

저전압에서의 통전전류를 이용한 인체의 동저항 예측

강동균 · 김두현 · 김상철* · 김성철

충북대학교 안전공학과 · *세명대학교 안전공학과

1. 서론

전력산업의 초기부터 전력설비들의 내부와 주변에서 사람의 안전은 주요 관심사가 되어왔다. 사람의 안전에 영향을 미치는 메커니즘은 전력설비의 고장동안 접지된 구조물 주위에서 대지전위의 상승과 사람이 접지된 구조물과 접촉 가능성으로 인해 전압이 사람에게 인가된다. 우연한 접촉의 결과로 인체를 통과하여 흐르는 50 또는 60Hz 전류는 안전을 확보하기 위해 그 크기와 통전시간이 심실세동을 일으키는 수치 미만이어야 한다¹⁾.

사람이 안전하게 견딜 수 있는 쇼크전류의 한계수준에 대한 새로운 데이터가 구해지고, 인체의 임피던스에 대한 보다 정확한 정보가 쇼크조건에 대해 특히, 상이한 통전 경로에 대해 발달되어 왔다. 인체전류의 크기, 통전시간, 인체전류의 경로에 대해 안전을 보장하는 인체전류의 한계와 관련된 전격방정식이 제안되어 왔다. 비정현파와 높은 주파수를 갖는 쇼크전류의 안전한계와 고압선으로부터의 전기화상과 쇼크를 줄이기 위한 정보를 제공하고 있다²⁾.

저주파수에서 인체의 임피던스는 필연적으로 저항성분인 반면, 고주파수에서 인체의 임피던스는 비선형이고 저항과 정전용량을 포함하는 회로의 특성을 갖는다. 건조한 피부는 $100,000 \sim 300,000 \Omega/cm^2$ 의 저항값을 갖지만 피부가 젖었을 때 그 저항은 위의 값의 단지 1%만을 갖게 된다. 500Ω 이라는 값은 일반적으로 인체에 대해 손발 사이의 최소 저항값으로 사용되고, 이 값은 산업사고에서 쇼크전류를 추정하는데 자주 사용된다^{3,4)}. 인체의 저항을 500Ω 으로 가정하고, 오옴의 법칙을 적용하여 접촉지점(통전경로)들 사이(흉부)를 전류가 통과할 경우, 120V에 인가된 사람은 인체전류가 240mA가 될 것이다. 인체저항은 일정하지 않고 시간과 전압의 함수라는 연구결과를 보여준다⁵⁾.

2. 전격 방정식

2.1 안전전류와 안전전압

Dalziel의 연구를 기초로 모집단의 99.5 %에 대해 0.03~3초의 통전시간 동안 심실

세동을 일으키지 않는 최대전류 $I = K/\sqrt{t_s}$ 로 표현되는데, 여기서 I 는 안전전류(A)이고 K 는 몸무게에 의존하는 상수이다. 또한 t_s 는 통전시간(초)이다. 전압은 전류보다 분석하기가 편리해서 전압의 크기와 통전시간의 관계는 $E = K'/\sqrt{t_s}$ 로 표현하는데, 여기서 E 는 안전전압이고 K' 는 몸무게에 의존하는 상수이다. 안전전압은 인체저항이 1000 Ω 이라는 가정을 기초로 유도되고 주파수가 50~60Hz인 전압과 0.03~3초의 통전시간에 대해 유효하다. K 와 K' 의 유도과정은 모집단의 99.5%에 대한 최대 비세동전류, 즉 체중과 3초의 통전시간에 대한 안전전류는 70, 50, 12.5 (kg)에 대해 0.091, 0.067, 0.022(A)이다⁸⁾. t_s 를 3초로 하여 안전전류식을 사용하면 다양한 체중에 대해 K 성분을 얻을 수 있고, 인체저항을 1000 Ω 으로 계산하여 K' 성분이 구해진다. 위의 주어진 조건에 대해 K 와 K' 성분은 0.157, 0.116, 0.0381과 157, 116, 38.1이다. 위에서 언급된 일부 체중범위에 대한 지속적인(continuous) 안전전류와 3초에 대한 안전전류는 74, 50, 5와 91, 67, 22 (mA)로 보고된 바가 있다⁶⁾.

