

인체모형을 이용한 감전사고 모의와 프로그램 분석

장태준, 정연하, 노영수, 곽희로
승실대학교

The Simulation of Electric Shock Fault and Program Analysis
using a Human-body Model

Tae-Jun Jang*, Yeon-Ha Jung*, Young-Su Roh*, Hee-Ro Kwak*
Soongsil Univ*

Abstract - 본 연구에서는 인체모형을 이용하여 감전사고를 모의하고, 프로그램을 이용하여 해석하였다. 그리고 실험결과를 국내 감전사고자의 통계자료와 비교하였다. 향후 더 많은 사고모델에 대한 자료를 축적하면 감전사고 메커니즘을 체계적이고 정량적으로 입증할 수 있고, 이것은 관리자의 전기설비 이용요령, 사용자의 휴먼에러(human error)를 최소화할 수 있는 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

1. 서 론

전기는 산업을 발달시키는 중요한 에너지원으로서 이용되었으며, 인간의 욕구충족을 위한 다양한 방법으로 사용이 가능하여, 현재에는 전기의 사용이 급증하고 있는 추세이다. 이러한 전기에너지의 유익한 일면에는 관리소홀이나 부주의, 방치 등으로 인해 절연성을 확보하지 못한 상태에서 전기제해를 유발시키기도 한다. 특히, 전기설비사고로 이어지는 대부분은 전기에너지가 열에너지로 변환하여 발생하는 것으로 장시간 열화를 거치면서 일어날 수 있는 사고이다. 또한, 정상적인 회로를 구성하였다고 해도 인체에 의한 감전사고는 전기를 이용하는 모든 곳에서 발생할 수 있는 위험요소를 가지고 있다. 따라서 전기제해를 예방하기 위해서는 설비사고나 감전사고를 유발할 수 있는 유해한 열에너지의 발생을 억제하기 위한 노력이 요구된다^[1].

전기에너지에 의한 감전사고의 대부분은 기술적으로 접근하여 해결이 가능하고 관리적 관점이나 연구를 통한 다각적 측면에서의 접근이 필요하다. 또한, 국내 전기안전 연구의 방향에 있어서 전기설비 중심의 연구에서 벗어나 인체공학적인 해석과 접근을 통해 인체에 미치는 영향에 대해 분석하고 이에 대한 학문적 접근을 시도할 필요가 있다^[2].

본 연구는 이미 언급한 다양한 방법에서 인체모형을 제작하여 회로를 구성하는 방식으로 감전 사고를 모의하였으며, 해석프로그램(2D Electro)을 이용하여 전기설비가 인체에 미치는 영향에 대한 분석을 실시하였다. 본 자료의 구축을 통해 감전사고자의 사고발생 메커니즘을 해석하는데 용이하고, 전기설비의 관리 및 행동요령을 만들어 휴먼에러(human error)를 최소화할 수 있는 자료로 응용이 가능할 것으로 기대된다.

2. 인체모형의 구성과 해석방법

2.1 인체모형의 구성

감전사고 실험을 하는데 있어서 직접 인체를 이용하는 것은 매우 위험한 것으로 가장 유사한 인체모형을 제작하여 모의하는 것이 바람직할 것이다. 이에 따라 국내외 자료를 근거로 하여 가장 빈도수가 많은 감전사고자를 분류하고, 실험기준은 국제전기코드(IEC 60479-1) 등을 인용하였다. 또한, IEEE Std. 80에 의한 인체 임피던스를 설정하고 인체 각 부분의 저항치를 비율로 설정하였다. 인체를 전기적으로 해석하기 위해서 필요한 유전율은 연령, 성별, 체형 등의 신체적 조건에 따라 매우 다르고 주변온도 및 습도의 영향에 의해 피부저항의 특성도 다르게 된다^[3]. 이러한 특성들을 응용하여 그림 1에서와 같이 인체모형을 설정하고 실험을 모의하는데 필요한 단계를 거쳤다. 국내 감전사고에 있어서 성비는 남성이 여성보다 16.4배의 높은 비율로 나타났으며 2002년도를 기준으로 하였을 경우 총 854명 중 773명이 남성이었다. 이는 약 90.5[%]에 이르는 수치이다. 연령별로 보았을 경우 31세에서 45세까지가 전체 감전사고자의 46.7[%]에 이르는 것으로 조사되었다^[4].

