

인체모형을 이용한 고전압(22.9[kV]) 감전사고 모의 실험

(Experiments to Simulate an Electric Shock Accident of a high Voltage using a Human Body Model)

노영수* · 곽희로** · 장태준

(Young-Su Roh · Hee-Ro Kwak · Tae-Jun Jang)

요 약

22,900[V] 전압에서 발생하는 감전사고를 살펴보기 위하여 최근의 감전사고에 대한 통계자료를 분석하였다. 22,900[V] 전압의 감전사고의 메커니즘을 실증하기 위해서 분석 결과에 근거하여 모의 감전사고 실험을 수행하였다. 실험에서는 여러 가지 상황에서 모의된 감전사고의 위험성을 정량적으로 분석하기 위하여 인체모형에 흐르는 전류를 측정하였다. 실험결과 감전 상황과 관계없이 일단 감전사고가 발생하면 인체에 치명적인 것으로 밝혀졌다.

Abstract

Recent statistical data regarding electric shock accidents have been analyzed to examine the electric shock accidents occurred at the voltage of 22,900[V], In order to demonstrate the mechanism of the 22,900[V] electric shock accident, a number of experiments to simulate electric shock accidents have been performed based on the analysis results. In the experiment, the current flowing through a human body model was measured to quantitatively analyze the hazards of the simulated electric shock accidents in various situations. As a result of the experiment, it was shown that once an electric shock accident occurred, the accident proved fatal to the human body, regardless of electric shock situation.

Key Words : 22,900 volt, electric shock accident, human body model

1. 서 론

전기는 많은 고유한 장점 때문에 일상생활에 널리 이용되고 있으며 향후 전기를 사용하는 분야는 더욱

더 확대될 것으로 예상된다. 그러나 이러한 장점의 이면에는 전기감전으로 인한 인명손실과 같은 부정적인 면도 존재한다. 통계에 의하면 감전사고의 대부분은 220[V]와 22,900[V]의 전압에서 발생되었으며 22,900[V] 전압의 감전사고자는 주로 전기기술자이다. 본 논문에서는 전압별로 감전사고자의 통계자료를 조사하고 22,900[V] 전압에서 감전 위험성을 실증하기 위하여 제작된 인체모형을 이용하여 감전 모의실험을 수행하였다.

* 주저자 : 숭실대학교 전기제어시스템공학부 조교수

** 교신저자 : 숭실대학교 전기제어시스템공학부 교수

Tel : 02-820-0663, Fax : 02-817-7961

E-mail : yroh@ssu.ac.kr

접수일자 : 2006년 3월 22일

1차심사 : 2006년 3월 28일

심사완료 : 2006년 4월 12일

2. 감전사고의 통계

표 1은 최근에 발생한 전기감전사고에서 발생한 사상자에 대한 통계자료이다. 여기서 볼 수 있듯이 대부분의 감전사고는 220[V]와 22,900[V] 전압에서 발생되었다는 것을 알 수 있다. 220[V] 전압은 22,900[V] 전압보다 훨씬 낮기 때문에 상대적으로 안전하다고 말할 수 있으나 220[V] 전압에 일반인이 쉽게 접근할 수 있고 22,900[V] 전압과 비교하여 220[V] 전압의 감전 위험성에 대한 경각심이 부족하기 때문에 220[V] 전압의 감전사고가 많이 발생하는 것으로 볼 수 있다. 이와 다르게 22,900[V] 전압은 매우 위험한 것으로 인식되어 있으므로 일반인이 쉽게 이 전압의 기기나 시설에 접근하는 경우가 드물다. 실제로 전기기술자만이 22,900[V] 전압을 취급할 수 있고, 사고를 예방하기 위해 각종 보호시설과 안전장치가 구축되어 있다. 그럼에도 불구하고 220[V]를 제외한 다른 전압에 비하여 감전사상자의 수가 상대적으로 많다는 것을 알 수 있다. 또한 22,900[V]의 전압에 의한 감전사고에서 대부분의 사고자는 전기기술자이고 감전의 결과는 매우 치명적인 것으로 밝혀졌다.

