

그래프법을 이용한 안전기준에 의한 감전위험성 평가

김두현[†] · 강동규

충북대학교 안전공학과

(2001. 4. 25. 접수 / 2001. 7. 12. 채택)

An Assessment of Electric Shock Hazard by Safety Criteria Using Graphical Method

Doo-Hyun Kim[†] · Dong-Kyu Kang

Department of Safety Engineering, Chungbuk National University

(Received April 25, 2001 / Accepted July 12, 2001)

Abstract : This paper presents a graphical method for hazard assessment of electric shock by safety criteria. For the human body to be safe, actual body current should not exceed safety criteria, i.e. allowable body current. The assessment method presented in this paper is based on the safety criteria of the IEEE Standard 80 as well as the IEC 479-1. The hazard can be assessed in terms of allowable touch voltages instead of allowable body current. Thus, the hazard assessment of given electric shock condition is referred to a procedure by which the actual touch voltages are compared with the allowable (safe) touch voltages. Since the IEC 479-1 safety criteria are nonlinear, the graphical method is presented for the hazard assessment. Body current and body voltage are calculated with the allowable touch voltage. A comparison of the safety criteria of two widely accepted standards, i.e. the IEEE Std 80 and the IEC 479-1 is proposed. Also Thevenin equivalent resistance is obtained from electric shock model expressed by two-port earth-grid-foot system. On the basis of calculated results, the allowable touch voltage, the body current and the body voltage we can conduct the hazard or safety assessment and estimate the severity of electric shock.

Key Word : graphical method, hazard assessment, allowable touch voltage, body current, body voltage

1. 서 론

감전사는 사람이 전기적으로 충전된 부분에 접촉함으로써 발생한다. 지금까지는 대부분의 감전사에 대하여 사고가 발생한 후에 후속조치로서 안전성 평가가 이루어졌던 것이 사실이다. 이러한 단점을 극복하고자 각국에서는 감전모델과 관련된 안전기준, 즉 허용접촉전압, 허용인체전류 등을 구하는 방법에 대해 연구해 왔다. 다양한 감전조건을 고려하여 구한 안전기준은 감전사고가 발생하기 전에 사전조치로서 위험성 평가 및 안전성을 예측하기 위해 사용 가능하기 때문에 그 필요성에 대해서는 재론의 여지가 없다.

따라서 작업장의 특성을 고려하지 않는 안전기준

은 복잡하고 위험한 작업환경이 존재하는 현장에서는 그 이용에 한계가 있다.

본 논문에서는 산업현장에서 쉽게 적용할 수 있도록 문헌^{1,2)}의 그래프법을 이용하여 감전조건을 다양하게 설정해 안전기준을 구하는 방법을 제시하고자 한다. 대표적인 안전가이드인 IEEE Std 80과 IEC 479-1에서 제시하는 안전기준 중에서 본 논문에서는 감전사고의 안전성 측면에서 발생빈도와 위험강도가 높은 허용접촉전압에 대해서만 고려한다. 연구 방법은 IEC 479-1에서 제시하는 안전기준과 거의 일치하는 해석적 표현식을 바탕으로 그래프법을 이용하여 허용접촉전압을 구해 IEEE Std 80에 의해 계산된 결과와 비교한다. 또한 그래프법은 허용접촉전압 뿐만 아니라 인체를 통과하는 전류와 인체에 인가되는 전압도 계산되므로 다양하게 응용할 수 있다. 이렇게 계산된 허용접촉전압, 인체전류와 인

[†]To whom correspondence should be addressed.
dhk@cbucc.chungbuk.ac.kr

체전압은 주어진 감전조건에서 인체에 미칠지 모르는 잠재된 위험성의 예측과 안전성 평가를 동시에 수행하는데 이용 가능하다.

2. 테브낭 등가에 의한 감전모델

인체에 전압이 인가된 상황을 나타내는 대지-접지전극-발시스템을 모델링하기 위해 Fig. 1과 같이 2단자망으로 나타낼 수 있다. 단자 1은 사람의 발과 접촉하는 지면의 한 점이고, 단자 2는 고장전류가 유입되는 접지전극과 등전위를 갖는 한 점이다.

고압계통에서 접지전극까지 고장 전류를 공급하는 송전선로 네트워크의 등가임피던스가 접지전극의 임피던스와 비교하여 매우 크기 때문에 이상전류원으로 근사시킬 수 있다. 즉 Fig. 1에서 보여주는 것처럼 단지 수동소자와 이상전류원으로만 연결된 2단자망을 구성할 수 있다.