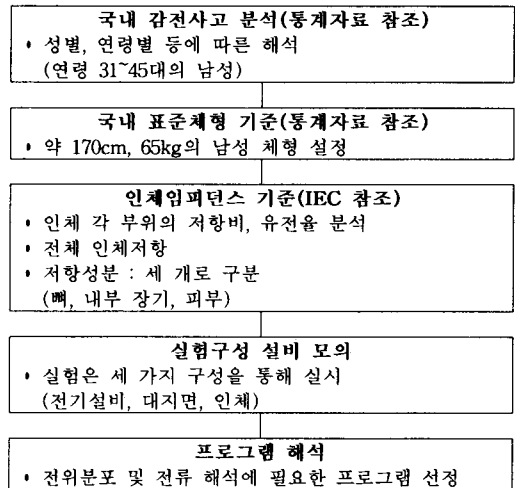
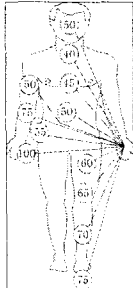


그림 1. 감전사고 발생과정에 따른 모의 구성

국내 표준체형은 국가에서 주기적으로 조사되는 통계

를 응용하여 1997년 대한민국의 성인 남자의 표준체형을 기준으로 하여 키는 약 170[cm]에 몸무게가 65[kg]이 되도록 설정하여 제작하였다. 인체인피던스는 IEC 60479-1 (Effects of current on human beings and livestock)에서 권고한 실험적 기준을 응용하였다. 그림 2는 인체 각 부위에서 왼손까지의 저항비를 나타낸 것이고 이때 인체 모형에서 구성한 것과 비교하였다^[5].



구분	합성저항 (Ω)	인체모형 저항비	IEC 저항비
손-머리	184.3	56.1	50
손-목	167.2	51	40
손-손	328.4	100	100
손-팔꿈치	234.9	71.5	75
손-무릎	195.4	59.5	70
손-발	229.9	70	75

그림 2. IEC 60479-1의 인체저항비와의 비교

인체모형을 설계하는데 있어서 인체의 전기저항은 매우 중요하며 이를 가변적으로 조절할 수 있도록 하기 위한 기준을 마련하였다. 상용전압을 기준으로 하였을 경우 최악의 상태에서 약 1,000[Ω]의 인체저항이 나타나며 피부의 건조와 습한 조건에 따라 약 20배가량 차이가 발생한다. 국내 인체저항의 평균치를 조사한 자료에서 보면 오른 손에서 왼손을 통과하는 건조한 상태의 인체저항 평균치는 약 35[Ω], 습한 상태에서는 약 9[Ω]인 것으로 나타났고, 왼손에서 양발까지 회로가 구성된 경우 양발 작용과 건조한 상태에서는 인체저항의 평균치가 약 25[Ω], 맨발의 습한 상태에서는 저항 평균치가 약 10[Ω]이 나타났다. 또한, 보통의 경우 피부저항은 약 2,500[Ω], 내부 조직저항은 500[Ω], 발과 신발사이는 1,500[Ω], 신발과 대지사이에서는 약 700[Ω]의 저항 등 다양한 측정결과가 보고되고 있으나 대부분 실험치의 경우 외부요인에 따라 다른 결과를 보이고 있다. 따라서 피부저항에 의한 접촉저항 변화를 최소화하고 인체내부저항을 고려한 기준을 마련하였다^[6].

2.2 감전사고 해석 방법

감전사고의 해석을 위해 이용된 방법 중 하나로 경계요소적분법(BEM)은 미분방정식에 대한 그린함수(Green's function)를 이용하여 매질 경계의 상태변수만으로 전체 시스템을 해석할 수 있는 방법으로 경계에만 요소분할을 하여 경계면의 해만 얻기 때문에 미지결점의 수가 크게 줄어드는 장점이 있다. 또한, 필요한 경우 원하는 지점에 내부 점(Internal points)을 설정하여 해를 구할 수도 있다. 유한요소법에 비해 입출력이 간단하고 비교적 간단한 계산을 요한다. 그러므로 구조물에 비해 거의 무한대에 가까운 전해질로 구성되는 전기방식 관련 해석에서는 가장 효율적이고 정확한 방법이라 할 수 있다. 그러나, 복잡한 구조에서의 그린 함수 계산, 비균등 매질의 처리, 선형재료로 고려해야 하며, 무한 영역에서 복잡하고, 일반화된 프로그램으로의 구현 등에서는 아직

문제점이 남아 있다^{[7][8]}.