2.2 허용접촉전압과 허용보폭전압

IEEE Std 80에서 제시하는 허용접촉전압과 허용보폭전압은 간단한 전기쇼크 모델에 기초를 두고 있다. 예를 들면, 50 kg인 사람에 대한 허용접촉전압 $V_{T,perm}$ 과 허용보폭전압 $V_{S,perm}$ 은 다음과 같다.

$$V_{T,perm} = \frac{0.116}{\sqrt{t}} (1.5c_s\rho_s + 1000) \quad (1)$$

$$V_{S,perm} = \frac{0.116}{\sqrt{t}} (6.0c_s\rho_s + 1000) \quad (2)$$

허용인체전류 ($0.116/\sqrt{t}$)는 통계데이터로부터 선택되고, 0.5%의 심실세동확률을 나타낸다. t 는 통전시간이고, c_s 는 표면층 저항률의 공칭값을 줄이기 위한 감소계수이다. 또한 1000이란 숫자는 인체저항(Ω)의 값을 나타낸다. 위의 식은 인체의 발을 대지의 표면을 접촉하는 원형판으로 모델화하여 대지와 멀리 떨어진 판의 저항은 대략 $R = \rho/(4b)$ 로 나타내고, 여기서 ρ 는 대지저항률이고, b 는 판의 반경이다. 대지와 접촉하는 발의 면적이 중요한 변수가 되므로 $b = \sqrt{A/\pi}$ 와 같이 표현되며, 여기서 A 는 대지와 접촉하는 발의 면적이다. 성인 발의 면적 A 는 약 200cm²이다. 이 값을 사용하면 반경 b 는 0.08m이고, 대지와 접촉하는 한쪽 발의 저항 R 은 $\rho/(4 \times 0.08) \approx 3\rho\Omega$ 으로 계산된다. 여기서 ρ 는 Ωm 단위로 표현된다. 또한 두 발 사이의 상호저항의 영향은 무시한다고 가정하고, 등가저항은 간단히 두 발과 대지저항의 병렬조합으로 $r_{eq} = (3\rho \times 3\rho)/(3\rho + 3\rho) = 1.5\rho$ 와 같이 계산되고, 등가저항 r_{eq} 는 접지시스템의 저항을 고려해야 하지만 실제

의 접지시스템저항은 저항 1.5ρ 와 비교하여 일반적으로 작아서 생략된다.

IEC 479-1에서의 제시하는 허용접촉전압, V_T^a 와 허용보폭전압, V_S^a 는

$$V_T^a = i_{b,perm}(t) [R_b^T(i_{b,perm}(t)) + r_{eq,T}] \quad (3)$$

$$V_S^a = i_{b,perm}(t) [R_b^S(i_{b,perm}(t)) + r_{eq,S}] \quad (4)$$

여기서 $R_b^T(i_{b,perm}(t))$ 와 $R_b^S(i_{b,perm}(t))$ 는 접촉전압(손과 두 발)과 보폭전압(발과 발)의 특정 통전경로에 대한 인체저항이다. $i_{b,perm}(t)$ 는 전격시간에 대한 허용인체전류이다. $r_{eq,T}$ 는 접촉전압에 대한 발과 대지의 저항으로 병렬이고, $r_{eq,S}$ 는 보폭전압에 대한 발과 대지의 저항으로 직렬이다.