테브낭 이론을 적용하면 Fig. 2와 같이 1개의 전압원과 1개의 저항으로 된 2단자 회로로 표현할 수 있다. 테브낭 등가회로는 주어진 접지전극의 형태, 주어진 발의 크기와 위치, 그리고 대지저항들의 특

성을 적절하게 나타낸다. 고압계통에서 이상전류원으로 근사하였으므로 Fig. 1의 Z_{system} 은 테브낭 등가 회로에 영향을 미치지 않는다. 이는 2단자망의 모든 임피던스가 대지성분으로 구성됨을 의미한다. Fig. 2에 나타낸 것처럼 Z_{eq} 는 대지저항물에 비해하고 저항성분을 의미하므로 $Z_{eq}=R_{eq}$ 가 된다. 이러한 사실은 인체전류에 대한 대지저항물의 영향을 조사하는데 이용한다.

Fig. 2에서 표현된 회로의 성분들을 구하기 위해 개방회로전압과 폐로전류를 고려한다. 개방회로에서는 접지전극에만 전류가 흐르고 원판으로 모델링한 발전극은 대지 위에 있지만 어떤 방법으로도 접지시스템과 연결되지 않는다. 그러나 폐로에서는 인체저항을 제외한 발전극이 접지전극의 일부가 되는 것처럼 접지시스템이 발전극과 연결된다. 이때 발전극으로 유입되는 폐로전류가 계산되며, 테브낭 등가 회로의 성분들은 식(1)~(3)과 같다.

$$V_{eq} = V_{open\ circuit} \tag{1}$$

$$R_{eq} = \frac{V_{eq}}{I_{short\ circuit}} \tag{2}$$

$$R_{eq} = \frac{V_{open\ circuit}}{I_{short\ circuit}} \tag{3}$$

2단자로 연결된 테브낭 등가모델로부터 인체저항 R_b 와 테브낭 등가저항 R_{eq} 를 갖는 인체전류, i_{b-true} 는 식(4)와 같이 계산된다.

$$i_{b-true} = \frac{V_{eq}}{R_{eq} + R_b} \tag{4}$$

또한 IEEE Std 80을 이용하여 인체전류, i_{b-IEEE} 를 식(5)와 같이 구할 수 있다.

$$i_{b-IEEE} = \frac{V_{eq}}{R_A} = \frac{V_{eq}}{R_f/2 + R_b} \tag{5}$$

여기서 R_A 는 전체유효저항을 나타내며, $R_f/2$ 는 두 발의 저항이다. 식(4)와 식(5)에서 $R_{eq}=R_f/2$ 의 관계가 유도되는데 이것은 대지의 구조, 접지전극의 형상과 발 위치의 영향에 대해 R_{eq} 와 R_f 의 차이를 최소화 할 수 있는 조건을 고려해야 한다는 것을 의

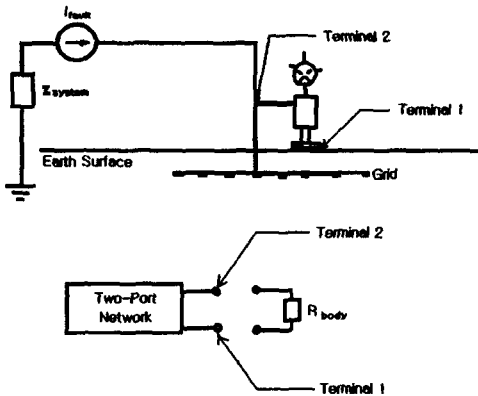


Fig. 1. Two-port representation of earth-grid-foot system

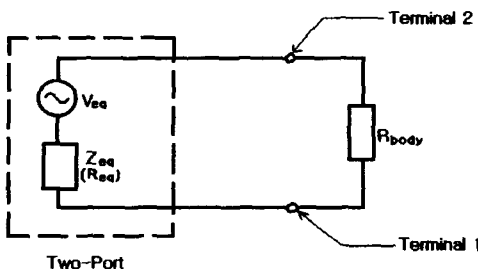


Fig. 2. Thevenin equivalent circuit of two-port

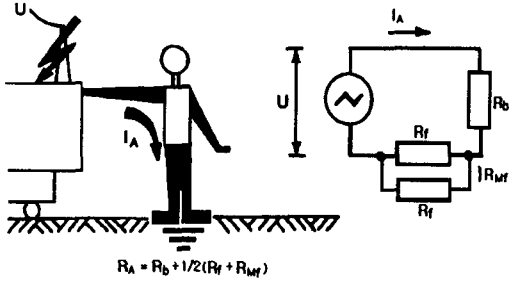


Fig. 3. Touch voltage circuit per IEEE Std 80⁽⁴⁾

미하고, 일반적인 적용에 있어서 R_{eq} 와 $R_f/2$ 는 거의 일치한다³⁾.