표 1. 감전사고에 의한 사상자 수(1)
Table 1. Number of casualties due to electric shock accidents

	110 [V]	220 [V]	380 [V]	440 [V]	3.3 [kV]	6.6 [kV]	11.4 [kV]	22.9 [kV]	25 [kV]	66 [kV]	불명
95	2	50	11	2	2	5	2	45	1	2	3
96	9	391	113	24	13	25	10	297	·	·	30
97	5	397	165	26	15	27	12	297	·	·	23
98	3	370	155	31	11	17	11	256	4	3	8
99	3	350	154	15	13	17	11	242	2	6	5
00	0	363	176	19	11	12	7	215	5	1	7
01	2	429	171	22	7	12	6	244	11	0	16
02	1	343	190	10	13	15	4	260	·	2	5

3. 감전사고 모의실험

감전사고의 위험성을 실증하기 위하여 여러 가지 감전 상황에서 인체모형을 이용하여 모의실험을 수

행하였다. 이 장에서는 실험에 사용된 인체모형, 모의한 감전형태 그리고 실험결과에 대하여 상술한다.

3.1 인체저항과 인체모델

감전의 경우 일반적으로 전류는 피부를 통해 인체에 인입하여 인체의 내부를 통과한 다음 다시 피부를 통해 인체의 밖으로 나간다. 따라서 이 때 인체의 등가회로는 그림 1과 같이 피부 임피던스(Z_{C1}), 인체 내부 임피던스(Z_{HB}) 그리고 피부 임피던스(Z_{C2}) 등으로 구성될 수 있다. 여기서 인체의 정전용량은 수십에서 수백 [nF] 정도로 매우 작기 때문에 저항과 병렬로 연결할 경우, 60[Hz]의 주파수에서 리액턴스의 값을 무시할 수 있으므로 인체를 순수저항으로 간주하는 것이 일반적이다[2].

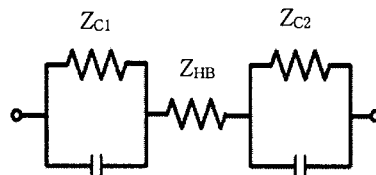


그림 1. 인체 등가 회로
Fig. 1. An equivalent circuit of a human body

220[V] 전압의 경우, 인체에 흐르는 감전전류의 총량보다는 심장으로 흐르는 전류의 양에 따라 감전의 결과는 좌우된다. 즉 인체 내에서 전류가 흐르는 경로, 즉 통전경로가 매우 중요하다[3]. 그러므로 감전의 메커니즘을 정확히 이해하기 위해서는 심장을 포함한 인체 내부에 흐르는 전류의 경로와 양을 측정할 수 있는 인체모형이 필요하다. 그러나 인체의 복잡성과 그림 2와 같은 전압에 대한 인체저항의 가변성 때문에 인체와 유사한 인체모형을 제작하는 것은 현실적으로 매우 어렵다. 한편 앞에서 언급한 바와 같이 22,900[V] 전압의 감전사고는 통전경로와 관계없이 인체에 치명적인 결과를 초래한다. 이와 같은 점들을 고려하여 본 논문에서는 주어진 감전조건에서 감전이 발생한다고 가정하고 이때의 인체저항을 간단한 전기회로로 모의한 인체모형을 이용하였다.

