

# 저전압에서의 통전전류를 이용한 인체의 동저항 측정 및 예측

김두현<sup>†</sup> · 강동규 · 김상철<sup>\*</sup>

충북대학교 안전공학과 · <sup>\*</sup>세명대학교 안전공학과  
(2001. 1. 13. 접수 / 2001. 3. 21. 채택)

## Measurement and Estimation of Dynamic Resistance of the Human Body Using Body Current at Low-Voltage Levels

Doo-Hyun Kim<sup>†</sup> · Dong-Kyu Kang · Sang-Chul Kim<sup>\*</sup>

Department of Safety Engineering, Chungbuk National University · <sup>\*</sup>Department of Safety Engineering, Semyung University

(Received January 13, 2000 / Accepted March 21, 2001)

**Abstract :** The severity of electric shock is entirely dependent on body resistance. When the human body becomes a part of electric circuit, the body resistance is given as a function of shock scenario. Factors which consist of applied voltage, shock duration, body current path and contact area, etc.. The body resistance is defined as the voltage applied to subjects divided by the body current. To secure safety of the subjects, the experiment is conducted on 10 subjects, the body current is limited to 4mA. And only three factors under many shock scenario conditions are used to determine the body resistance. The three factors are the applied voltage, the current pathway and the contact area. The object of this work is to estimate the dynamic resistance of the human body as a function of applied voltage using the body current at low-voltage levels. The data of the body current at low-voltage levels are extrapolated to high-voltage levels using two analytic functions with specified constants calculated by numerical method. Also we can provide permissible body voltage for various copper electrodes on the basis of the data determined with the dynamic resistance and the body current.

**Key Words :** body resistance, body current, current path, shock scenario factors, analytic functions

### 1. 서 론

전력산업의 초기부터 전력설비들의 내부와 주변에서 사람의 안전은 주요 관심사가 되어왔다. 사람의 안전에 영향을 미치는 매커니즘은 전력설비의 고장동안 접지된 구조물 주위에서 대지전위의 상승과 사람이 그 구조물과 접촉 가능성으로 인해 사람에게 인가되는 전압에 의한 통전전류의 크기이다. 인체가 충전된 구조물에 접촉되었을 때 안전을 확보하기 위해서는 인체에 흐르는 전류의 크기와 통전시간이 심실세동을 일으키는 값보다 작아야 한다<sup>1)</sup>.

인체의 안전은 인체에 흐르는 전류의 크기, 통전 시간 및 통전경로의 함수로 나타낼 수 있으며, 지금까지 이에 대한 다수의 연구결과가 있다. 비정현파

와 높은 주파수를 갖는 전격전류의 안전한계와 고압선으로부터의 전기화상과 쇼크를 줄이기 위한 정보를 문헌<sup>2)</sup>에서 제공하고 있다. 전격의 강도는 통전전류와 함께 인체저항에 전적으로 의존한다고 보아도 과언이 아니다. 따라서 통전전류를 제한하는 요소인 인체저항의 예측이 필요하다.

건조한 피부는 100,000~300,000Ω/cm<sup>2</sup>의 저항값을 갖지만 피부가 젖었을 때 그 저항은 위의 값의 단지 1%만을 갖게 된다. 500Ω이라는 값은 일반적으로 인체에 대해 손발 사이의 최소 저항값으로 사용되고, 이 값은 산업사고에서 전격전류를 추정하는데 자주 사용된다. 조금 큰 1500Ω은 작업자가 보통 땀이 날 수 있는 양손 사이의 인체회로를 대표하고 반응전류수준의 전류를 예측하는데 사용된다<sup>3,4)</sup>. 또한 인체저항은 일정하지 않고 시간과 전압의 함수라는 결과가 있다<sup>5)</sup>.

본 논문에서는 간단한 전격 시나리오 모델을 가

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
dhk@cbucc.chungbuk.ac.kr

정해 전격조건에서 인가전압의 함수인 인체저항과 인체전류의 함수인 인체전압을 구하여 IEC479-1에서 제시된 값과의 비교를 통하여 실험방법의 타당성과 결과에 따른 인가전압과 인체저항, 인체전류와 인체전압의 특성을 제시하는 해석적 표현식으로 나타내어 정량화하는데 그 목적이 있다.