식(5)의 R_A 를 유도하면 다음과 같다. 위의 Fig. 3에서 R_f 는 $\rho/(4b)$ 와 R_{Mf} 는 $\rho/(2\pi d_f)$ 로 보통 표현하는데 여기서 R_f 는 먼 대지까지 한쪽 발의 자기저항 $[\Omega]$ 이고, R_{Mf} 는 발 사이의 상호저항 $[\Omega]$ 이다. 또한 사람의 발은 지면과 접촉하고 있는 한 개의 원판으로 모델링되는데 여기서 b 는 그 판의 등가반경 $[m]$ 이고, d_f 는 발 사이의 거리 $[m]$ 이며 대지저항률이 일정하다는 가정에서 유도된다. 병렬로 연결된 두 발의 저항은

$$R_{2Fp} = 1/2 (R_f + R_{Mf}) \quad (6)$$

이고, 접촉전위회로에 대한 R_A 는 식(7)과 같이 주어진다.

$$R_A = R_b + R_{2Fp} = R_b + 1/2 (R_f + R_{Mf}) \quad (7)$$

다수의 참고문헌⁴⁾에서 한쪽 발을 나타내는 원판의 반경을 $0.08[m]$ 로 선택하고, 상호저항의 항을 무시하면 식(5)의 R_A 가 유도된다. 근사적으로 두 발의 병렬저항(R_{2Fp})은 보통 1.5ρ 로 나타낸다.

$I_{fault} = 0$ 인 경우는 접지시스템으로 고장 전류가 흐르지 않으므로 개방회로와 같다. $I_{fault} = 0$ 일 때 테브낭 등가회로는 Fig. 4와 같이 표현할 수 있다. 이 시스템에서 R_{eq} 는 두 발과 접지도체 사이의 대지저항이다.

3. 감전조건에 의한 허용접촉 전압의 계산

IEEE Std 80과 그래프법(IEC 479-1)에 의해 허용

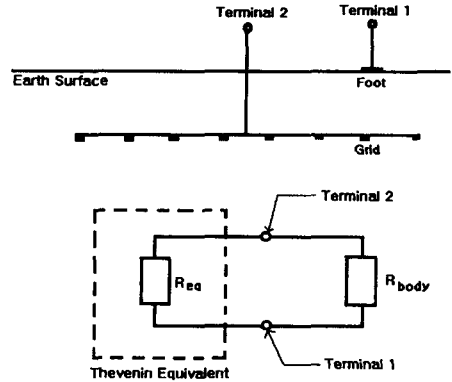


Fig. 4. Simplified system with Thevenin equivalent resistance

접촉전압을 구하기 위해 주어지는 감전조건은 다음과 같다. 변전소의 접지는 대지저항률이 $105[\Omega \cdot m]$ 인 토양에 8×8 메쉬형 접지전극으로 구성되어 있다. 또한, 대지저항률이 $2000[\Omega \cdot m]$ 인 $0.1[m]$ 두께의 자갈층이 변전소 주위를 덮고 있다. 실제의 접촉전압이 $390[V]$ 이고 최대고장시간(통전시간)은 0.4 [초]이다. 또한 감전조건을 다양하게 설정하기 위해 가변요소를 최대고장시간($0.05 \sim 0.5$ 초 : 0.05 초 간격)과 대지저항률($10, 50, 100, 200, 500, 1000, 3000$ $[\Omega \cdot m]$)로 정하고, 나머지 조건은 위에서 제시한 것과 동일하게 계산하여 허용접촉전압, 허용인체전류, 인체전압과 인체전류를 구하여 감전위험성 또는 안전성 여부를 평가한다.

