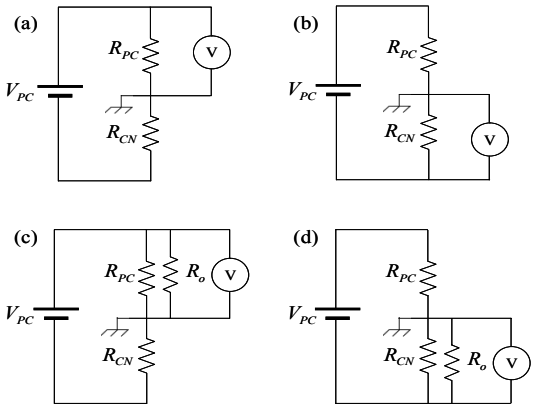

Fig. 9 Measurement method using FCV's own RESS as DC volage source: (a), (b) measurement of voltage across isolation resistance; (c), (d) measurement of voltage across isolation resistance which is parallel with standard known resistance.

AC-2를 넘는 전류가 흐르는 것을 알 수 있다[8].

이에 대한 대안으로 Fig. 8(b)와 같이 저전압 중성선에 대해 접지를 하여 중성선의 부유 용량을 차단할 수 있으며, 코일 사이의 부유 용량에 대해서만 고전압이 인가되어 사람에게 위험한 전류가 흐르지 않게 할 수 있다.

2.2.3 계측기 연결 회로

ELSA 규제안에는 충분한 시험전류를 인가하기 위해 차량 외부 DC 전원을 이용한 방법과, 전압계와 차량 내부 RESS를 DC 전원으로 이용하여 격리 저항을 계산하는 방법을 명시하고 있다. 본 논문에서는 후자의 방법을 분석하였으며, 관련 계산식을 유도하고 격리 저항, 내부저항, 표준 기지 저항이 변할 때의 측정 저항 값과 상대 오차를 구해보았다.

이 방법의 절차를 Fig. 9를 통해 설명하자면, 우선 고전압 버스 양단 전압 V_{PN}을 측정한 뒤, Fig. 9(a), Fig. 9(b)와 같이 V_{PC}와 V_{NC}를 측정한다. 그리고 V_{PC}가 V_{NC}을 비교하여 전압이 큰 격리 저항에 대해 Fig. 9(c) 또는 Fig. 9(d)와 같이 표준 기지 저항 R_o를 연결하여 전압을 측정한 후 격리 저항을 계산식을 통해 구한다. 표준 기지 저항 값은 최소 격리 저항 기준에 대해 고전압 버스 최대 동작 전압을 곱한 값이며 허용 오차 크기 범위는 20%이다.

ELSA 규제안에 계산식의 유도과정이 포함되지 않아 계산식을 유도하였다. 우선 식 (13)과 같이 회로에 대해 각 노드의 전류가 같다는 점을 이용하였다.

$$\frac{V_{PC}}{R_{PC}} = \frac{V_{CN}}{R_{CN}} \tag{13}$$

$V_{PC} \le V_{CN}$ 이면 식 (14)~(22)와 같은 과정을 통해 R_{PC}, R_{CN}과 R_i를 유도할 수 있다.

$$\frac{V_{PN} - V_{CN2}}{R_{PC}} = \frac{V_{CN2}}{R_{CN} \parallel R_o} = V_{CN2}\left(\frac{1}{R_{CN}} + \frac{1}{R_o}\right) \tag{14}$$

$$V_{CN}\frac{V_{PN} - V_{CN2}}{V_{PC}R_{CN}} - \frac{V_{CN2}}{R_{CN}} = \frac{V_{CN2}}{R_o} \tag{15}$$

$$\left(\frac{V_{PN} - V_{CN2}}{V_{PC}} V_{CN} - V_{CN2}\right)\frac{R_o}{V_{CN2}} = R_{CN} \tag{16}$$

$$\left(\frac{V_{PN} - V_{CN2}}{V_{PC}V_{CN2}} V_{CN} - 1\right)R_o = R_{CN} \tag{17}$$

$$\left(\frac{1}{V_{CN2}} + \frac{V_{CN}^2}{V_{PC}V_{CN2}} - \frac{V_{CN}}{V_{CN}} - 1\right)R_o = R_{CN} \tag{18}$$

$$\left(1 + \frac{V_{CN}}{V_{PC}}\right)\left(\frac{V_{CN} - V_{CN2}}{V_{CN2}}\right)R_o = R_{CN} \tag{19}$$

$$\left(1 + \frac{V_{PC}}{V_{CN}}\right)\left(\frac{V_{CN} - V_{CN2}}{V_{CN2}}\right)R_o = R_{PC} \tag{20}$$

$$R_{PC} = R_o V_{PN}\left(\frac{1}{V_{CN2}} - \frac{1}{V_{CN}}\right) \tag{21}$$

$$R_i = R_{PC} \parallel R_{CN} = R_o\left(\frac{V_{CN} - V_{CN2}}{V_{CN2}}\right) \tag{22}$$