## 2. 전격 방정식

### 2.1. 안전전류와 안전전압

Dalziel<sup>3)</sup>의 연구를 기초로 모집단의 99.5%에 대해 0.03~3초의 통전시간 동안 최대비세동전류, 즉 안전전류  $I(A)$ 는  $K/\sqrt{t_s}$ 로 표현한다. 여기서  $K$ 는 몸무게에 의존하는 상수이고,  $t_s$ 는 통전시간(초)이다. 전압의 크기와 통전시간의 관계는  $E = K'/\sqrt{t_s}$ 로 표현한다. 여기서  $E$ 는 안전전압이고,  $K'$ 는 몸무게에 의존하는 상수이다. 안전전압은 인체저항이 1000Ω이라는 가정을 기초로 유도된다.  $K$ 와  $K'$ 의 유도과정은 모집단의 99.5%에 대한 최대비세동전류, 즉 3초의 통전시간에 대한 안전전류는 70, 50, 12.5 kg인 체중에 대해 0.091, 0.067, 0.022 A이다<sup>8)</sup>. 위의 주어진 조건에 대해  $K$ 와  $K'$ 성분은 0.157, 0.116, 0.0381과 157, 116, 38.1이다. 위의 일부 체중범위에 대한 지속적인 안전전류와 3초에 대한 안전전류는 74, 50, 5 mA와 91, 67, 22 mA로 보고된 바가 있다<sup>6)</sup>.

### 2.2. 허용접촉전압과 허용보폭전압

IEEE Std 80에서 제시하는 허용접촉전압과 허용보폭전압은 간단한 전격모델에 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.  $\rho_s$ 는 부서진 암석의 저항률(Ωm)이고, 1000이란 숫자는 인체저항(Ω)의 값을 나타낸다.

IEC479-1에서 제시하는 허용접촉전압,  $V_T^a$ 와 허

용보폭전압,  $V_S^a$ 는 다음과 같다.

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

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

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

### 2.3. 인체저항과 인체전압에 대한 해석적 표현

IEC479-1의 데이터와 거의 일치하는 접촉전압에 의존하는 인체저항과 인체전류에 의존하는 인체전압에 대한 해석적 표현식을 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R_{b,model}(x) &= R_{b,model}(a_1, b_1, c_1, v_0) \\ &= a_1 + \frac{b_1}{v} + c_1 \times e^{-v/v_0} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} V_{b,model}(x) &= V_{b,model}(a_2, b_2, c_2, i_0) \\ &= a_2 + b_2 i_b + c_2 \times e^{-i_b/i_0} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $a_1, b_1, c_1, v_0$ 과  $a_2, b_2, c_2, i_0$ 는 해석함수의 상수로 실험을 통하여 얻어진 데이터를 바탕으로 통계프로그램(SAS)을 사용하여 DUD(Doesn't Used Derivative) 방법을 이용하여 비선형 회귀분석을 통하여 구해진다.

## 3. 실험방법

저전압 수준에서 통전전류를 이용해 인체의 동적

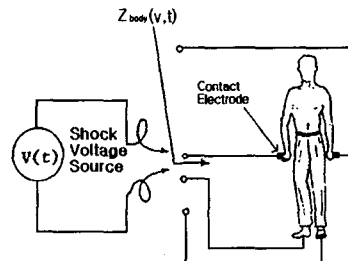


Fig. 1. Equivalent circuit of shock model<sup>7)</sup>

항을 구하기 위한 다양한 전류경로를 갖는 전격모델에 대한 등가회로가 Fig. 1이다. 피실험자는 성인 남자 10명으로 하고, 실험에 사용된 접촉전극은  $2C \times 3.5mm^2$  케이블과 길이가 10cm이고, 직경이 10, 20, 30, 40mm인 동으로 제작한 원통형 전극과 1mm의 두께를 갖는  $500 \sim 5000mm^2$  중  $500mm^2$  간격의 면적을 갖는 동판으로 제작한 사각형 평판전극을 사용하였다. 인체에 전격을 인가하기 위해 직류와 교류전압이 모두 사용되었다. 피실험자의 안전을 위해 직류전압은 3, 6, 9, 12, 15V와 교류전압은 3, 6, 9V를 인가하였다. 인가전압은 예비실험을 통해 통전전류가 본 실험에서 정한 안전허용전류( $4mA$ )<sup>4)</sup>를 초과하지 않도록 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 경우에는 절연판 위에 구리판을 올려 놓고 전선을 연결하여 회로를 구성하였다. 또한 접촉전극과 손 또는 발의 접촉저항과 경로상의 전선의 저항은 무시할 수 있을 정도로 작다고 가정하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

