

# 인체 모델을 이용한 감전특성에 관한 연구

(A Study on the Electric Shock Characteristics Using a Human Body Model)

정연하\*, 이재화\*, 장태준\*, 노영수\*, 곽희로\*, 최충석\*\*

(Yeon-Ha Jung\*, Jae-Wha Lee\*, Tae-Jun Jang\*, Young-Su Roh\*, Hee-Ro Kwak\*, Chung-Seog Choi\*\*)

\* : 숭실대학교, \*\* : 전기안전연구원  
(\* : Soongsil Univ., \*\* : ESRI)

## Abstract

As electric shock accident take place frequently, electrical safety is extremely important to prevent them. This paper describes the characteristics of electric shock. In order to examine it, an experimental apparatus including a model of a human body is fabricated and the magnitude of the voltage held by the model is measured under several conditions as follows;(1) the model is not contacted to an electric pole and a step voltage does not exist. (2) the model is not contacted to an electric pole and a step voltage exists. (3) the model is contacted to an electric pole and a step voltage does not exist. (4) the model is contacted to an electric pole and a step voltage exists. As a result of the experiment, it is found that the voltage held by the model depends on the step voltage as well as the voltages applied to the electric pole.

## 1. 서 론

전기가 발견된 이래 산업화의 발전은 급성장을 보였으며 일상생활의 변화도 뚜렷하게 나타났다. 그 중 편리한 전기기기의 급증과 이에 따른 안전장치의 설치는 현재에도 많은 연구와 개발이 이루어지고 있는 중이다. 유용한 전기의 사용에 있어서 관리소홀이나 부주의에 의해 전기감전사고가 발생할 수 있으며, 이로 인해 부상과 사망에 까지 이르게 된다. 국내 감전사고 통계 자료에 의하면, 2002년 총 발생건수는 854명으로 집계되었으며 이 중 사망자는 87명이 이르고 있어 단일사고로는 매우 높은 점유율을 보이고 있다. 이는 2001년도에 발생한 감전사고 건수보다 약 7.5%가 감소한 수치이나 통계자료 자체가 병원과 경찰서의 공식화된 자료만을 인용한 것으로 더 많은 사고자가 있는 것으로 추정된다. 선진외국의 경우 감전사고자를 모의한 실험과 인체에 감전전류가 흘렀을 때의 영향 등을 비교 분석하여 정립하고 있다. 각 국의 감전사고자의 비율을 보면 2002년도 영국의 경우 15명이 사망한 것으로 나타났으며 2000년도 일본의 경우 37명이 감전되어 사망한 것으로 나타났다. 또한 독일은 95명으로 나타났으며 호주는 37명 감전으로 인해 사망한 것으로 조사되었다. 이는 국내 사망자 87명보다 적은 수치로 실제 국민 일인당 감전사고의 비율을 보면 약 6에서 7배 정도 많은 감전사망자가 국내에서 발생하고 있음을 단적으로 보여준다.<sup>[1]</sup> 감전사고는 예방이 가능하고 기술적 공학적 측면으로의 연구를 통해 능동적인 대책을 마련할 수 있는 노

력이 병행된다면 사고의 발생빈도를 낮출 수 있다. 국내 전기안전 연구의 방향도 전기설비의 안전성에 필요한 연구와 더불어 인체에 미치는 영향에 대해 관심을 가지고 공학적 접근을 시도할 필요가 있다.

따라서, 본 논문에서는 국내 인체표준을 대상으로 하고 감전대상자가 가장 많은 연령과 성별을 구분하였으며, 이를 기준으로 한 인체임피던스를 모의하여 감전경로의 특성을 해석하기 위한 실험과 유한요소적 분법을 이용한 해석으로 감전특성을 분석하였다.