3.1. IEEE Std 80에 의한 허용접촉전압

IEEE Std 80에서 제시하는 $50[kg]$ 인 사람에 대한 허용접촉전압 $V_{T,allow}$ 은 식(8)과 같다.

$$V_{T,allow} = \frac{0.116}{\sqrt{t}} (1.5c_s \rho_s + 1000) \quad (8)$$

여기서 t 는 통전시간이고, c_s 는 표면층 저항률의 공칭값을 줄이기 위한 감소계수이다. ρ_s 는 부서진 압석의 저항률 $[\Omega \cdot m]$ 이고, 1000 이란 숫자는 감전시 인체저항의 값을 나타낸다. 허용접촉전압은 다음과 같이 계산된다. h , 즉 자갈층의 두께가 $0.1[m]$ 일 때 아래의 식(9)에 의해 감소계수는

$$c_s = \frac{1}{0.96} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{\sqrt{1 + (2nh/0.08)^2}} \right] \quad (9)$$

약 0.57 이 되고, ρ_s 는 주어진 $2000[\Omega \cdot m]$ 을 식(8)에

대입하면 허용접촉전압, $V_{T,allow}$ 는 $(0.116/\sqrt{0.40})(1710 + 1000) = 497[V]$ 이다. Fig. 5는 IEEE Std 80에서 제시하는 허용접촉전압을 그래프로 나타낸 것이다.

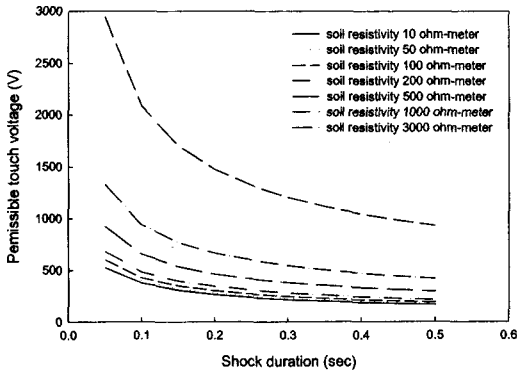


Fig. 5. Permissible touch voltages per IEEE Std 80, 1986 edition 50kg person, probability of ventricular fibrillation 0.5%

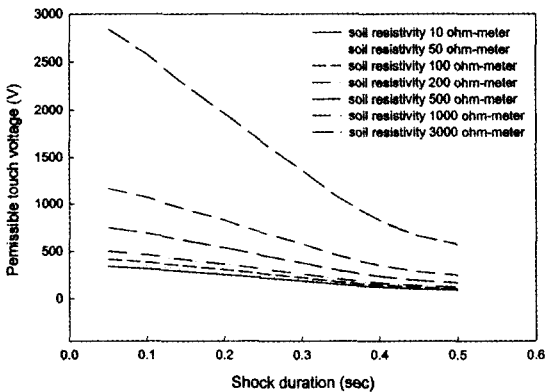


Fig. 6. Permissible touch voltages per IEC 479-1, 5% body resistance values, probability of ventricular fibrillation 0.5%, hand to two feet

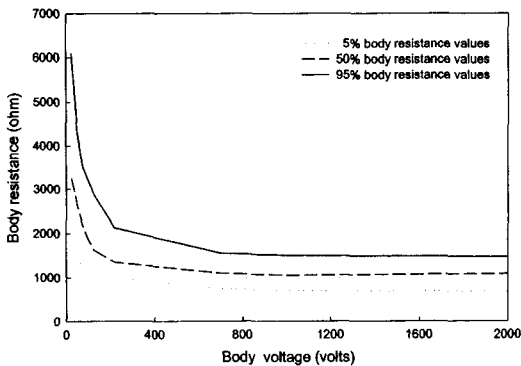


Fig. 7. Body resistance as a function of body voltage(hand to hand)

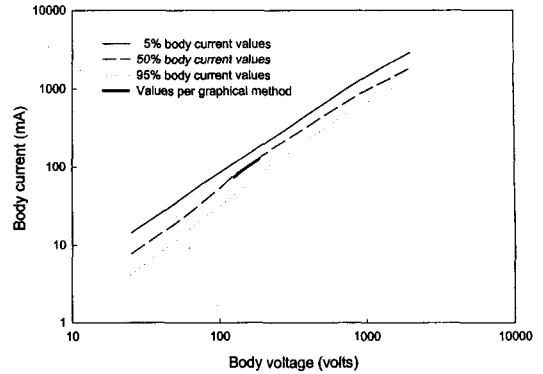


Fig. 8. Body voltage as a function of body current(Data from IEC 479-1)

3.2. 그래프법에 의한 허용접촉전압

IEC 479-1에서 제시하는 허용접촉전압, $V_{T,allow}$ 는 식(10)과 같다.

$$V_{T,allow} = i_{b,perm}(t)[R_{b,T}(i_{b,perm}(t)) + R_{eq,T}] \quad (10)$$

여기서 $R_{b,T}(i_{b,perm}(t))$ 는 접촉전압(손과 두 발)의 특정 통전경로에 대한 인체저항이다. 또한 $i_{b,perm}(t)$ 는 통전시간에 대한 허용인체전류이고 $R_{eq,T}$ 는 접촉전압에 대한 발과 대지의 저항으로 병렬이다. Fig. 6은 IEC 479-1에서 제시하는 허용접촉전압을 그래프로 나타낸 것이다.