손과 손, 손과 양발, 손과 발을 통전경로로 하여 다양한 전극 즉, 원통형과 사각형 전극을 이용하여 저전압을 인가했을 때의 인체전류의 평균값과 편차가 Fig. 2~Fig. 13에서 보여준다. 또한 Fig. 14~Fig. 19는 설계된 전격조건에서 계산된 인체저항의 평균값을 접촉전압에 대하여 나타내었다

Fig. 2~Fig. 7은 교류전압을 인가하였을 때의 인체전류의 크기이다. Fig. 2와 Fig. 5는 손과 손의 전류경로에 대한 인체전류의 크기이고, Fig. 3, Fig. 6 그리고 Fig. 4, Fig. 7은 손과 양발, 손과 발의 전류경

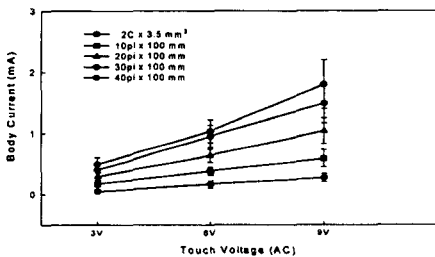


Fig. 2. Body current as a function of touch voltage for cylindrical electrodes, hand to hand

로에 대한 인체전류의 평균값을 각각 나타낸다.

Fig. 8~Fig. 13은 직류전압을 인가하였을 때의 인체전류의 크기로 Fig. 8과 Fig. 11은 손과 손의 전류 경로에 대한 인체전류의 크기이고, Fig. 9, Fig. 12

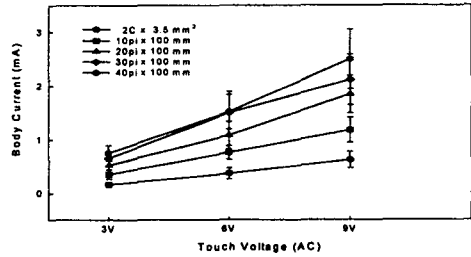


Fig. 3. Body current as a function of touch voltage for cylindrical electrodes, hand to feet

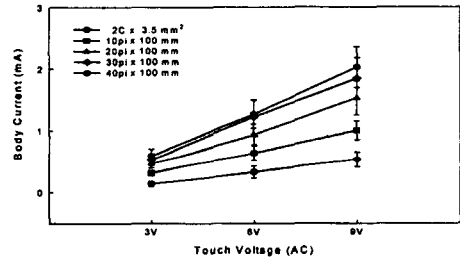


Fig. 4. Body current as a function of touch voltage for cylindrical electrodes, hand to foot

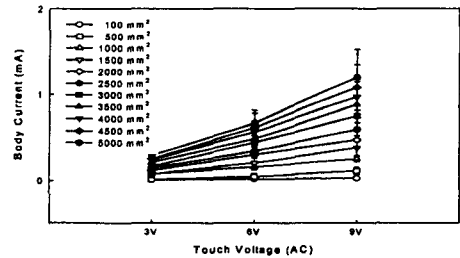


Fig. 5. Body current as a function of touch voltage for rectangular electrodes, hand to hand

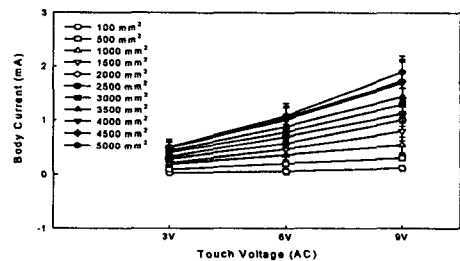


Fig. 6. Body current as a function of touch voltage for rectangular electrodes, hand to feet