## 2. 인체통과 전류의 경로 추정

### 2.1 인체임피던스와 감전경로

인체는 피부조직, 근육, 뼈, 내장, 혈관 등 다양한 요소로 구분되어 지고 대부분 전기적 관점에서 다른 저항치를 가지고 있다. 특히, 충전부의 접촉에 의한 등가회로를 보면 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

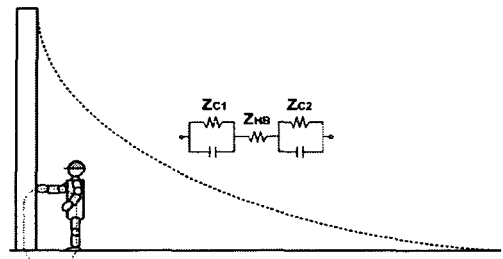


그림 1. 접촉전압에 의한 등가회로

임피던스는 크게 세 구분으로 나누어 충전부와 접

축한 인체에서의 임피던스( $Z_{CI}$ )와 인체저항( $Z_{HB}$ ) 그리고 대지면과 접촉된 발에서의 임피던스( $Z_{C2}$ )로 고려하여 등가회로를 구성할 수 있다. 이 임피던스들은 주변 환경이나 조건 등에 의해 다양하게 바뀌고 인체행위에 따른 동작 조건에서도 많은 영향을 받는다.<sup>[2]</sup>

미국 화재보험협회시험소에서는 리액턴스 성분이 크지 않다는 가정 하에 인체를 순수저항으로 간주하여 인체저항에 있어서 피부와 내부조직의 저항을 더한 그림 2의 실험결과를 내놓았다. 어른 40명에 12V의 직류를 이용하여 각각 5mA, 1mA의 전류를 흘려 측정된 인체저항으로 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 피부가 젖었을 때는 건조할 때 보다 약 1/3배에서 1/8배 이하의 낮은 저항이 나타나는 것을 확인하였다.

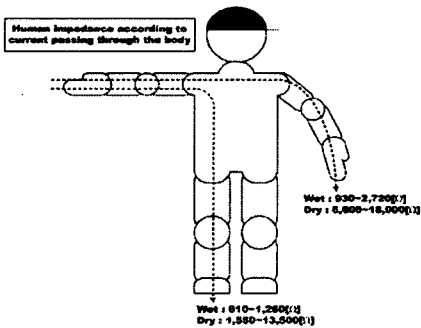


그림 2. 인체의 전기저항

### 2.2 감전전류에 의한 영향

Biegelmeier G.는 실험적 연구를 통해 감전전류에 의해 인체 인체가 느끼는 전류의 크기를 표 1에서와 같이 정립하였다.

표 1. 인체가 느끼는 감전전류의 크기

전류범위	인 체 반 응
100 $\mu$ A-900 $\mu$ A	지각할 수 없음
900 $\mu$ A-2mA	가벼운 지각
2mA-7mA	고통스럽지 않은 쇼크
7mA-10mA	고통스러우나 움직일 수 있음
10mA-20mA	움직일 수 없음 (전류가 치명적인 수준으로 오를 가능성)
20mA-50mA	호흡이 멈춤 (가끔 치명적)
50mA-200mA	1초와 4초 사이에 심실세동 (일반적으로 치명적)
200mA-3A	쇼크상태에서 심장정지 (사망전 전류가 제거되면 다시 떨 수 있음)
3A-10A	심한 화상 (중요기관이 타지 않는한 치명적이지 않음)

표 1은 IEC 60479-1에 수록된 내용으로 인체가 느끼는 최소전류에서부터 사망에 이르는 전류의 크기가

지 상세하게 기록하고 있다<sup>[3]</sup>. 표에서와 같이 인체가 느끼는 가장 작은 전류는 900 $\mu$ A에서부터 인체가 치명적일 수 있는 조건의 전류는 10mA 이상인 것으로 나타났다.<sup>[4]</sup>

### 3. 실험방법

감전실험장의 구성은 불규칙한 저항률을 가진 대지면을 도전성 고무를 이용하여 일정한 저항률이 되도록 하였다. 충전부를 중심으로 끝부분은 무한 영전위가 되도록 접지하였으며, 고무평면 위에 각각의 검출점을 두어 인체모형이 바뀔때마다 전압을 측정하였다. 전원은 100V와 200V를 이용하였으며, 전압을 제어하고 안전한 실험을 할 수 있도록 별도의 제어시스템을 갖추었다. 그림 3은 감전모의실험장을 구성한 개략도를 나타낸 것이다.

