

## 인체모형을 이용한 고전압방전에 의한 감전위험성 연구

(Simulation of a High Voltage a discharge regard Electric Shock study)

장태준\*, 정연하, 노영수, 곽희로

(Tae-lun Jang\*, Yeon-Ha Jung, Young-Su Roh, Hee-Ro Kwak)

**Abstract** - 본 논문에서는 인체모형을 이용하여 고압감전실험을 하였다. 케이블을 인체모형이 감싸쥐고 있는 경우와 절연체를 통한 접촉을 임펄스와 변압기를 이용하였다. 이때 인가전압은 22,900[V]이다. 고전압에 의해 절연체가 파괴되어 감전의 위험이 있는 것을 알 수 있었으며, 실험을 통해 분석하고자 하였다. 고전압에서의 직·간접적인 감전형태를 알 수 있었으며 고전압 감전사고를 예방하는 중요한 자료로 사용될 것이다.

### 1. 서 론

전기에너지는 그 고유한 장점 때문에 도처에서 이용되고 있으며 인간생활을 윤택하게 한다고 인식되고 있다. 그러나 그 이면에는 전기 이용의 부정적인 면도 존재하는데, 여기에는 전기 감전에 의한 인명피해, 누전에 의한 화재 그리고 정전으로 인한 물적 피해 등이 포함된다.[1] 전기재해 중 감전사고의 경우 전기설비의 이상요인에 의해 전기설비, 충전부, 인체, 대지 등이 전기회로를 구성하는데 여기에 전류가 흐르면 인체는 저항체로 작용하여 열적 내상을 입게 된다. 따라서 대부분 감전사고자는 전기로 인한 화상을 입게 되며 호흡곤란에 의한 심장마비나 2차 사고로 인해 귀중한 생명을 잃기도 한다.[2] 그러므로 전기재해를 예방하여 전기를 안전하게 사용하기 위한 연구는 매우 중요하다.

### 2. 인체모형

감전이란 전압이 인가된 물체에 인체의 일부가 접촉하여 인체 내부의 근육이나 내장 등에 전류가 흘러 영향을 주는 것이다. 이 때 흐르는 전류량에 따라 인체가 느끼는 정도가 다르고 전압이 높아 전류가 클수록 감전의 위험도는 높아진다. 특히 전류가 심장으로 흘렀을 경우 사망과 같은 치명적인 결과를 초래 할 수 있다. 인체는 피부조직, 근육, 뼈, 내장, 혈관 등 다양한 요소로 이루어져 있는데 대부분 전기적 관점에서 다른 저항치를 가지고 있다.

충전부의 접촉에 의한 등가회로를 보면 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 임피던스는 크게 세 구분으로 나누어 임피던스( $Z_{C1}$ )와 인체저항( $Z_{IB}$ ) 그리고 임피던스( $Z_{C2}$ )로 고려하여 등가회로를 구성할 수 있다. 이 임피던스들은 주변 환경이나 조건 등에 의해 변할 수 있고 인체 동작 조건에서도 많은 영향을 받는다.[3]

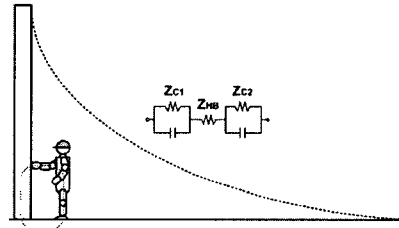


그림 1 전압에 의한 등가 개념도

Fig. 1

보통의 피부저항은 약 2500 [ $\Omega$ ], 내부조직저항은 500 [ $\Omega$ ], 발과 신발사이의 저항은 1500 [ $\Omega$ ], 신발과 대지사의 저항은 700 [ $\Omega$ ]으로 인체의 전체저항은 약 5000 [ $\Omega$ ]이며, 이것은 피부가 젖은 정도 및 인가전압의 증가로 인해 약 500 [ $\Omega$ ]까지 감소한다.[4]