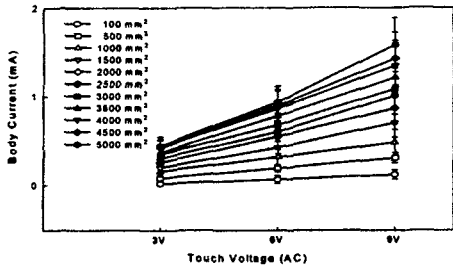


Fig. 7. Body current as a function of touch voltage for rectangular electrodes, hand to foot

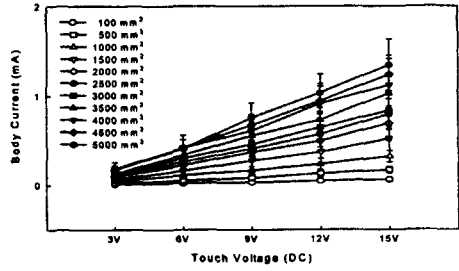


Fig. 11. Body current as a function of touch voltage for rectangular electrodes, hand to hand

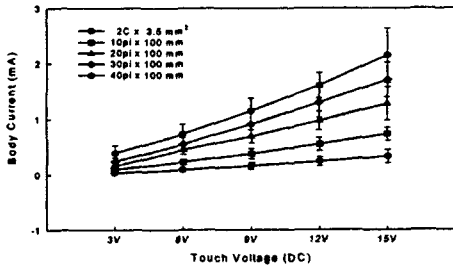


Fig. 8. Body current as a function of touch voltage for cylindrical electrodes, hand to hand

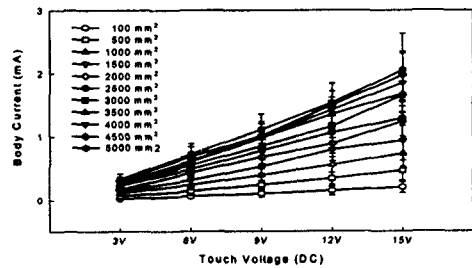


Fig. 12. Body current as a function of touch voltage for rectangular electrodes, hand to feet

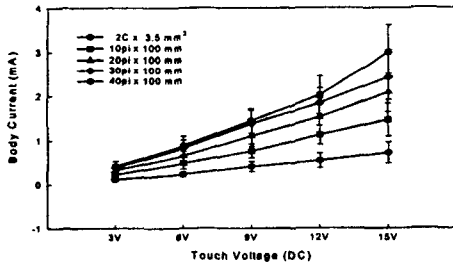


Fig. 9. Body current as a function of touch voltage for cylindrical electrodes, hand to feet

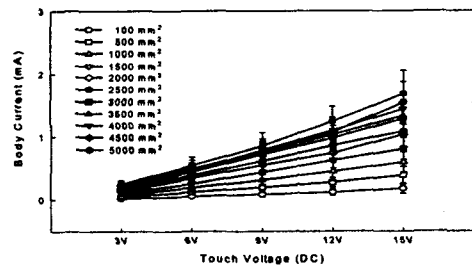


Fig. 13. Body current as a function of touch voltage for rectangular electrodes, hand to foot

그리고 Fig. 10, Fig. 13은 손과 양발에 대한 전류경로와 손과 발의 전류경로에 대한 인체전류의 평균값을 각각 나타낸다.

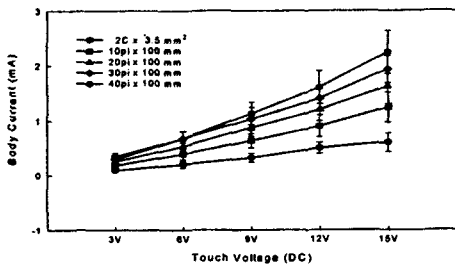


Fig. 10. Body current as a function of touch voltage for cylindrical electrodes, hand to foot

인체전류에 대한 실험 데이터를 가지고 오음의 법칙에 의하여 인체저항은 구해진다. 이렇게 구한 인체저항은 전류경로별, 접촉전극별로 접촉전압에 대해 나타낸 것이 Fig. 14~Fig. 19이다.