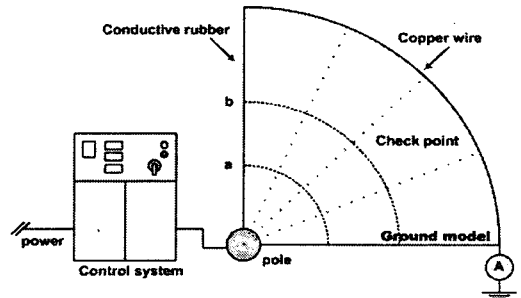
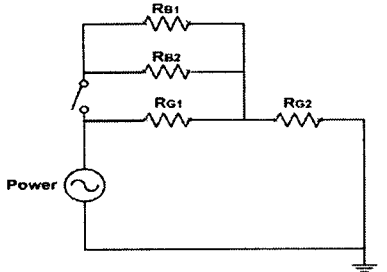
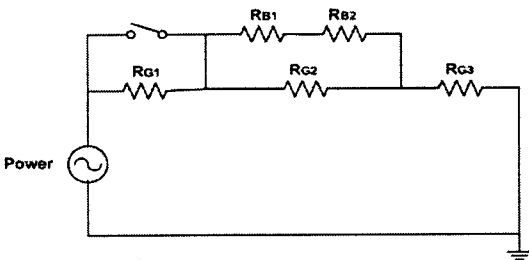


그림 3. 실험 장치 개략도

인체의 조건은 감전실험장에 보폭이 등전위면에 위치하였을 때와 보폭이 30cm 위치한 상태에서 보폭 전압이 발생할 때를 모의하였다. 또한, 등전위면에 위치한 경우 충전부에서 30cm 떨어진 경우와 60cm 떨어진 경우를 모의하였다. 인체모형은 인체의 일부분인 두 다리를 모의하였다. 다리는 원통형의 아크릴로 제작되었으며, 내부는 NaCl 1%의 수용액<sup>[5]</sup>을 채우고 상부와 하부는 스테인리스 스틸(stainless steel)을 이용하였다. 인체 모형의 저항은 각각 507 $\Omega$ 으로 제작되었다. 본 실험의 등가회로는 그림 4에서 나타난 것과 같다. (a)는 보폭이 등전위면에 위치한 경우의 등가회로를 구성한 것으로 스위치가 On으로 되면 인체가 충전부에 접촉된 상태이며, Off로 되면 비접촉된 상태의 회로가 구성된다. (b)는 보폭의 위치가 등전위면에 없는 경우로서 스위치가 On으로 되면 인체가 충전부에 접촉된 상태를 나타내며, Off가 되면 비접촉된 상태의 회로를 구성한 것이다. 회로에서  $R_{B1}$ ,  $R_{B2}$ 는 인체모형 각각의 저항이고,  $R_G$ 는 대지면의 저항을 나타낸다.



(a) 보폭이 등전위면에 위치한 경우

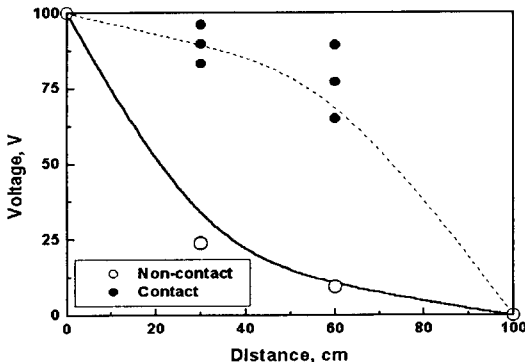


(b) 보폭이 등전위면에 위치하지 않는 경우  
그림 4. 실험구성에 이용된 감전 등가회로

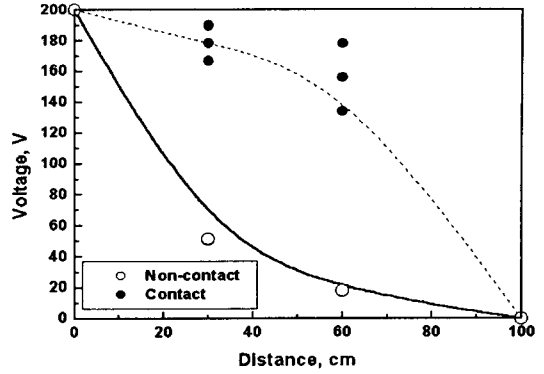
#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 등전위면에서의 접촉 및 비접촉전압 측정