Fig. 7과 Fig. 8은 IEC 479-1에서 제시하는 인체전압의 함수인 인체저항과 인체전류의 함수인 인체전압을 모집단의 5, 50, 95%에 대해 각각 나타낸 것이다. 또한 Fig. 9는 통전시간과 허용인체전류에 대해

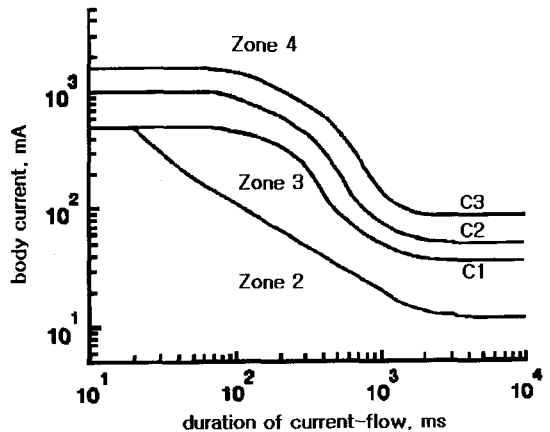


Fig. 9. Permissible body current for IEC 479-1

각 영역, 즉 Zone2, Zone3, Zone4로 위험의 강도에 따라 구분하여 제시한 그래프이다.

IEC479-1의 데이터와 거의 일치하는 접촉전압에 의존하는 인체저항과 인체전류에 의존하는 인체전압에 대한 해석적 표현식을 나타내면 식(11)~(12)과 같다.

$$R_{b,model}(x) = R_{b,model}(a_1, b_1, c_1, v_0) \quad (11)$$

$$= a_1 + \frac{b_1}{v} + c_1 \times e^{-v/v_0}$$

$$V_{b,model}(x) = V_{b,model}(a_2, b_2, c_2, i_0) \quad (12)$$

$$= a_2 + b_2 i_b + c_2 \times e^{-i_b/i_0}$$

여기서 a_1, b_1, c_1, v_0 과 a_2, b_2, c_2, i_0 는 해석함수의 상수로 모집단의 50%에 대해 1080.021, 7751.063, 2552.197, 80.182와 63.1, 1.0, -50.5, 48.1로 각각 제시하고 있다²⁾.

그래프법에 의한 허용접촉전압의 계산과정을 설명하면 다음과 같다. 첫째로 식(9)의 k 는 $(\rho - \rho_s) / (\rho + \rho_s)$ 에서 -0.9이다. 여기서 ρ 는 대지저항률이고 ρ_s 는 자갈층의 저항률로 각각 $105[\Omega \cdot m]$ 와 $2000[\Omega \cdot m]$ 로 주어진다. $R_{eq,T}$ 는 $1.5c_s \rho_s$ 에서 $1710[\Omega]$ 이다. 여기서 $R_{eq,T}$ 는 접촉저항 또는 테브낭 등가저항이다. 허용인체전류는 Fig. 9의 C1곡선에서 0.4[초]일 때 허용인체전류, $i_{b,allow}$ 는 약 $150[mA]$ 이다. 인체전압과 인체전류는 Fig. 10의 그래프를 이용하여 구한다.

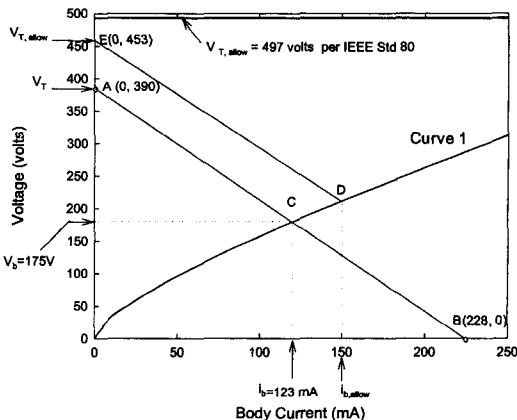


Fig. 10. Graphical method for computing the allowable body current

점 A(0, V_T)와 점 B($V_T/R_{eq}, 0$)의 좌표는 주어진 조건에 의해 각각 (0, 390V)와 (228mA, 0)이 된다. 점 A와 B를 통과하는 직선은 Curve1 위의 점 C에서 교차한다. 따라서 인체전압 (V_b)과 인체전류 (i_b)는 각각 175[V]와 123[mA]로 구해진다. $i_b(123mA)$ 가 $i_{b,allow}(150 mA)$ 보다 작으므로 감전사고의 위험성 측면에서 안전하다고 예측할 수 있다.