Fig. 14와 Fig. 15는 손과 손이 전류경로인 경우로 원통형과 사각형 전극을 접촉전극으로 사용했을 때의 인체저항의 평균값을 각각 나타낸다. 또한 Fig. 16, Fig. 17 그리고 Fig. 18, Fig. 19는 손과 양발, 손과 발이 전류경로인 경우로 원통형과 사각형 접촉전극을 사용했을 때의 인체저항의 평균값을 각각 나타낸다. IEC479-1(1984)에서 제시하는 모집단의 5%, 50%, 95%를 초과하지 않는 전체 인체임피던스에 대한 값을 본 실험에서 계산된 인체저항의 평균값과 관련

시켜 볼 수 있도록 각각의 그림에 제시하였다.

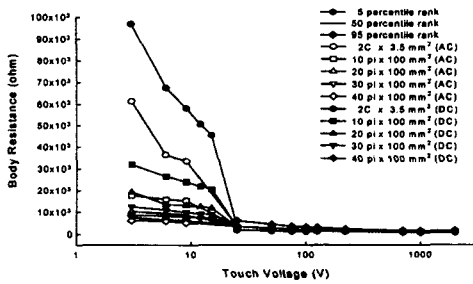


Fig. 14. Touch voltage vs calculated body resistance for cylindrical electrodes, hand to hand

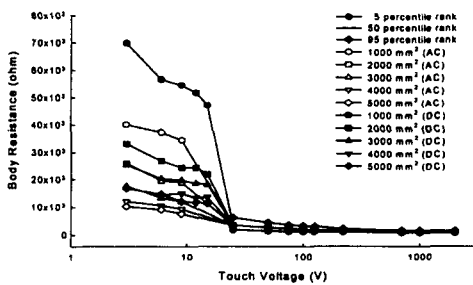


Fig. 15. Touch voltage vs calculated body resistance for rectangular electrodes, hand to hand

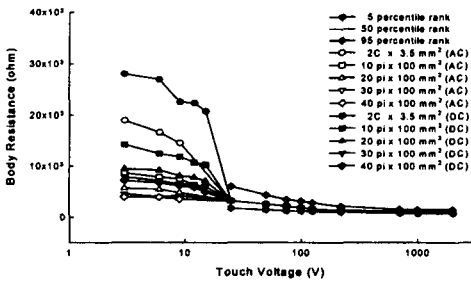


Fig. 16. Touch voltage vs calculated body resistance for cylindrical electrodes, hand to feet

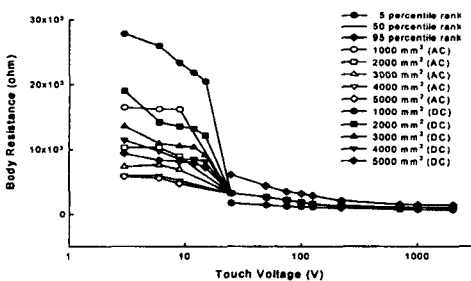


Fig. 17. Touch voltage vs calculated body resistance for rectangular electrodes hand to feet

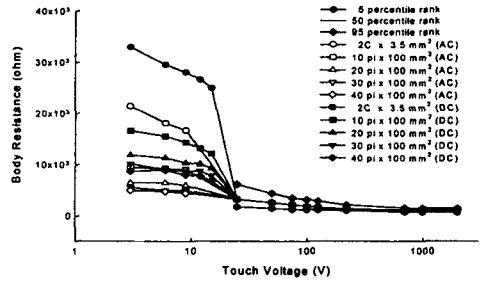


Fig. 18. Touch voltage vs calculated body resistance for cylindrical electrodes, hand to foot

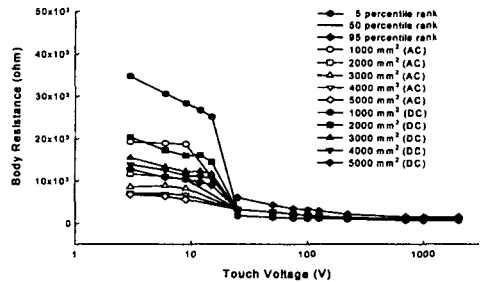


Fig. 19. Touch voltage vs calculated body resistance for rectangular electrodes, hand to foot

통전경로에 따른 인체전류의 크기는 손-양발이 가장 크고, 손-손, 손-발의 경우는 거의 비슷한 수치를 보였고, 접촉전극의 종류에 따른 인체전류의 크기는 원통형과 사각형 평판전극 모두 접촉면적이 클수록 인체전류의 크기가 크게 측정되었다. 또한 교류와 직류전압, 즉 인가전압의 종류에 대해서는 인체전류의 크기에 대한 비교보다는 전격위험성의 강도측면에서 논의할 문제이다.