그러나 리액턴스 성분이 크지 않다는 가정 하에 인체를 순수저항으로 간주하는 것이 전격이론에서는 일반적이거나, 본 논문에서는 C를 고려한 인체저항을 이용하고자 한다. 인체저항은 피부와 내부조직의 저항을 더한 것이다.[5]

Dalziel은 인체저항을 측정하기 위하여 피실험자를 소금물에 젖게 하여 19.05 [mm] 두께의 금속판위에서 직경 3.66 [mm]의 동선을 쥐게 한 상태로 60 [Hz] 정현파와 임펄스 (100 [mA])를 통전한 후 저항을 측정하여 표 1과 같은 결과를 얻었다. 임펄스 통전시의 저항은 60 [Hz] 정현파가 통전될 때와 비교해서 10~25 [%] 낮게 된다는 것을 알 수 있다.

표 1 인가전압에 따른 인체저항

인가전압 [V]	인체저항 [Ω]		
	인구의 5 [%]	50 [%]	95 [%]
25	1,750	3,250	6,100
50	1,450	2,625	4,375
75	1,250	2,200	3,500
100	1,200	1,875	3,200
125	1,125	1,625	2,875
220	1,000	1,350	2,125
700	750	1,100	1,550
1000	700	1,050	1,500
접근 한계값	150	750	850

(인체저항은 주어진 값 이하로 된다는 것을 의미함)

그림 2과 같은 회로에 인가전압 [V]과 합성 임피던스 [Z]에 표 1의 95 [%] 값 중 임의의 3개를 선택하여  $R_1$ ,  $R_2$ , C의 값을 계산하였다. 단, 주파수는 60 [Hz]로 하고, 전압 증가에 따른 인체저항의 변화를 알아보고자 하였다.

$R_1$ ,  $R_2$ , C의 값은 식 (1)과 같이 나타난다.

$$Z = R_2, R_1 = \frac{1}{\omega C} \quad (1)$$

결론적으로  $R_1$ 이 100 [Ω]이면 C는 26.526 [ $\mu$ F],  $R_1$ 이 10 [Ω]이면 C는 265.258 [ $\mu$ F]이다. 전압이 증가 할수록  $R_1$ 과 C의 값은 일정하게 조절 할 수 있으며,  $R_2$ 의 값이 변하며, 전압이 증가 할수록 1500 [Ω]에서 수렴됨을 알 수 있다. 인체모델을 그림 2와 같이 구성하였다. 피부저항  $R_1$ 은 10 [Ω]의 무유도성 저항을 사용하였으며, 피부 캐패시터 C는 240 [ $\mu$ F]를 사용하였다. 인체저항  $R_2$ 는 1500 [Ω]의 무유도성 저항을 사용하였다. 이러한 R과 C는 큰 전력을 고려하여 100 [W]를 사용하였다. 무유도 저항을 사용한 이유는 일반저항이 60 [Hz]에 대해 리액티브 성분이 높아 계산한 수치의 조합이 어렵기 때문이다.

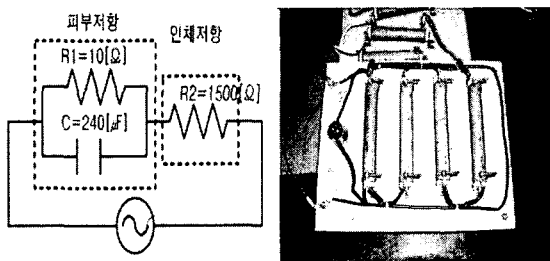


그림 2 인체저항 간략화

### 3. 감전사고의 형태

감전사고의 형태는 그림 3과 같이 직접적인 감전사고와 그림 4와 같이 간접적인 감전사고로 나뉜다.