따라서 경계요소해석을 통한 인체모형 내의 전위 경로를 파악하고 흐르는 경로를 추적하여 통계적 수치의 감전사고 사망자의 원인을 분석하는데 이용하였다.

2.3 감전사고 모의실험장치 구성

감전사고 메커니즘을 구성하는 가장 중요 요소는 감전을 유발시키는 발생장치와 감전대상자, 회로구성을 도와주는 대지로 구분할 수 있다. 물론, 이외에도 다양한 조건에 의해 감전사고가 발생할 수 있는 요인이 있으나 본 실험에서는 감전경로구성을 그림 3과 같은 회로 구성이 되도록 하였다. 그림에서 점선은 전류의 예상경로로서 회로를 구성하여 각각의 전기설비, 인체, 대지면의 저항을 합성한 것과 같다.

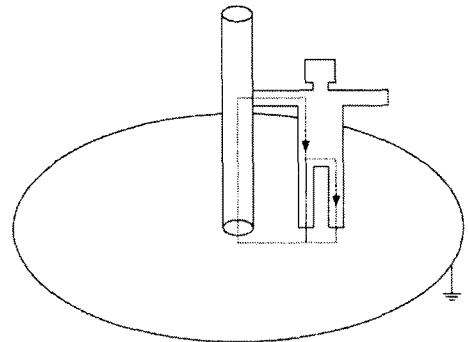


그림 3. 감전경로 구성

누설전류가 흘렀을 때 인체내부에 흐르는 전류의 비를 측정하기 위해 인체관절 부분에 각각 변류기(current transformer)를 설치하였다. 그림 4는 인체모형에 설치된 변류기를 표시한 것이다. 이때 충전부에 접촉하는 신체 부위를 다르게 하여 다양한 인체행위 조건에서의 감전전류를 측정하였다.

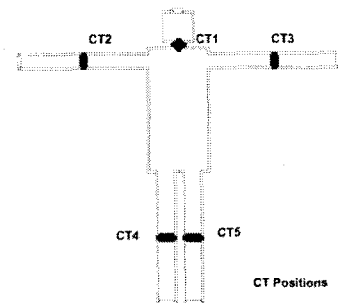


그림 4. 인체모형에서의 변류기 위치

3. 실험결과 및 분석

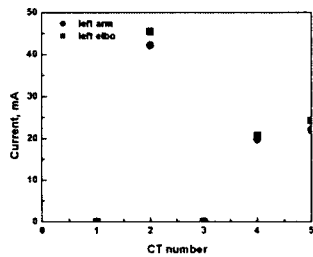
3.1 인체모형의 실측값

감전 사고를 모의하여 실험한 결과 측정된 값을 그래프로 나타내면 그림 5와 같이 표현될 수 있다. 이때 전압은 220V를 인가하였을 때의 전류를 측정한 것이다.

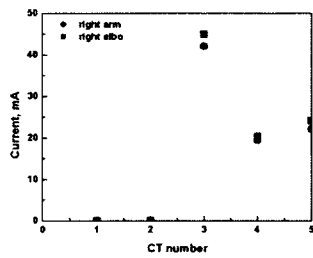
(a)는 왼쪽 손, 왼쪽 팔꿈치가 충전부에 접촉하였을 때

전류를 측정하는 것으로 접촉부분에서 가장 가까운 1번 변류기에서 측정치가 가장 높았으며, 4번과 5번의 무릎에서 측정된 전류치는 거의 비슷하였다. 따라서 왼손 혹은 왼쪽 팔꿈치가 충전부와 접촉하여 흐르는 전류는 인체내부에서 양쪽 다리에서 나누어져 흐르는 것을 확인할 수 있었다.

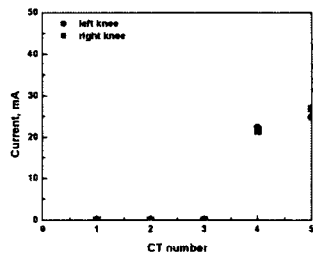
(b)는 오른 손, 오른쪽 팔꿈치가 충전부에 닿아 감전 경로가 형성되었을 경우 측정된 전류 값으로써 충전부에 닿은 부분에서 가장 가까운 3번 변류기에서 전류가 가장 높게 측정되었다. 또한, (a)와 유사한 경로를 가지고 양쪽 다리에서 전류가 분할되어 흐르는 것을 확인하였다.