R_i는 R_{PC}과 R_{CN}의 계산식에 대해 병렬 저항을 구한 것이며, 한 쪽 격리 저항의 전압이 다른 쪽보다 매우 크다고 가정할 때의 식이다. 식 (20)은 미국 규제인 FMVSS No. 305에 있었으며, 식 (21)은 ELSA-7-09, ELSA-7-10에 있던 식이며, 식 (22)는

유럽의 UNECE Regulation No. 100과 일본의 Attachment 101에 수록되었던 식이다[15~17].

$V_{PC} \geq V_{CN}$ 이면 식 (23)~(25)와 같이 R_{PC}, R_{CN}과 R_i를 유도할 수 있다.

$$R_{PC} = R_o V_{PN}\left(\frac{1}{V_{PC2}} - \frac{1}{V_{PC}}\right) \tag{23}$$

$$R_{CN} = R_o V_{PN}\left(\frac{1}{V_{PC2}} - \frac{1}{V_{PC}}\right) \tag{24}$$

$$R_i = R_{PC} \parallel R_{CN} = R_o\left(\frac{V_{PC} - V_{PC2}}{V_{PC2}}\right) \tag{25}$$

표준 기지 저항을 삽입하기 전에 전압을 측정할 때 전압계 내부저항으로 인한 R_{PC}의 오차와 측정 전압 오차는 식 (26)~(27)과 같다.

$$\varepsilon_{R_{PC}} = R_{PC} - R_{PC} \parallel R_{Vm} = \frac{R_{PC}^2}{R_{PC} + R_{Vm}} \tag{26}$$

$$\varepsilon_{V_{PC}} = V_{PN}\frac{R_{PC}}{R_{PC} + R_{CN}} - V_{PN}\frac{R_{PC} - \varepsilon_{R_{PC}}}{R_{PC} - \varepsilon_{R_{PC}} + R_{CN}} \tag{27}$$
$$= V_{PN}\frac{R_{CN}\varepsilon_{R_{PC}}}{(R_{PC} + R_{CN})(R_{PC} + R_{CN} - \varepsilon_{R_{PC}})}$$

이 때 최대 오차 $\varepsilon_{V_{PC}}$는 전압계의 내부 저항이 격리 저항 R_{PC}에 비해 무시할 수 있다고 가정할 때 식 (28)과 같다.

$$\varepsilon_{V_{PC}(max)} = V_{PN}\frac{R_{PC}}{R_{PC} + R_{CN}} \tag{28}$$

즉, 이 식에서는 오차가 참값과 동일할 때 그 오차가 최대 오차가 된다. 그러므로 V_{PC}의 참값을 기준으로 한 최대 상대 오차는 100%이다.

최소 격리 저항 기준에 대해 고전압 버스 최대 동작 전압을 곱한 값에 대해 오차를 가진 표준 기지 저항을 삽입한 후에 내부저항을 가진 전압계로 전압을 측정할 때 발생하는 오차는 식 (29)~(30)과 같으며 관련 회로는 Fig. 10과 같다.

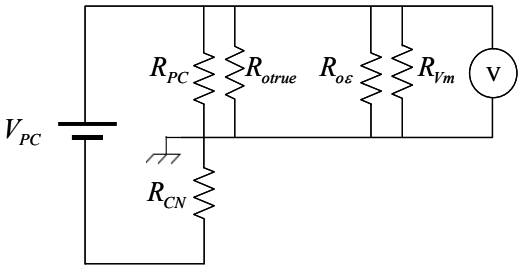

Fig. 10 Equivalent circuit having error of measurement method using FCV's own RESS as DC voltage source.