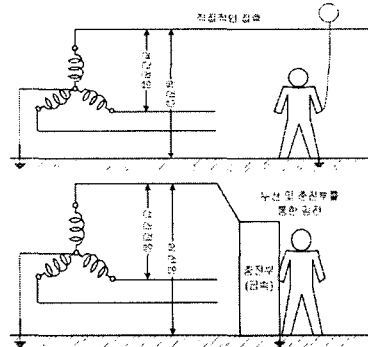


그림 3 직접적인 감전사고 형태

그림 3에서 보는 바와 같이 발생하는 사고가 가장 많이 발생하며, 전자의 경우는 낙시 줄이나, 금속 배관 등이 송·배전 선로에 접촉하여 발생하는 사고이며, 후자의 경우는 누전되는 도체 및 충전부에 인체가 접촉하여 발생하는 사고이다. 우리나라의 권고 배전 방식이 3상 4선식으로 사고가 가장 많이 발생하는 사고의 형태라 할 수 있다.

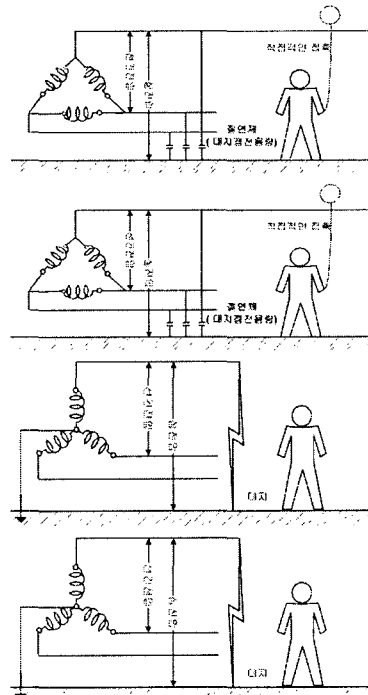


그림 4 간접적인 감전사고 형태

그림 4에서 보는 바와 같이 간접적인 감전사고의 형태를 나타내고 있으며, 이러한 감전사고는 모의가 어렵고 발생 빈도가 낮아 단정 짓기가 어렵다. Δ결선에 많이 발생하며, 대지 정전용량에 의한 사고와 충전부와 가까이 있어 충전전전용량에 의한 사고, 지락이나 낙뢰에 의한 보폭전압에 의한 감전사고가 간접적인 감전사고의 형태로 보인다. 또한, 절연체에 의한 접촉사고도 간접 감전사고의 형태로 발생한다.

## 4. 실험방법 및 결과

### 4.1 케이블을 감싸 쥐고 있는 경우

변압기와 임펄스 발생장치를 이용하여 고압 케이블에 인체가 접촉하였을 경우에 인체모델에 어떠한 영향이 발생하는지를 알아보기 위하여 그림 4.9와 같이 실험을 구성하였으며, 사용된 케이블은 CV와 CNCV 60 [mm]를 이용하였다.

#### 4.1.1 임펄스 발생장치를 이용한 실험

임펄스 발생장치를 이용하여 실험을 하였으며 임펄스 발생전압은 24 [kV]로 고정하였다. 여기서 임펄스 파형은  $1.2 \times 50$  [ $\mu$ s]이다. CV 케이블의 경우는 배선전로에 많이 사용되어지며, CNCV 케이블은 수전설비의 1차 케이블로 많이 사용에 본 실험의 실험재료로 설정하였다.

그림 4에서 보는 바와 같이 CV 케이블의 경우는 2 [A]의 전류가 인체모형에 흘렀으며, CNCV 케이블은 1 [A]가 인체모형에 흘렀다. 1~2 [A]의 전류는 인체가 접촉하였을 경우 사망전류에 이른다.