그림 5는 충전부의 전압크기에 따른 특성곡선을 나타낸 것으로 (a)는 100V일 때의 충전부에서 인체 모형의 이격에 따른 전압크기를 측정하는 것이고, (b)는 200V일 때의 충전부에서 인체 모형과의 이격에 따른 전압크기를 측정하는 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 비접촉시 인체모형이 있는 위치에서의 전압과 접촉시 인체모형이 있는 위치에서의 전압은 3배 이상의 전압이 차이가 나타났다. 또한 충전부의 인가전압이 클수록 인체모형이 있는 위치에서의 전압도 비례하여 커지는 것을 알 수 있었다. 이것은 충전부에 걸리는 전압의 크기에 상관하여 인체감전의 위험성이 증가하는 것을 의미한다.



(a) 100V의 전압이 충전부에 인가될 때



(b) 200V의 전압이 충전부에 인가될 때  
그림 5. 충전부의 전압크기에 따른 특성곡선

##### 4.2 보폭의 차가 있을 경우 접촉 및 비접촉전압 측정

그림 7에서는 보폭전압이 있을 경우 충전부의 접촉 유무에 따른 인체모형의 보폭전압을 측정하는 것이다. 비접촉시 인체모형의 보폭전압은 약 10V에서 35V정도로 측정되었으나 인체모형이 충전부와 접촉한 경우 충전부에서 인가되는 전압차에 따라 보폭전압이 크게 다른 것을 확인할 수 있었다. 충전부의 인가전압이 100V인 경우 약 80V의 보폭전압이 측정되었고 충전부의 인가전압이 200V인 경우 약 155V가 측정되었다. 이는 충전부의 인가전압이 100V일때보다 약 2배의 전압차가 발생하는 것으로 나타났다.

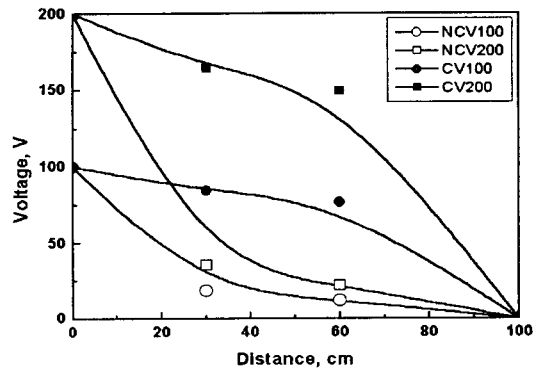


그림 7. 보폭전압시 충전부 접촉과 비접촉 상관곡선

##### 4.3 유한요소적분법에 의한 해석

대지 표면에서 충전부에 인가된 전압과 영전위면까지의 모의를 통한 인체 영향을 분석하기 위해 인체모형에 걸리는 전압을 유한요소적분법에 의해 해석하였다. 충전부의 전압은 100V로 하여 충전부에서 근접했을 때와 원거리에 위치했을 경우, 보폭차에 의한 경우로 분석하였다.