또한 그래프법을 이용하여 허용접촉전압을 구할 수 있다. 허용인체전류, $i_{b,allow}$ 가 $150[mA]$ 일 때 Curve1으로 전류축과 수직선을 그리면 점 D에서 Curve1과 교차한다. 점 D로부터 직선 AB와 평행한 직선 DE가 그림과 같이 그려진다. 이 직선은 점 E에서 전압축과 교차하는데 여기서 허용접촉전압, $V_{T,allow}$ 가 구해지는데 그 값은 453[V]이다. IEEE Std 80에 의한 허용접촉전압(497V)이 제시된 그래프법으로 계산된 값보다 더 크다. 이것은 보다 낮은 허용접촉전압을 제시하므로 IEC 479-1의 안전기준이 IEEE Std 80의 안전기준보다 더 보수적이라는 것을 의미한다.

4. 결과 및 고찰

최대고장시간, 즉 통전시간과 대지저항률을 감전조건에 대한 변수로 정하여 계산한 결과를 Fig. 11~Fig. 19에 나타내었다. Fig. 11은 그래프법에 의해 계산된 인체전류와 인체전압을 나타내는데, 대지저항률이 증가함에 따라 인체전류가 작게 계산되고 또한 인체전압도 감소하였다. Fig. 12~Fig. 19는 대지저항률의 조건을 10, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 3000 $[\Omega \cdot m]$ 로 주었을 때, 그래프법과 IEEE Std 80에 의해 계산한 허용접촉전압을 보수성, 즉 안전성

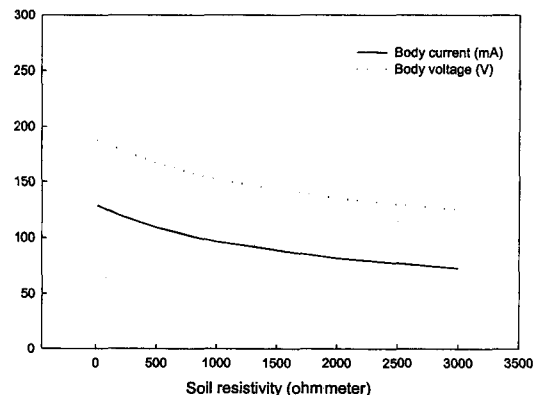


Fig. 11. Body current and Body voltage per Graphical method

측면에서 비교하여 나타낸 것이다. 대각선 좌측은 그래프법이 IEEE Std 80보다 보다 작은 허용접촉전압을 제시하고 있다. 다시 말해, 그래프법이 보수적인 안전기준임을 나타내고, 대각선 우측은 그 반대

이다.

Fig. 12~Fig. 19에 나타낸 것처럼 고장시간이 0.05~0.5[초] 사이에서 계산된 허용접촉전압은 대지 저항률이 증가함에 따라 그래프법이 작은 허용접촉전

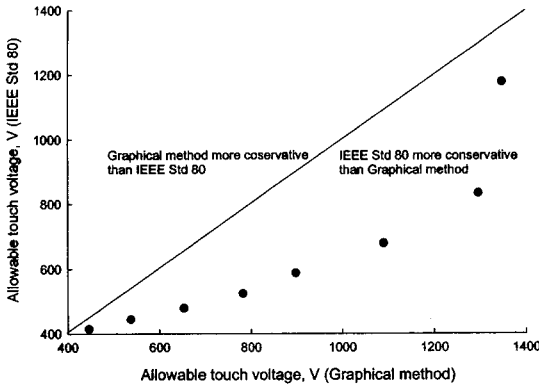


Fig. 12. Allowable touch voltages per Graphical method against IEEE Std 80, 10[Ω·m] soil resistivity