$$\varepsilon_{R_{PCo}} = \frac{(R_{PC} \parallel R_{otrue})^2}{R_{PC} \parallel R_{otrue} + R_{Vm} \parallel R_{o\varepsilon}} \tag{29}$$

$$\varepsilon_{V_{PCo}} = V_{PN}\frac{R_{CN}\varepsilon_{R_{PCo}}}{(R_{PCo} + R_{CN})(R_{PCo} + R_{CN} - \varepsilon_{R_{PCo}})} \tag{30}$$

저항에 대한 오차를 계산하기 위해 전압 분배 법칙에 의해 V_{PC2}와 V_{PC}를 식 (31)~(32)와 같이 표현할 수 있다.

$$V_{PC2} = V_{PN}\frac{R_{PC\,Vm} \parallel R_o}{R_{PC\,Vm} \parallel R_o + R_{CN}} \tag{31}$$

$$V_{PC} = V_{PN}\frac{R_{PC\,Vm}}{R_{PC\,Vm} + R_{CN}} \tag{32}$$

$R_{PC\,Vm}$은 R_{PC}와 R_{Vm}을 병렬로 연결한 저항이다. 식 (31)과 식 (32)를 식 (24)에 대입하고 R_{CN}을 구한 결과는 식 (33)~(34)와 같다.

$$R_{CN} = R_o\left(\frac{R_{PC\,Vm} \parallel R_o + R_{CN}}{R_{PC\,Vm} \parallel R_o} - \frac{R_{PC\,Vm} + R_{CN}}{R_{PC\,Vm}}\right) \tag{33}$$

$$R_{CN} = R_o\left(\frac{R_{PCVm}R_o + R_{CN}(R_{PCVm} + R_o) - R_{PCVm}R_o - R_{CN}R_o}{R_{PCVm}R_o}\right) \tag{34}$$

식 (34)를 정리하면 좌변과 우변이 모두 R_{CN}이 되어 전압계의 내부 저항과 전압 오차와는 상관없이 격리 저항이 계산되는 것을 확인 할 수 있다. 그러므로 다른 오차 요인이 없다고 가정하면 저항계의 내부 저항과 표준 기지 저항 오차에 의한 측정

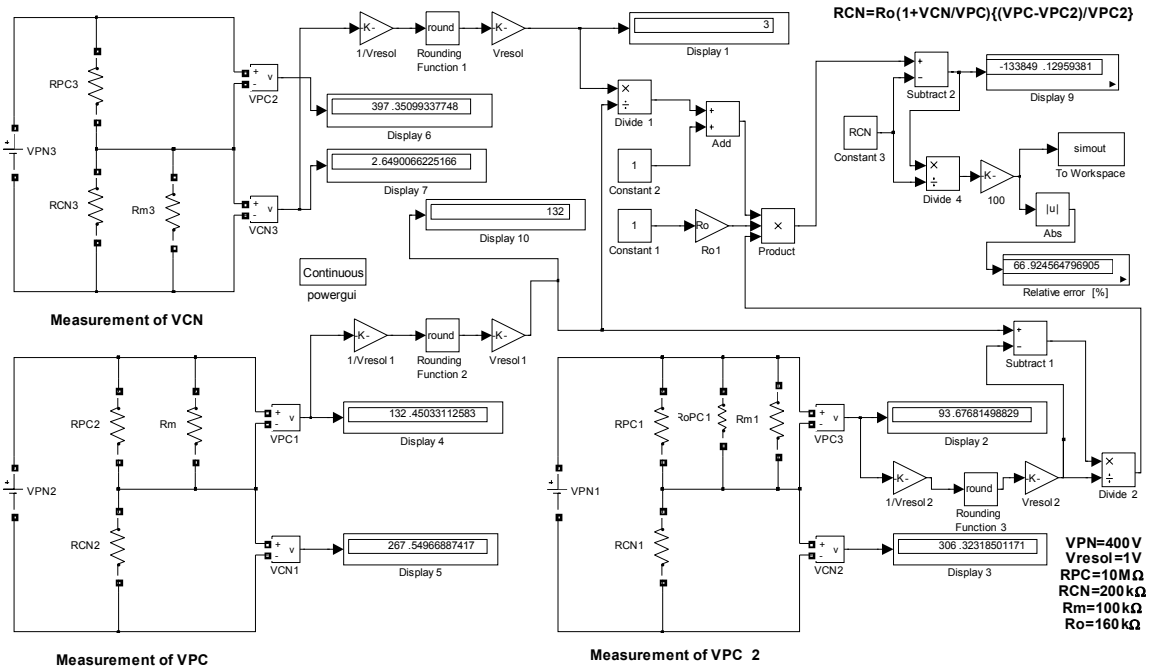

Fig. 11 MATLAB/Simulink model based on the isolation resistance measurement method of FMVSS No. 305.