(a) 왼손, 왼쪽 팔꿈치 접촉



(b) 오른 손, 오른쪽 팔꿈치 접촉



(c) 왼쪽, 오른쪽 무릎 접촉

그림 5. 충전부의 인체접촉에 의한 전류측정

(c)는 왼쪽, 오른쪽 무릎이 충전부에 닿았을 경우를 모의하여 측정된 전류 값으로써 오른쪽 무릎에서 충전부가 닿았으면, 왼쪽 다리로 전류가 흘렀고, 왼쪽 무릎에서 닿았으면 오른쪽 다리로 전류가 흐르는 것을 확인하였다. 이때의 총 전류는 손이나 팔꿈치가 닿았을 때보다 낮았으며 이는 인체저항에 의한 것으로 판단된다.

3.2 프로그램을 이용한 감전 해석

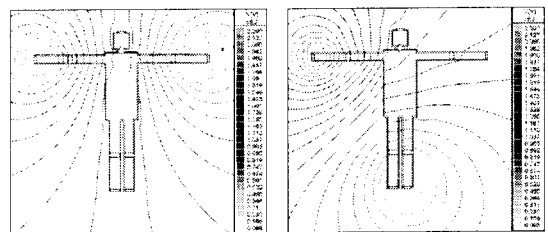
감전해석 프로그램을 이용하여 왼손에서 오른손으로 전류가 흐를 수 있도록 전위차를 주었고, 왼손에서 오른발로 전위를 구성하는 크게 두 가지 형태의 감전 사고를 모의하였다. 220[V]의 전위차를 가지도록 하였고, 이때

인체저항은 인체모형을 기준으로 하였으며, 최소 삼각요소 설정 수는 1000에서 3012개의 자동 매쉬 분할로 하였다.

그림 6의 (a)는 왼손에서 오른손으로 전류가 흐르는 것으로 전위차는 대부분 손에서 발생하였고, 인체의 중심부에서는 전위차가 거의 없는 것으로 나타났다.

(b)는 왼손에서 오른발로 전위차가 발생하는 것으로 손을 통과한 전류가 발로 흐르는 동안 몸의 중심부에서는 전위가 발생하는 것으로 나타났다.

이는 통계적으로도 알 수 있듯이 손과 손을 통한 감전 사고자 중 사망에 이른 사람은 127명 중 5명이었으며, 손에서 발로 감전경로를 형성하였을 경우 159명 중 25명이 사망한 것으로 알 수 있다. 이는 전류가 흐르는 동안 심장을 관통하여 영향을 주는 것으로 판단된다.



(a) 왼손에서 오른손 (b) 왼손에서 오른발
그림 6. 프로그램해석을 통한 감전경로 구성

4. 결 론

본 연구를 통해 인체모형을 구성하여 실험한 결과와 감전해석 프로그램을 이용한 해석으로 국내 감전사고자의 통계적 분석과 비교한 결과 유사한 사고패턴을 해석할 수 있었으며 향후 많은 사고모델에 대한 자료를 축적하여 감전전류가 인체모형에 흐르는 경로를 추적하여 통계적 수치의 감전사고 메커니즘을 입증하고, 관리자의 전기설비 이용요령, 사용자의 휴먼에러(human error)를 최소화할 수 있는 자료로 활용이 가능할 것으로 기대되고 있다.

본 연구는 산업자원부(MOCIE) 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 한운기 외 3인 "도시에 설치된 가로등설비의 현장 상태 분석", 한국조명·전기설비학회 추계학술논문집, 2003.
- [2] 최충석 외 5인 "전기화재공학", 동화기술, pp73~115, 2001
- [3] Lowder,S., "Electrical Contact Accident with a welding machine", IEEE on international Conference, pp.127-143, Sept/1999
- [4] 한국전기안전공사 "도로전기시설물 및 임시전력설비 전기안전 조사 연구" 2003.
- [5] IEC 479-1 Effects of current on human beings and livestock. 1994
- [6] 한국전기안전공사 "전기재해 통계분석" 2003.
- [7] 이현구 외 5인 "BEM 경제요소법을 이용한 양극현상 설계 연구", 대한전기학회 학제학술논문집, 2000.
- [8] Jee-Won Im "유한요소법과 경제요소법의 교호적용에 의한 와전류장 해석" 대한전기학회논문집, 2000.