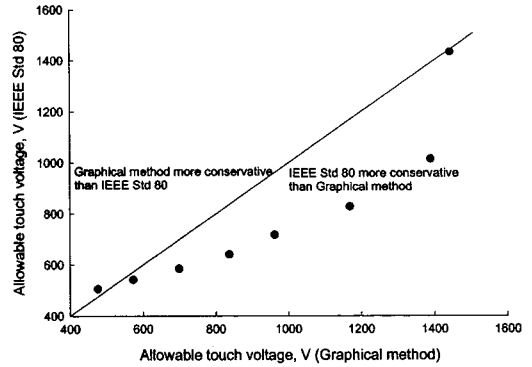


Fig. 15. Allowable touch voltages per Graphical method against IEEE Std 80, 200[Ω·m] soil resistivity

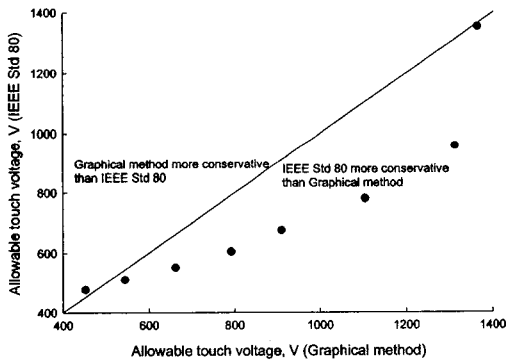


Fig. 13. Allowable touch voltages per Graphical method against IEEE Std 80, 50[Ω·m] soil resistivity

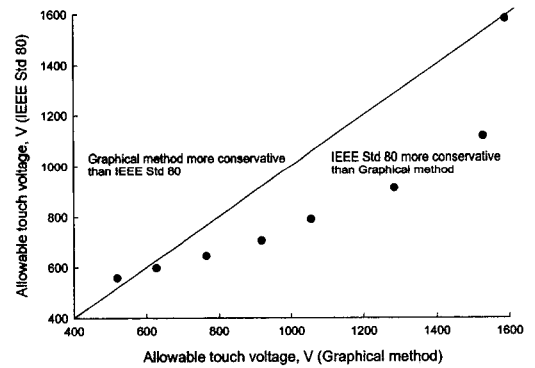


Fig. 16. Allowable touch voltages per Graphical method against IEEE Std 80, 500[Ω·m] soil resistivity

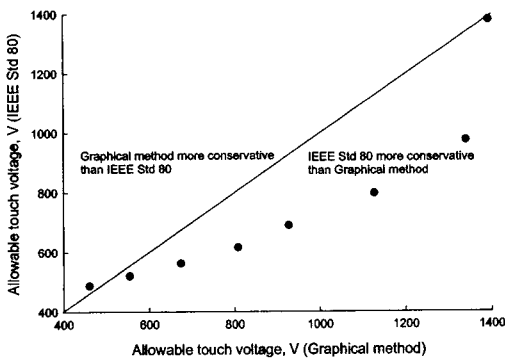


Fig. 14. Allowable touch voltages per Graphical method against IEEE Std 80, 100[Ω·m] soil resistivity

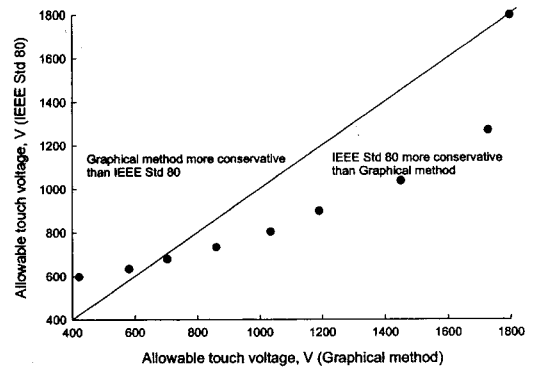


Fig. 17. Allowable touch voltages per Graphical method against IEEE Std 80, 1000[Ω·m] soil resistivity

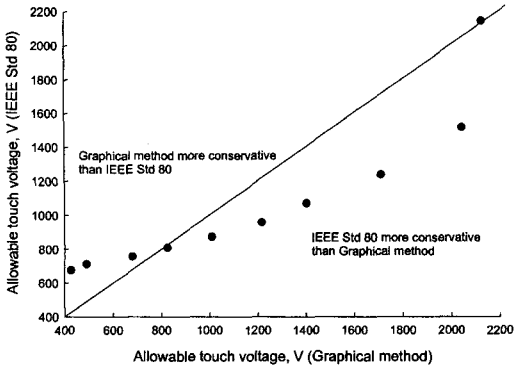


Fig. 18. Allowable touch voltages per Graphical method against IEEE Std 80, 2000 [$\Omega \cdot m$] soil resistivity