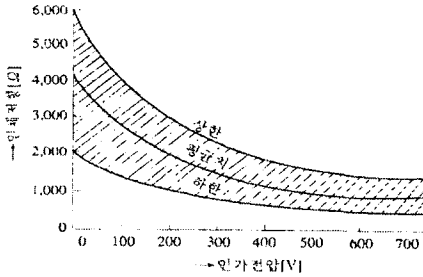


그림 2. 전압의 함수로써 표시된 인체저항
Fig. 2. Human body resistance as a function of voltage

국제적인 규정에서는 다음과 같이 인체저항을 정의하고 있다. 첫째, 미국의 IEEE Sd. 80에서는 감전의 정도를 결정하기 위하여 인체를 단일 저항체로 취급하고 최악의 상태에서의 저항값을 사용하고 있는데 안전성과 관련하여 그 값을 1,000[Ω]으로 정하고 있다[4]. 둘째, 유럽연합의 IEC 60479에서는 인체저항을 인가전압의 함수로 표현하고 있다[5].

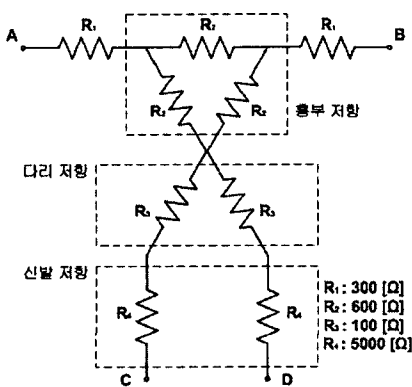


그림 3. 저항으로 구성된 인체모형
Fig. 3. A human body model composed of resistors

본 논문에서는 인체저항에 대한 IEEE와 IEC 60479의 규정을 고려하여 그림 3과 같이 손과 손(A-B)을 1,000[Ω]을 기준으로 하고 신발저항을 5,000[Ω]으로 가정하여 인체모형을 제작하였다. 대지 저항은 도로면에 인접한 곳의 대지 저항률인 1~353[Ωm] 중 200[Ω]을 선택하였다[6].

3.2 실험 방법

본 연구에서는 감전사고의 형태를 그림 4, 5와 같이 직접적인 감전사고와 간접적인 감전사고로 구분하여 모의실험을 수행하였다.

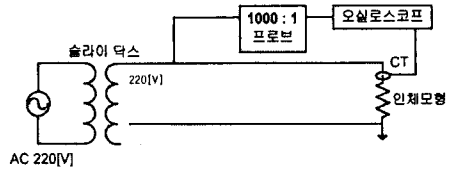


그림 4. 직접적인 감전사고의 개략도
Fig. 4. Schematic of direct electric shock accidents

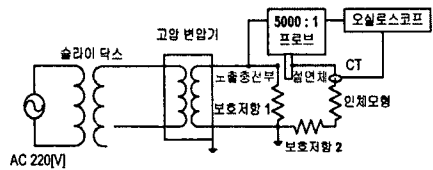


그림 5. 간접적인 감전사고의 개략도
Fig. 5. Schematic of indirect electric shock accidents

그림 4는 인체의 일부가 충전부에 접촉하여 발생하는 감전사고의 개략도이다. 여기서 22,900[V] 대신 220[V]가 인가전압으로 사용되었는데 그 이유는 마약 22,900[V]의 전압이 인체모형에 직접 인가되면 인체모형의 저항이 견딜 수 없을 정도의 과도한 전력이 발생되기 때문이다. 따라서 220[V]의 전압을 사용하는 것은 안전한 실험을 위해서 불가피하지만 인체모형이 순수저항으로 구성되어 있으므로 220[V] 인가전압의 결과로부터 22,900[V] 전압의 감전결과를 추정할 수 있다. 인체모형에 인가된 전압과 흐르는 전류는 오실로스코프(LeCroy LT342)와 CT(current monitor 4100)를 이용하여 측정하였다.