3. 실험방법

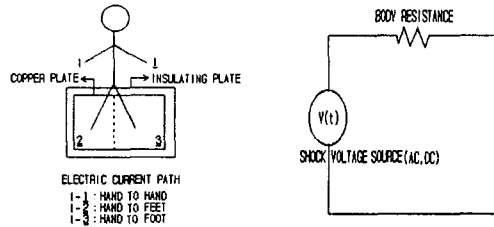


Fig.1 Experimental setup and equivalent circuit for electric shock model

저전압 수준에서의 통전전류를 이용해 인체의 동저항을 구하기 위한 전류경로와 그것에 대한 전기적 등가회로가 그림1이다. 피실험자는 성인 남자 10명으로 하고 실험에 사용된 접촉전극은 길이가 10cm이고 직경이 10, 20, 30, 40mm인 동(99.9%)으로 제작한 원통형 전극과 1mm의 두께를 갖는 500~5000mm² 중 500mm² 간격의 면적을 갖는 동판으로 제작된 사각형 평판전극을 사용하였다. 인체에 전격을 인가하기 위해 직류·교류전압이 모두 사용되었다. 피실험자의 안전을 위해 직류전압은 3, 6, 9, 12, 15V를 인가하고, 교류전압은 3, 6, 9V를 인가하였다. 인가전압은 예비실험을 통해 통전전류가 본 실험에서 정한 안전허용전류(4mA) 미만⁴⁾이 되도록 설계하였다. 전격의 영향에 중요한 요소인 통전시간은 피실험자의 안전을 위해 3초를 초과하지 않는 범위 내에서 통전전류의 최대값을 기록하였고, 통전경로는 오른손-왼손, 오른손-양발, 오른손-왼발을 전류경로로 선택하였다. 특히, 발이 전류경로에 포함되는 경우 절연판 위에 구리판을 올려 놓고 전선을 연결하여 회로를 구성하였다.

4. 결과 및 고찰

손과 손, 손과 양발과 손과 발을 통전경로로 선택하고 통전시간을 3초로 정하여 다양한 전극 즉, 원통형과 사각형 전극을 이용하여 저전압을 인가했을 때의 인체전류의 평균값을 그림2~그림13에서 보여준다. 또한 그림14~그림19는 설계된 쇼크조건에서 계산된 인체저항의 평균값을 접촉전압에 대하여 나타내었다

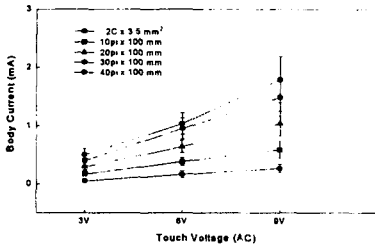


Fig.2 Body current as a function of touch voltage for cylindrical electrodes, hand to hand

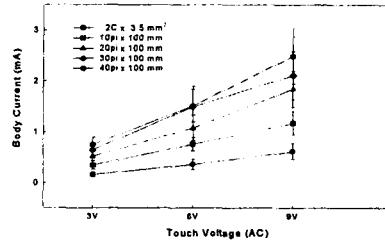


Fig.3 Body current as a function of touch voltage for cylindrical electrodes, hand to feet

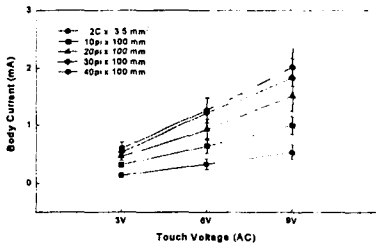


Fig.4 Body current as a function of touch voltage for cylindrical electrodes, hand to foot

그림2~그림7은 교류전압을 인가하였을 때의 인체전류의 크기로 그림2와 그림5는 손과 손의 전류경로에 대한 인체전류의 크기이고, 그림3, 그림6 그리고 그림4, 그림7은 손과 양발에 대한 전류경로과 손과 발의 전류경로에 대한 인체전류의 평균값을 각각 나타낸다.

그림8~그림13은 직류전압을 인가하였을 때의 인체전류의 크기로 그림8과 그림11은 손과 손의 전류경로에 대한 인체전류의 크기이고, 그림9, 그림12 그리고 그림10, 그림13은 손과 양발에 대한 전류경로와 손과 발의 전류경로에 대한 인체전류의 평균값을 각각 나타낸다.

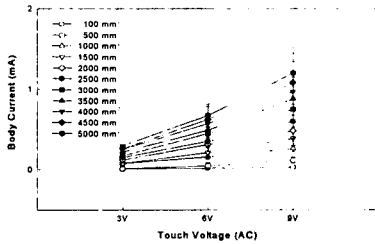


Fig.5 Body current as a function of touch voltage for rectangular electrodes, hand to hand

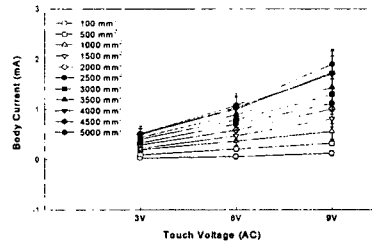


Fig.6 Body current as a function of touch voltage for rectangular electrodes hand to feet