전압 오차는 격리 저항 R_{CN}의 측정 정확도에 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다. 유럽/일본과 미국 방식으로 정리한 식은 식 (35)~(36)과 같다.

$$R_{i(meas)} = R_{PC\,Vm} \parallel R_{CN} \tag{35}$$

$$R_{CN(meas)} = \left(1 + \frac{V_{CN\,Vm}}{V_{PC\,Vm}}\right)\left(R_{PC\,Vm} \parallel R_{CN}\right) \tag{36}$$

여기서 측정값은 전압계 내부 저항에 의해 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

하지만, 실제 측정환경에서는 전압계 해상도 등의 제한이 있기 때문에 이것을 고려한 상태에서 격리 저항, 계측기 내부 저항, 표준 기지 저항 변화에 대한 오차 특성을 조사할 수 있다.

3. 시뮬레이션

3.1 계측기 연결 회로

MATLAB/Simulink를 이용하여 ELSA 규제안, 미국(Fig. 11), 유럽/일본 규제에 대한 격리 저항 측정 방법의 회로를 모델링 하였다. 전압계는 소수점 넷째 자리에서 소수점 첫째 자리까지에 대해 반올림을 하여 측정하도록 구성하였고 내부저항 격리 저항에 병렬 연결하였다. 그리고 실행을 통해 격리 저항을 계산하였다. $V_{PC} \geq V_{NC}$이고 V_{PN}이 400V, R_{PC}가 10MΩ인 경우를 가정하여 R_{CN}을 200kΩ, 10MΩ으로, R_{Vm}을 100kΩ, 1MΩ, 10MΩ으로 설정하고, R_o을 20% 오차를 고려하여 160kΩ, 200kΩ, 240kΩ으로 바꾸어 가면서 전압계에 의해 측정되는 격리 저항을 구하고 참값에 대한 상대오차를 구하였다.

그 결과 Table 8에서 ELSA 방식의 식은 유럽/일본과 미국의 수식 보다 정확도가 우수한 것으로 나타났다. 다만, 전압계의 해상도가 떨어질수록 오차가 커지는 것으로 나타났다. R_{CN}이 200kΩ일 때와 R_{Vm}이 10MΩ일 때는 미국 방식의 오차가 2%, 유럽/일본 방식의 오차가 4% 정도였으나 R_{CN}이 10MΩ일 때는 각각 약 33%, 66% 정도로 달라지는 것으로 나타났다.

Table 8 Comparison of isolation resistance measurement methods using FCV's own RESS as DC voltage source