그림 5는 간접적인 감전사고 실험의 개략도이다. 이것은 인체모형은 직접 충전부에 접촉되지 않지만 공기의 절연파괴를 통한 감전사고를 모의한다. 고압 변압기의 출력이 약 22,900[V]가 되도록 슬라이더를 조정하고 출력단의 부하(보호저항 1) 근처에 위치한 인체모형에 흐르는 전류를 측정하였다. 여기서

인체모형을 이용한 고전압(22.9[kV]) 감전사고 모의 실험

보호저항 2는 안전한 실험을 위해서 불가피하게 사용되는데 만약 이 저항이 없으면 인체모형에 과도한 전류가 흘러서 인체모형을 구성하는 저항이 순간적으로 파괴될 가능성이 매우 높다. 사용된 보호저항 1과 2의 저항치는 각각 20과 100[k Ω]이다.

3.3 직접적인 감전사고 실험 결과

직접적인 감전사고는 누전되는 경우와 누전되지 않는 경우에 대하여 실험을 하였는데 누전되는 경우는 일반 22,900[V] 배전선로에서 단락이나 지락이 발생하면 보호계전기가 동작하여 차단되어야 하지만, 계전기가 동작하지 않고 장시간 누전되는 경우에 접촉 및 보폭 전압에 의한 감전사고가 발생하는 경우를 모의한 것이다. 누전되지 않는 경우는 충전부에 인체가 직접 접촉할 때 접촉전압에 의하여 발생하는 감전사고를 모의한 것이다.

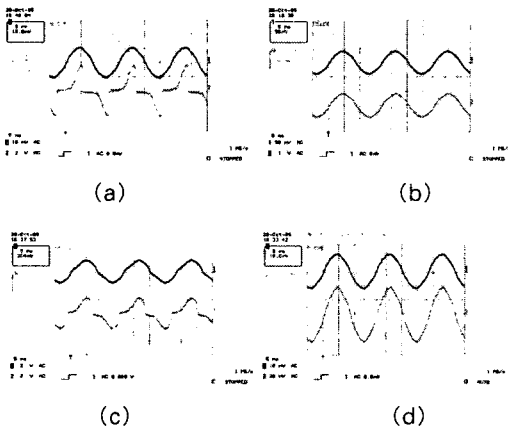


그림 6. 직접적인 감전사고의 실험 데이터
Fig. 6. Experimental data of direct electric shock accidents

그림 6의 (a), (b)는 누전되는 대지에 인체모형이 1[m]의 보폭으로 서 있을 때 나타낸 실험결과이다. 여기서 (a)는 충전부에 손이 접촉한 경우, (b)는 충전부와 인체모형의 직접적인 접촉은 없고 단지 보폭전압에 의한 결과를 나타낸다. 그림 6의 (c), (d)는 누전되지 않는 상황에서 인체의 일부가 충전부에 접촉되는 경우 손에서 손 (c), 손에서 다리 (d)로 감전 경로가 형성될 때의

실험결과를 나타낸다. 그림 6의 Ch 1은 왼쪽 흉부를 흐르는 전류 (a, c, d) 및 다리를 통해 인체에 유입되는 전류 (b)이고 Ch 2는 접지로 흐르는 전류이다.

앞에서 언급한 바와 같이 인가전압은 220[V]이므로 그림 6의 결과에 22,900/220의 비율을 곱하면 22,900[V]일 때 인체모형에 흐르는 전류를 계산할 수 있다. 표 2는 이 계산 결과를 나타낸다. 심실세동전류가 50[mA][7]정도인 점을 고려하면 흉부와 다리에 흐르는 전류(Ch 1의 모든 전류)의 크기는 인체에 치명적인 영향을 줄 수 있을 정도로 크다는 것을 볼 수 있다.