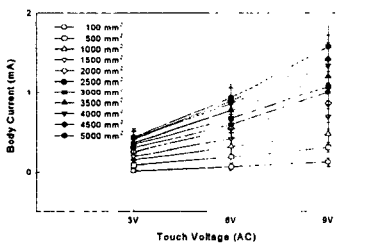


Fig.7 Body current as a function of touch voltage for rectangular electrodes, hand to foot

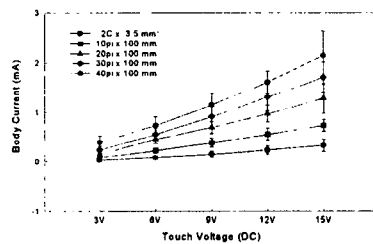


Fig.8 Body current as a function of touch voltage for cylindrical electrodes, hand to hand

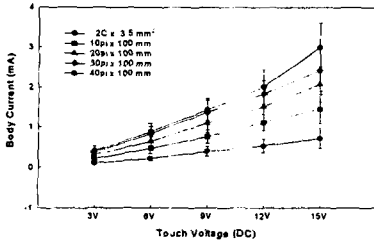


Fig.9 Body current as a function of touch voltage for cylindrical electrodes, hand to feet

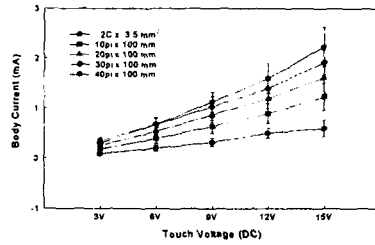


Fig.10 Body current as a function of touch voltage for cylindrical electrodes, hand to foot

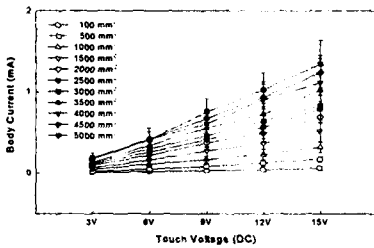


Fig.11 Body current as a function of touch voltage for rectangular electrodes, hand to hand

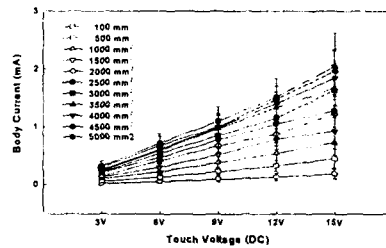


Fig.12 Body current as a function of touch voltage for rectangular electrodes, hand to feet

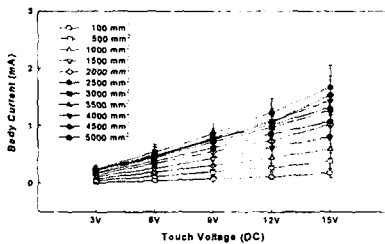


Fig.13 Body current as a function of touch voltage for rectangular electrodes, hand to foot

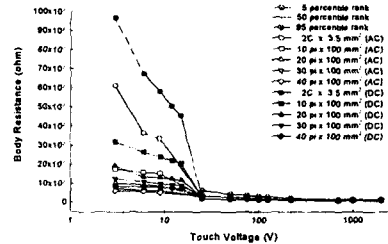


Fig.14 Touch voltage vs calculated body resistance for cylindrical electrodes (hand to hand)

그림14와 그림15는 손과 손이 전류경로인 경우로 원통형, 사각형 전극을 접촉전극으로 사용했을 때의 인체저항의 평균값을 각각 나타낸다. 또한 그림16, 그림17 그리고 그림18, 그림19는 손과 양발, 손과 발이 전류경로인 경우로 원통형과 사각형 접촉전극을 사용했을 때의 인체저항의 평균값을 각각 나타낸다. IEC 479-1 (1984)에서 제시하는 모집단의 5%, 50%, 95%를 초과하지 않는 전체 인체임피던스에 대한 값을 본 실험에서 계산된 인체저항의 평균값과 관련시켜 볼 수 있도록 각각의 그림에 제시하였다.

그림에서 보듯이 계산된 인체의 동저항은 접촉전압이 점차로 증가함에 따라 일정한 값으로 수렴함을 알 수 있다.