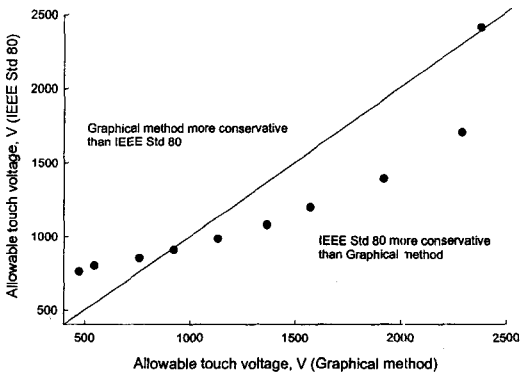


Fig. 19. Allowable touch voltages per Graphical method against IEEE Std 80, 3000 [$\Omega \cdot m$] soil resistivity

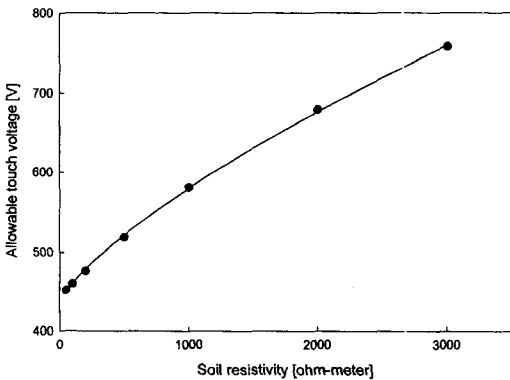


Fig. 20. Allowable touch voltages in case Graphical method more conservative than IEEE Std 80

압을 제시하는 경향이 증가하는데, 이렇게 보수적인, 즉 보다 작은 허용접촉전압을 보이기 시작하는 점들을 나타낸 것이 Fig. 20이고, 이것을 함수로 근사시키면 식(13)과 같다.

$$V_{\text{allow}}(\rho_{\text{soil}}) = \alpha + \beta \times (\rho_{\text{soil}})^{\gamma} \quad (13)$$

여기서, 근사적으로 계산된 상수값, α 는 432.9684이고, β 와 γ 는 각각 0.9475, 0.7299이다.

5. 결 론

본 논문에서는 IEEE Std 80과 그래프법(IEC 479-1)에 의해 허용접촉전압뿐만 아니라 인체전류, 인체전압 등 감전조건과 관련된 안전기준을 구하여 그 특성을 고찰하였다. 주어진 감전조건에서 대지저항률이 증가함에 따라 위험의 강도를 나타내는 기준인 인체전류와 인체전압은 모두 감소하였다. 대지저항률이 10[$\Omega \cdot m$]일 때, 최대고장시간이 0.05~0.4[초]인 경우는 IEEE Std 80에 의해 구한 허용접촉전압이 보수적이다. 또한 대지저항률이 50~3000[$\Omega \cdot m$]인 경우, 최대고장시간이 0.05~0.35[초]의 범위에서는 IEEE Std 80이 보수적이고, 0.4~[초]에서는 그래프법이 보수적인 값을 제시한다.

위의 결론은 대지저항률과 최대고장시간에 따라 두 안전기준의 선별적 적용뿐만 아니라 안전성 평가를 비롯하여 잠재된 위험성을 예측하는데 이용할 수 있다.

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) C. H. Lee, A. P. Sakis Meliopoulos and R. I. James, "A Graphical Method for Safety Assessment of Grounding Systems", Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE, Vol. 3, pp. 2016~2021, 2000.
- 3) F. P. Dawalibi, R. D. Southey and R. S. Baishiki, "Validity of Conventional Approaches for Calculating Body Current Resulting from Electric Shocks", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, April 1990.
- 4) ANSI/IEEE Std 80-1986, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, 1986.
- 5) ANSI/IEEE Std 1048-1990, IEEE Guide for Protective Grounding of Power Lines, 1990.
- 6) T. Bernstein, "Electrical Shock Hazards and Safety Standards", IEEE Trans. on Education, Vol. 34, No. 3, Aug., 1991.

- 7) C. F. Dalziel, "Electric shock hazard", IEEE Spectrum, pp. 41~50, February 1972.
- 8) 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.
- 9) J. E. Bridges, "New Developments in Electrical Shock Safety", IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 22~25, 1994.
- 10) Z. W. Zipse, "Electrical Shock Hazard Due to Stray Current", Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference, 1991.