표 2. 22,900[V] 전압에 대하여 계산된 인체모형에 흐르는 전류

Table 2. Currents flowing through the human body model, calculated for a voltage of 22,900[V]

	a[A]	b[A]	c[A]	d[A]
Ch 1	16	1.3	1.2	4
Ch 2	23	4.1	18	9

3.4 간접적인 감전사고 실험 결과

220[V] 전압과 달리 22,900[V]의 고전압에서는 인체가 충전부에 직접 접촉하지 않더라도 충전부와 인체 사이의 절연체의 절연파괴를 통한 감전사고가 발생할 수 있다. 이것을 실증하기 위하여 그림 5와 같은 실험을 수행하였는데 여기서 이용한 절연체는 공기, 종이, 비닐, 부직포, 그리고 나무 등이다. 그림 7은 실험에서 측정된 인가전압(Ch. 1)과 인체모형에 흐르는 전류(Ch. 2)의 전형적인 데이터를 나타낸다.

그림 7의 전압 및 전류의 최대치를 표 3에 나열하였는데 여기서 전압 I, 전압 II 그리고 전류 I은 각각 부하(그림 5의 보호저항 1)에 인가된 전압, 절연파괴 후 인체모형에 인가된 전압 그리고 인체모형에 흐르는 전류를 의미한다. 그림 7과 표 3의 (a), (c), (d), (e)는 절연파괴 후 인체모형에 전류가 흐르는 경우이고 (b)와 (f)는 절연체의 절연이 유지되어 감전사고가 일어나지 않는 경우이다. 전자와 후자의 차이는 공극의 길이가 다르다는 점인데(공극은 각각 10과 11[mm]) 이것은 공기의 절연파괴를 통한 감전은 공극의 길이에 민감하다는 것을 나타낸다.

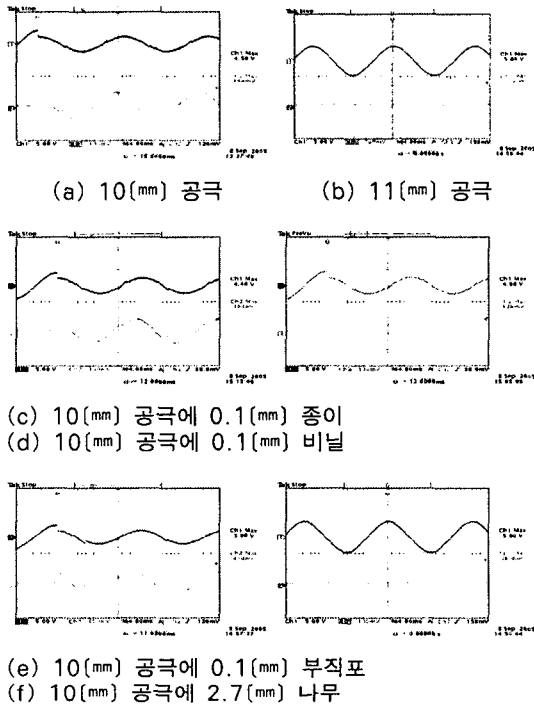


그림 7. 간접적인 감전사고 실험에서 취득한 전압 및 전류 파형
 Fig. 7. Voltage and current waveforms obtained in the experiments of indirect electric shock accidents

표 3. 간접적인 감전사고 실험의 전압 및 전류 데이터
 Table 3. Voltage and current data of the experiments of indirect electric shock accidents

	측 정 치			계산치
	전압 I [kV]	전압 II [kV]	전류 I [mA]	
a	22.5	10	80	3.75
b	25	•	•	•
c	22	10	80	3.65
d	23	11	80	3.83
e	19.5	9	70	3.25
f	25	•	•	•

그림에서 볼 수 있듯이 공극의 절연파괴 전후의 전압, 즉 전압 I과 전압 II는 다르다. 이것은 절연이 파괴될 때 발생하는 아크가 전원에 미치는 영향 때문이라고 추정된다. 전류 I은 보호저항 2를 사용하여 측정된 전류이므로 실제 감전 상황에서 인체모형에 흐르는 전류를 알기 위해서는 보호저항 2가 없는 경우에 흐르는 전류를 계산하여야 한다. 이것은 전압 II와 전류 I로부터 쉽게 계산될 수 있는데 그 결과는 표 3에 전류 II로 나타나 있다. 전류 II는 인가전압에 따라 3.25~3.83[A] 범위의 값을 갖는데 이것은 인체에 치명적인 결과를 초래할 정도의 큰 전류이다.