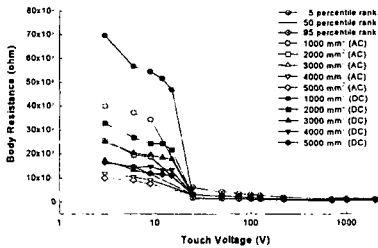


Fig.15 Touch voltage vs calculated body resistance for rectangular electrodes (hand to hand)

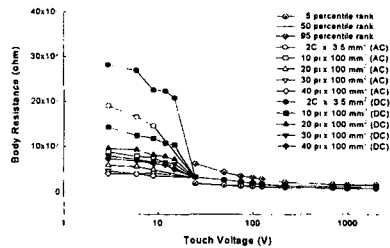


Fig.16 Touch voltage vs calculated body resistance for cylindrical electrodes (hand to feet)

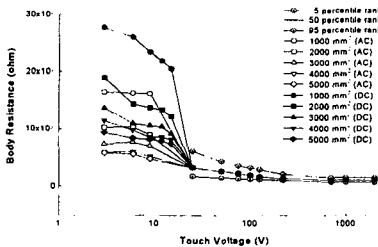


Fig.17 Touch voltage vs calculated body resistance for rectangular electrodes (hand to feet)

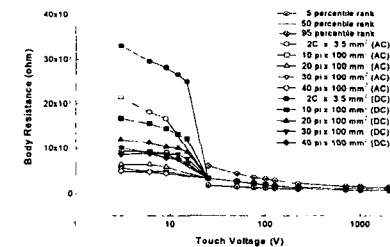


Fig.18 Touch voltage vs calculated body resistance for cylindrical electrodes (hand to foot)

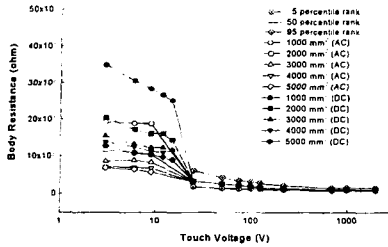


Fig.19 Touch voltage vs calculated body resistance for rectangular electrodes (hand to foot)

5. 결론

통전경로를 달리하고 접촉전극의 모양과 크기를 다르게 하여 접촉전압의 크기에 따라 인체전류를 측정하였고, 오옴의 법칙을 사용하여 인체저항의 평균값을 구하였다.

쇼크조건을 달리하였을 때 인체의 동저항은 다음과 같은 특성을 갖는다.

1. 접촉전압의 크기가 커질수록 인체전류의 크기가 증가하였고 인체의 동저항은 인체전류와 반대의 특성을 보였다.
2. 통전경로에 따른 인체저항의 특성은 손과 손, 손과 발의 인체전류가 손과 양발의 인체전류에 비해 작게 측정되었고 인체의 동저항의 크기는 손과 양발의 통전경로에서 보다 작게 계산되었다.
3. 전극의 형태를 다르게 하여 실험한 결과 접촉면적이 클수록 인체전류의 값이 크게 측정되었고, 따라서 인체의 동저항의 크기는 작게 계산되었다.

참고문헌

- 1) C. H. Lee and A. P. Sakis Meliopoulos, "Comparison of Touch and Step Voltages Between IEEE Std 80 and IEC 479-1", Generation, Transmission and Distribution, IEE Pceedings, Vol.146, No. 6, pp.593-601, Nov. 1999.
- 2) J. E. Bridges "New Developments in Electrical Shock Safety", IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 22-25, 1994.
- 3) C. F. Dalziel, "Electric shock hazard", IEEE Spectrum, pp.41-50, February

1972.

- 4) Z. W. Zipse, "Electrical Shock Hazard Due to Stray Current", Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference, 1991.
- 5) T. Bernstein, "Electrical Shock Hazards and Safety Standards" IEEE Trans. on Education, Vol. 34, No. 3, August., 1991.
- 6) L. Yu and R. T. Beck, "Safety Design Considerations for Alternation-Current Low-Voltage Distribution Systems", Industry Applications Society Annual Meeting, Vol. 2, pp.1761-1766, 1990.
- 7) J. E. Bridges, "Impact of Recent Developments in Biological Electrical Shock Safety Criteria", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No. 1, January 1987
- 8) ANSI/IEEE Std 80-1986, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, 1986.
- 9) ANSI/IEEE Std 1048-1990, IEEE Guide for Protective Grounding of Power Lines, 1990.