Table 1. Comparison of values of proposed coefficients and values of computed coefficients for body resistance and body voltage

Coefficients	Values of proposed coefficients	Values of computed coefficients
$a_1$	668.381	695.6286
$b_1$	15344.426	13538.1276
$c_1$	515.588	5793.5108
$v_0$	311.673	27.0019
$a_2$	140.600	89.4699
$b_2$	0.600	0.6456
$c_2$	-130.100	-84.5194
$i_0$	241.100	122.3957

Table 1에서는 실험을 통해 얻은 데이터를 기초로 인체저항과 인체전압의 해석적 표현식들의 상수들을 통계프로그램을 사용해 구해 IEC479-1의 데이터를 기초로 구한 상수들과 비교할 수 있도록 함께 제시하였다.

Fig. 20과 Fig. 21은 접촉전압의 함수인 인체저항과 인체전류의 함수인 인체전압에 대해 표 1에서 제시된 상수들을 식(5)과 식(6)에 각각 대입하여 접촉전압과 인체전류에 대하여 구한 값들을 각각 나타내었고 아울러 IEC 479-1의 데이터를 기초로 구한 값들과 비교할 수 있도록 함께 제시하였다.

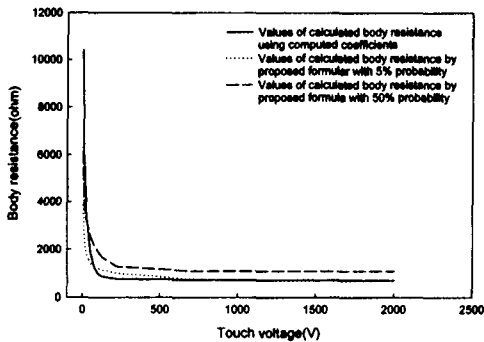


Fig. 20. Calculated values( $\phi 40 \times 100$ mm, hand to foot) vs proposed values for body resistance as a function of touch voltage

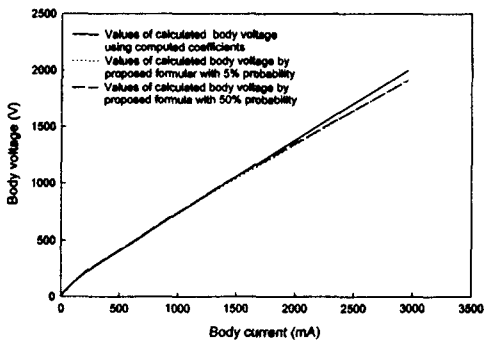


Fig. 21. Calculated values( $\phi 40 \times 100$ mm, hand to hand) vs proposed values for body voltage as a function of body current

### 5. 결론

본 연구는 저전압에서는 통전전류를 측정하고 고전압에서는 IEC479-1에서 제시하는 데이터를 이용

하여 인체저항에 대한 해석적 표현식을 바탕으로 수치해석을 한 결과 인가전압이 100V, 220V, 700V, 1000V일 때, IEC479-1에서 제시된 인체저항에 대한 모집단의 5%의 값은 각각 1200 $\Omega$ , 1000 $\Omega$ , 750 $\Omega$ , 700 $\Omega$ 으로 본 실험에서 예측된 974 $\Omega$ , 759 $\Omega$ , 714 $\Omega$ , 709 $\Omega$ 인 값과 비교할 때 100V와 220V에서는 IEC 479-1에서 제시된 값보다 보수적(conservative)인 경향을 보이고, 700V와 1000 V에서는 제시된 값과 예측된 값이 모두 약 700 $\Omega$ 으로 수렴함을 알 수 있다. 또한 인가전압이 점점 상승할수록 예측된 인체의 동저항은 위에서 언급한 인가전압의 범위에서 IEC 479-1에서 제시된 모집단의 50% 값보다 모두 보수적인 경향을 보이므로 전격의 위험성 측면에서 볼 때 본 연구에서 예측된 인체의 동저항이 적용 가능하다는 결론을 얻었다.

### 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 Proceedings, 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, Aug., 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.