4. 결 론

22,900[V] 전압에 의한 감전사고의 위험성을 실증하기 위하여 인체모형을 이용하여 모의감전실험을 하였다. 인체모형은 국제적인 규정을 참고하여 저항으로 제작하였고 실험은 직접적인 감전과 간접적인 감전의 두 형태에 대하여 수행되었다.

직접적인 모의감전실험의 결과를 살펴보면 누전의 유무에 관계없이 인체모형에는 인체에 치명적인 영향을 줄 정도의 전류가 흐른다는 것을 확인하였고 특히 누전의 경우 보폭전압 만에 의하여 인체가 감전될 수 있고 감전전류 또한 매우 위험하다는 것을 알 수 있었다.

간접적인 감전사고에 대한 모의실험 결과, 삽입된 절연체의 종류와 관계없이 절연파괴는 공극의 길이에 매우 민감하다는 것을 볼 수 있었고 일단 절연파괴 후 감전사고가 발생하면 인체모형에 흐르는 전류는 직접적인 감전실험과 유사하게 많은 전류가 흘렀다. 이것은 22,900[V] 전압의 크기와 인체저항을 고려하면 당연한 결과라고 생각할 수 있다.

감전의 형태와 관계없이 22,900[V] 전압의 감전사고가 발생하면 인체에 사망과 같은 치명적인 결과를 초래할 수 있다는 점을 실증하였다. 그러므로 감전사고를 미연에 방지하는 것이 매우 중요한데 무엇보다도 이것에 대한 경각심이 필요하다. 특히 전기 기술자 혹은 작업자가 간접적인 감전사고가 발생할 수 있는 환경에 노출된 경우 특별한 관심이 요구된다. 비록 본 논문의 실험에서는 10[mm] 공극에서 감전

인체모형을 이용한 고전압(22.9[kV]) 감전사고 모의 실험

이 발생하였으나 전극의 재질 및 모양에 따라 공기 절연이 파괴되는 길이가 길어질 수 있다. 따라서 노출된 충전부에 인체가 불가피하게 접근할 필요가 있을 때 감전사고의 가능성에 대한 세심한 주의가 필요하다.

본 연구는 2004년도 산업자원부 전력산업연구개발사업 전력기술기초연구(05-R-2004-B-207)에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

References

- [1] 전기안전공사 “감전사고 발생 총괄” 1995~2002.
- [2] 이두현 외 5인 “전기안전공학”1995, 동아, p19~21.
- [3] 최충석 외 5인, “전기화재공학”, 동화기술, pp.73~115, 2001.
- [4] IEEE Std. 80, IEEE ‘Guide for Safety in AC Substation Grounding’, 1986.
- [5] CE IEC 60479 ‘Body Fluid Determinations using Multiple Impedance Measurements’, IEEE, 1989.

- [6] 한국전기안전공사 “지질별접지시공의최적화방안연구” 1998, pp63.
- [7] 최민주, 이경성, “의공학”, 청구문화사, pp.386, 2003.

◇ 저자소개 ◇

노영수 (盧永秀)

1961년 4월 1일생. 1984년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1986년 서울대학교 전기공학과 졸업(석사). 미국, University of California, Davis 졸업(박사). 현재 숭실대학교 전기제어시스템 공학부 조교수.

곽희로 (郭熙魯)

1942년 3월 1일생. 1967년 서울대 전기공학과 졸업. 1978년 호주 New South Wales 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1986년 MIT Visiting Scientist 현재 숭실대 전기제어시스템공학부 교수. 본 학회 평의원.

장태준 (張太俊)

1976년 8월 8일생. 숭실대학교 전기제어시스템공학과 졸업. 현재 숭실대학교 석사 재학중.