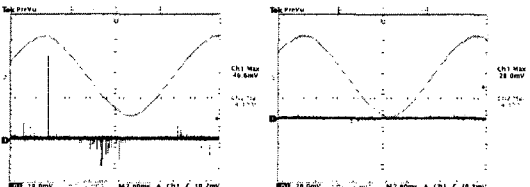


(a) CV 60 [mm] (b) CNCV 60 [mm]  
그림 5 인체가 고압 케이블 피복을 쥐고 있는 경우

그러나, 측정치가 최고치를 보여주기 때문에 상시 1 [A] 이상의 전류가 흐른다고 말할 수 없어 변압기를 이용하여 아래 4.1.2와 같은 실험을 하였다.

#### 4.1.2 변압기를 이용한 실험

고압 변압기는 2차 전압을 조정하기 위해서 1차에 전압조정기를 사용하여 서서히 전압을 증가시켜 변화하면서 실험을 진행하였다.



(a) CV 60 [mm] (b) CNCV 60 [mm]  
그림 6 인체가 고압 케이블을 감싸 쥐고 있는 경우

실험전압은 20,000 [V]를 인가하였다. 그림 5에서 보는 바와 같이 실험 결과를 취득하였으며, (a)는 CV 60 [mm]이며, (b)는 CNCV 60 [mm]이다. (a), (b)의 경우, 인체모형에 흐르는 전류의 값이 4.12 [A]가 흘렀으나 그 통전시간이

10~20 [ $\mu$ s]인 점을 감안하면 인체에는 특별한 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다.

### 4.2 절연체를 통한 간접적인 감전사고인 경우

그림 7에 나타낸 바와 같이 간접적인 감전사고로서 절연체를 통해 감전되는 현상을 모의하고자 하였다. 절연체는 공기와 종이, 비닐, 부직포, 나무를 사용하였으며 이격단위는 [mm]를 사용하였다.

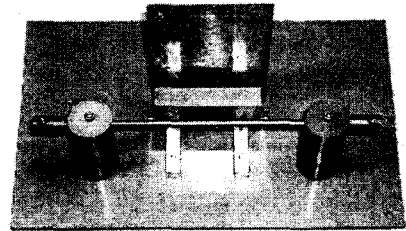
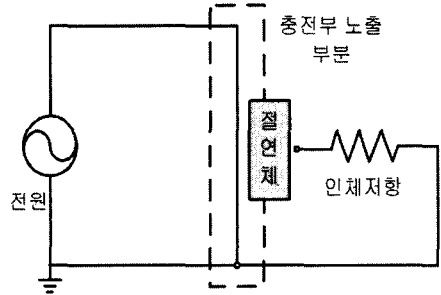
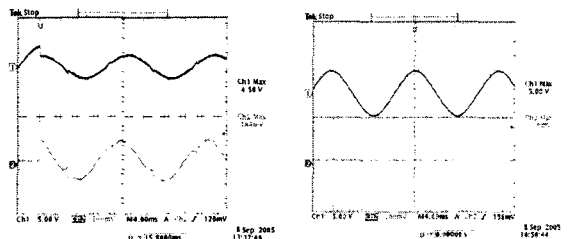
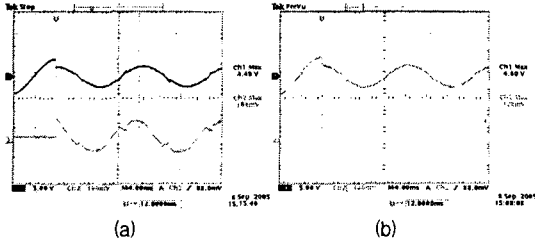


그림 7 절연체를 통한 감전실험



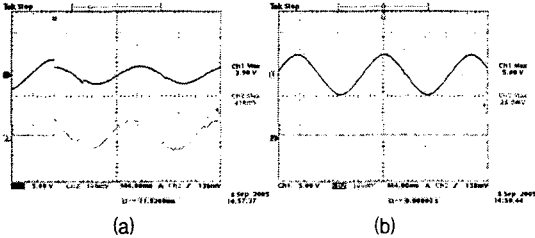
(a) 10 [mm] 공기절연 (b) 11 [mm] 공기절연  
그림 8 충전부와 인체모형을 공기 절연