그림 8은 인체모형이 없을 때 전체 대지표면에 걸리는 전위분포를 나타낸 것으로 충전부를 중심으로

일정비율로 전압이 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

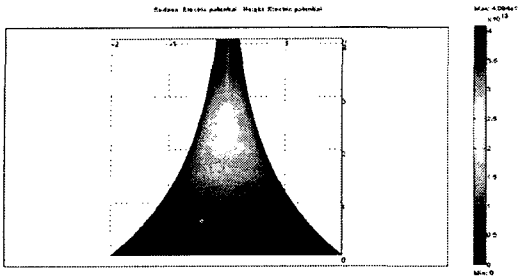
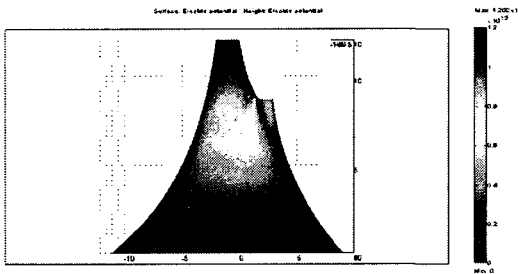
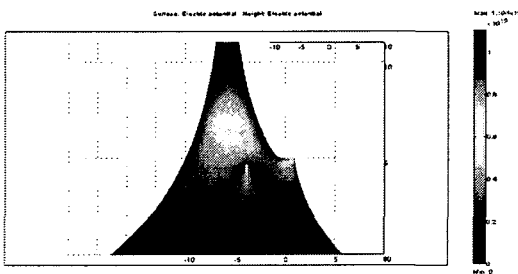


그림 8. 유한요소적분법을 이용한 전위분포

그림 9는 등전위면에 인체모형이 위치한 경우의 전위분포로서 (a)는 충전부에 근접한 경우의 전위분포, (b)는 (a)의 2배 떨어진 거리에서의 전위분포를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 등전위면에 위치한 다리와 다리 사이에는 전압이 걸리지 않는 것을 확인할 수 있었다.



(a) 충전부에 근접한 경우(30cm)



(b) 충전부와 떨어진 경우(60cm)  
그림 9. 등전위면상에서의 전위분포

그림 10은 보폭차가 있을 경우의 전위분포를 나타낸 것으로 보폭의 차가 클수록 인체모형 사이의 보폭전압은 큰 것으로 나타나 감전될 수 있는 위험성이 높은 것을 알 수 있었다.

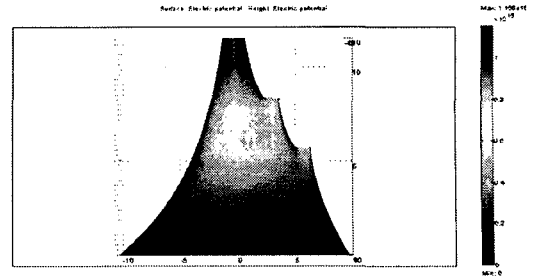


그림 10. 보폭차가 있는 경우의 전위분포

#### 4. 결 론

실험 결과로부터 인체모형과 대기면 모델 구성으로 전기설비에서 인체의 감전위험성을 입증할 수 있었다.

(1) 등전위면에서 접촉시 전압은 비접촉시보다 3배 이상의 전압이 걸리고, 충전부의 인가전압이 클수록 인체모형이 있는 위치에서 전압 크기와 비례하여 인체감전의 위험성이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

(2) 비접촉시 인체모형의 보폭전압은 약 10V에서 35V 이내로 측정되었고, 접촉시 충전부의 인가전압이 100V인 경우 약 80V, 200V인 경우 약 155V의 전압 측정되어 약 2배의 전압차가 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

(3) 등전위면에서 인체모형이 위치한 다리와 다리 사이에는 전압이 걸리지 않는 것을 확인할 수 있었으며, 전압이 클수록 보폭전압이 발생할 때 큰 전위차가 발생하여 감전될 수 있는 위험성이 높은 것을 알 수 있었다.

향후, 전기안전 연구에 있어서 인체와 설비를 중심으로 연구가 활성화될 수 있는 중요한 자료가 될 것으로 판단된다.

본 연구는 산업자원부(MOCIE) 전력산업 기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) 전기재해 통계분석, 한국전기안전공사, 2003
- (2) R.C. Lee and M. Capelli-Schellpfeffer, "New Concepts in Therapy for Electrical Shock", *IEEE EM&BS, 18th AIC*, pp.2189-2190, 1996
- (3) International Electrotechnical Commission IEC Report, "Effect Current Passing Through the Human Body, Part 1: General Aspect", 60479-1, IEC, 1984.
- (4) W. Zipese, "Multiple Neutral to Ground Connections", *IEEE I&CPS Technica Conference Record*, 1972,
- (5) Lowder.S., "Electrical Contact Accident with a welding machine", *IEEE on interantional Conference*, pp.127-143, Sept/1993