R_{CN}	R_{Vm}	R_o	Relative error of isolation resistance with respect to the different voltage resolutions [%]											
			R_{NCmeas} (ELSA-7-9, ELSA-7-10)				R_{NCmeas} (FMVSS 305)				R_{imeas} (R100,A101)			
			0.001V	0.01V	0.1V	1V	0.001V	0.01V	0.1V	1V	0.001V	0.01V	0.1V	1V
200kΩ	100kΩ	160kΩ	0.0013	0.0122	0.0060	1.9987	66.2257	66.2291	66.2230	66.9246	66.8879	66.8915	66.8730	67.6596
200kΩ	100kΩ	200kΩ	0.0012	0.0093	0.1233	3.0303	66.2248	66.2219	66.1834	67.2727	66.8871	66.8844	66.8342	68.0000
200kΩ	100kΩ	240kΩ	0.0001	0.0177	0.1636	2.0979	66.2252	66.2310	66.1697	66.9580	66.8875	66.8934	66.8208	67.6923
200kΩ	1MΩ	160kΩ	0.0004	0.0044	0.0621	0.0301	16.3931	16.3888	16.3230	16.2752	18.0324	18.0289	17.9741	18.0247
200kΩ	1MΩ	200kΩ	0.0003	0.0006	0.0128	0.2710	16.3933	16.3920	16.3857	16.0230	18.0325	18.0320	18.0355	17.7778
200kΩ	1MΩ	240kΩ	0.0003	0.0056	0.0205	0.1876	16.3932	16.3972	16.3579	16.4071	18.0325	18.0371	18.0082	18.1538
200kΩ	10MΩ	160kΩ	0.0004	0.0036	0.0322	0.2597	1.9228	1.9190	1.9566	2.0052	3.8458	3.8415	3.8809	4.0000
200kΩ	10MΩ	200kΩ	0.0003	0.0004	0.0266	0.1855	1.9229	1.9229	1.9511	1.5677	3.8459	3.8454	3.8756	3.5714
200kΩ	10MΩ	240kΩ	0.0000	0.0048	0.0194	0.3763	1.9232	1.9178	1.9060	2.1197	3.8462	3.8404	3.8314	4.1121
10MΩ	100kΩ	160kΩ	0.0242	0.1092	2.5641	60.0000	98.0395	98.0379	98.0000	96.8000	99.0197	99.0189	99.0000	98.4000
10MΩ	100kΩ	200kΩ	0.0262	0.1009	2.5641	33.3333	98.0395	98.0380	98.0000	98.6667	99.0198	99.0190	99.0000	99.3333
10MΩ	100kΩ	240kΩ	0.0545	0.4258	3.2967	20.0000	98.0379	98.0317	98.1143	98.4000	99.0190	99.0158	99.0571	99.2000
10MΩ	1MΩ	160kΩ	0.0026	0.0213	0.7007	8.6061	83.3331	83.3385	83.4667	82.0800	91.6665	91.6693	91.7333	91.0400
10MΩ	1MΩ	200kΩ	0.0077	0.0286	0.9471	9.0909	83.3348	83.3302	83.5077	82.0000	91.6674	91.6651	91.7538	91.0000
10MΩ	1MΩ	240kΩ	0.0069	0.0562	0.8288	8.0519	83.3323	83.3256	83.4880	82.1714	91.6662	91.6628	91.7440	91.0857
10MΩ	10MΩ	160kΩ	0.0022	0.0538	0.1168	1.8546	33.3350	33.3709	33.2721	32.2667	66.6675	66.6854	66.6361	66.1333
10MΩ	10MΩ	200kΩ	0.0024	0.0399	0.6652	6.0150	33.3319	33.3616	32.9067	37.5000	66.6660	66.6808	66.4533	68.7500
10MΩ	10MΩ	240kΩ	0.0027	0.0573	0.5351	0.5514	33.3317	33.3732	33.7067	33.8667	66.6659	66.6866	66.8533	66.9333

동일한 격리 저항에 대해 전압계의 내부 저항이 작아지면 격리 저항 측정 오차 크기가 커지는 것으로 나타났다. 특히 R_{PC}가 10MΩ, R_{CN}이 10MΩ일 때 R_{Vm}이 100kΩ일 때 R_o의 20% 오차 범위에서 최대 60%의 오차가 나타났다.

격리 저항이 R_{CN} 200kΩ에서 10MΩ으로 변하면 전압계 내부 저항이 10MΩ이더라도 오차가 커지는 것으로 나타났다. R_o의 20%의 오차 범위에 속하는 160kΩ, 200kΩ, 240kΩ의 상대 오차 특성은 내부 저항과 격리 저항에 따라서 달라지는 것으로 나타났다.

4. 결 론

연료전지 자동차의 세계기술규정의 전기 안전성 기준안 ELSA-7-9 및 ELSA-7-10의 감전보호기준의 이론적 분석과 시뮬레이션을 통해 ELSA 규제안 대응에 활용될 수 있는 연구 결론을 다음과 같이 얻었다.

1) IEC 60479-1 기준의 인체 생리학적 곡선의 심실세동 영역(AC-4.1)을 감안하여 AC와 DC에 대해 허용 전압, 허용 접촉 시간 등을 설정할 수 있다.
2) AC의 고전압 최소 기준인 30V는 인체의 통전 시간과 통전 경로에 따라 위험할 수 있으며 허용접촉전압을 고려하여 AC 고전압 기준을 25V 미만으로 하는 것을 검토할 수 있다.
3) ELSA 규제안에서 DC 허용 에너지를 0.2J 미만으로 규정하였지만, AC 허용 에너지가 제시되어 있지 않아 이를 분석한 결과 도출 된 기준은 약 0.0813J 미만으로 나타났다.
4) 보호 수준 IPXXB를 만족하기 위한 차량 이격

거리 설계시 인체의 가운데 손가락 길이를 고려할 수 있다.