그림 8에서 보는 바와 같이 절연체에는 아무것도 넣지 않고 공기만으로 절연된 경우 20,000 [V]를 인가하였다. (a)는 10 [mm] 공기절연을 하였으나, 아크발생과 함께 도통되는 것을 볼 수 있었다. 이때 인체모형에 흐르는 전류는 184 [mA]이다. (b)는 11 [mm] 공기절연을 하였으며, 25,000 [V]를 인가하였으나 충전부와 인체모델이 절연된 것을 볼 수 있다.



(a) 충전부와 인체모형을 0.1[mm] 종이 절연(이격거리 11[mm])  
 (b) 충전부와 인체모형을 0.1[mm] 비닐 절연(이격거리 11[mm])  
 그림 9 충전부와 인체모형을 절연체를 통한 절연 (1)

그림 9 (a)에서 보는 바와 같이 11 [mm]에서는 두께 0.1 [mm]의 종이 절연체를 파괴시켜 도통하였다. 종이는 아크에 의해 동그란 탄화된 흔적이 남았다. (b)에서 보는 바와 같이 11 [mm]에서는 두께 0.1 [mm]의 비닐 절연체를 파괴시켜 도통하였다. 비닐은 아크에 의해 녹았으며, 큰 구멍이 발생하였다.



(a) 충전부와 인체모형을 1[mm] 부직포 절연(이격거리11[mm])  
 (b) 충전부와 인체모형을 2.7[mm] 나무 절연(이격거리11[mm])  
 그림 10 충전부와 인체모형을 절연체를 통한 절연 (2)

그림 9 (a)에서 보는 바와 같이 11 [mm]에서는 두께 1 [mm]의 부직포 절연체를 파괴시켜 도통하였다. 부직포는 아크에 의해 화재가 발생하였으며, 화재에 의해 큰 구멍이 발생하였다. (b)는 2.7 [mm]의 나무 합판을 사이에 넣은 경우인데 도통되지 않았다.

이과 같은 실험에서 충전부로부터 금속 물질인 드라이 버나 공구류를 사람이 가진 상태로 충전부에 가까이 가게 되면 절연과피 이격구간이 작아서 인체로 아크가 발생할 우려가 있음을 보여주고 있다.

## 5. 결 과

고압 감전사고는 일반인이 쉽게 근접할 수 없게 시공, 설치되어 운영되기 때문에 저압에 비해 사고가 작다. 그러나 고압감전사고자 대부분이 전기 기술자라는 것을 감안하면, 높은 수치이다.

고압 케이블 이설작업 및 수·배전 설비에서의 케이블 접촉할 경우, 본 실험 결과에서 보는 바와 같이 케이블 접촉은 높은 전류가 발생하나, 지속 시간이 작아 인체에는 무해하게 나타났다. 그러나 케이블이 노후화 되고 수분이 증가하게 되면 위험하게 될 것으로 사료된다. 수·배전설비의 유지 및 관리 중, 충전부에 절연체가 접촉할 경우, 본 실험의 결과에서 보는 바와 같이 절연체를 파괴시켜 도통되는 것을 알 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 2005년도 산업자원부 전력산업연구개발사업 전력선행기술에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] 최충식 외 5인, "전기화재공학", 동화기술, pp.73-115, 2001.
- [2] 최민주, 이경성, "의공학", 청구문화사, pp.386, 2003.
- [3] 정종욱. "접지·등전위 분동 설계실무지식", 성안당, pp.9~20
- [4] 전기안전공사 "전기화재통계분석", 2003 년
- [5] Trevor 외 5명, "Electric Fields in the Human Body Resulting From 60 [Hz] Contact Currents", IEEE, 2001