5) 차량 절연이 파괴될 때와 인체가 고전압 단자를 접촉하였을 때를 대비 하여 고전압 버스와 섀시 사이, 대지와 섀시 사이 격리 저항을 DC 100Ω/V, AC 500Ω/V 이상으로 설계할 수 있다.
6) 격리 저항의 기준을 고려할 때 노출 도전부 사이 등가 접지 저항은 0.2Ω 미만으로 하되, 노출 도전부-섀시 접지 저항은 노출 도전부 사이 등가 접지 저항의 기준을 만족하는 범위 내에서 접지 저항 값을 선정할 수 있다.
7) ELSA 규제안에 나와 있는 500Ω/Vac(2mA)의 격리 저항 기준을 감안한 허용 AC 접지 전압 실효치가 제시되어 있지 않아 이를 1V 미만으로 도출해 보았다.
8) 고전압과 저전압 시스템이 연결된 절연형 전력변환기를 설계할 때 저전압 도전부에 대한 섀시 접지를 할 수 있다.
9) 고전압 버스 측정시 직접 접촉의 위험성이 있고 격리 저항이 저하되면 접지가 되어 있어도 인체에 위험할 수 있으므로 시험자의 직·간접 접촉 보호를 위해 절연 보호장구를 착용하는 것을 의무화할 수 있다.
10) 전압계와 RESS를 이용한 격리 저항 측정에 있어 ELSA 규제안 계산식은 전압계 내부 저항과 표준 기지 저항으로 인한 측정 오차를 줄일 수 있으나 추가적으로 전압계의 해상도에 의한 오차를 고려할 수 있다.

후 기

본 연구는 국토해양부 한국 건설 교통기술 평가원의 수소 연료전지 자동차 안전성평가 기술개발 사업의 일환으로 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1) 홍종철, 강승진, 최상진, 박상용, 김종욱, “수소에너지의 승용차부문 도입에 따른 CO2 배출 감축 및 비용효과 분석 연구”, 한국수소 및 신에너지학회논문집, Vol. 20, No. 1, 2009, pp. 9-21.
2) 채영석, “도요타 리콜사태를 보는 다른 시각”, 오토저널(구 자동차공학회지), Vol. 32, No. 3, 2010, pp. 73-75.
3) Working Group on Electric Safety, “Meeting Report”, ELSA-1-1, 2008.
4) Working Group on Electric Safety, “Electrical safety provisions for vehicles post crash”, ELSA-7-9, 2009.
5) Working Group on Electric Safety, “Electrical safety provisions for vehicles in use”, ELSA-7-10, 2009.
6) 김일구, 첸 시, 박재홍, “연료전지 차량의 전기 안전성 규제안 작성 방법론”, 한국수소 및 신에너지학회논문집, Vol. 20, No. 2, 2009, pp. 133-141.
7) 산업자원부 기술표준원, “인체와 가축에 대한 전류의 영향-제1부 : 일반적인 양상”, KS C IEC 60479-1, 2007.
8) 산업자원부 기술표준원, “인체를 관통하는 전류의 영향-제2부 : 특수 양상”, KS C IEC 60479-2, 2007.
9) 이종철, “IEC 60479에 의한 인체 감전보호”, 조명·전기설비학회지, 제21권, 제2호, 2007, pp. 3-10.
10) P. E. Sutherland, D. Dorr, and K. Gomatom, “Response to electrical stimuli: human current sensitivities and resistance values in the presence of electrically energized objects”, IEEE Industry Applications Magazine, May-June, 2009, pp. 22-30.
11) SAE (Society of Automotive Engineers) International, “Recommended practice for electric and hybrid electric vehicle battery systems crash integrity testing”, SAE J1766, 2005.
12) 산업자원부 기술표준원, “제5차 한국인 인체치수조사사업 보고서”, 2차년도 최종 보고서, 2004.

13) F. P. Dawalibi, R. D. Southey, and R. S. Baishiki, “Validity of conventional approaches for calculating body currents resulting from electric shocks”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, 1990, pp. 613-626.
14) G. Parise, “A summary of the IEC protection against electric shock”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 34, No. 5, 1998, pp. 911-922.
15) National Highway Traffic Safety Administration, “Electric powered vehicles: electrolyte spillage and electrical shock protection”, FMVSS (Federal Motor Vehicle Safety Standards) No. 305, U. S. A., 2004.
16) United Nations Economic Commission for Europe, “Uniform provisions concerning the approval of battery electric vehicles with regard to specific requirements for the construction and functional safety”, Regulation No. 100, 1996.
17) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, “Technical standard for protection of occupants against high voltage in fuel cell vehicles”, Attachment 101, Japan, 2004.