

# Rompe-Weisel Model에 의한 대전 인체의 정전기 방전 에너지 평가

이종호<sup>†</sup> · 김두현 · 강동규

충북대학교 안전공학과

(2003. 2. 17. 접수 / 2003. 9. 9. 채택)

## Electrostatic Discharge Energy Estimation of the Charged Human Body by the Rompe-Weisel Model

Jong-ho Lee<sup>†</sup> · Doo-hyun Kim · Dong-kyu Kang

Department of safety Engineering, Chungbuk National University

(Received February 17, 2003 / Accepted September 9, 2003)

**Abstract** : The discharge energy by electrostatic discharge of the charged human body is calculated under the assumption that the stored charge is dissipated completely. However, it is well-known that the charge is slightly remained after electrostatic discharge. Therefore, The Rompe-Weisel model of the discharge analysis, which has somewhat more of a physical justification than the conventional energy equation, is proposed. It is proposed that the electrical conductivity of the arc should be proportional to the energy density transferred to it by Ohmic dissipation. For the electrostatic discharge energy analysis, the Rompe-Weisel model was compared by quasi static analysis. As a consequence, a study on a reliable energy evaluation based on simulation models during electrostatic discharge is carried out in this paper and is adopted to estimate the explosion hazards of flammable gases.

**Key Words** : electrostatic charge, discharge, energy, TBM, Rompe-Weisel

### 1. 서 론

인체의 정전기 대전은 전하의 전도와 유도에 의해서 민감한 전기·전자 부품에 악영향을 미치고 있다는 것은 널리 알려져 있다. 정전기가 원인이 되어 외부 환경에 민감한 전자 부품에 노이즈나 오작동 유발, 정전기의 역학적 현상에 의한 배관의 막힘, 그리고 방전에 의한 가연성 물질의 폭발 등 많은 재해를 발생시키고 있다. 이를 방지하기 위해 현재까지도 방전 메카니즘 연구를 하고 있지만 규명이 어려우며, 정전기에 의한 원인 파악 및 분석이 어려운 실정이기 때문에 더욱 큰 문제가 되고 있다<sup>1,2)</sup>.

기술의 발전으로 정전기 방전(ESD : electrostatic discharge)에 대한 내성이 더욱 악화되고 있어 많은 산업재해를 일으키고 있다. 특히 사람의 이동특성 때문에 더욱 악화된 외부환경속에서 전자 기기의 원활한 동작을 시키기 위해서는 정전기 방전 현상

의 정확한 이해와 더불어 대책 수립이 필수적이라 할 수 있다.

방전현상의 메카니즘을 이해하기 위해서는 정전기 방전시 인체에 대전된 전하량이 모두 방전 에너지로 쓰이지 않는다는 현실적인 가정을 사용함으로써 방전 메카니즘을 이해하고, 위험성을 올바르게 인식하는 것이 필요하다. 이에 세계의 여러 각국에서는 ESD 현상에 대한 HBM, CDM, FIM 등 여러 모델을 이용하여 방전 메카니즘을 발표하고, 규제를 강화하거나 확대하는 추세이다. 하지만, 국내의 경우 인체의 정전기 방전 위험성 및 메카니즘을 올바르게 파악할 수 있는 문헌이나 연구 자료가 미비한 실정이다.

본 연구는 대전된 인체의 방전 현상을 현실성있게 이해하기 위해서 gap distance의 저항이 일정하지 않고 시간에 따라 변하는 R(t)C 회로 모델을 도입하고자 한다. 이 모델을 적용하기 위해 Rompe-Weisel model을 도입하였다. 또한 현재 방전 에너지 해석 시 많이 사용하고 있으며, 경로상의 저항이 일정한

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
yijho@korea.com

two body model(TBM)을 이용하여 저항이 에너지에 미치는 영향을 분석한다. 또한 이 방전 에너지를 비교하여 가연성 가스의 폭발 위험성을 분석하고자 한다.

## 2. 정전기 방전의 이론적 해석 기법

### 2.1. Rompe-Weisel model

기존의 정전기 방전 에너지는 방전경로상의 저항이 일정한 RC 회로로 해석됨으로써 현실성이 떨어졌다. 그래서 방전 메카니즘을 설명할 수 없는 부분을 해석하기 위해 방전 경로상의 저항을 시간의 함수로 해석한 Rompe-Weisel model을 사용하여 R(t)C 회로로 모델링한다. 이 모델은 방전시 경로의 전도도가 아크 에너지에 비례한다는 가정을 기초로 삼고 있다.

$$k_r g^2 \frac{d}{dt} \frac{1}{R(t)} = I^2 R \quad (1)$$

$k_r$ 은 비례 계수로  $0.5 \sim 1.0 [\text{atm} \cdot \text{cm}^2/\text{V}^2]$ 의 값을 가지며, 방전 간격 길이  $g$ 는 인체와 물체간의 거리를 나타낸다. 회로 방정식은 Fig. 1의 등가 회로에서 식 (2)와 같이 나타낸다.

$$Lq'' + R(t)q' + \frac{q}{C} = 0 \quad (2)$$

식 (1)에서  $i = dq/dt$ 의 관계로부터 다음의 관계를 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_0} + \frac{1}{k_r g^2} (E_0 - E) \quad (3)$$

$$E_0 = \frac{Q_0^2}{2C} \quad (4)$$

그리고, 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$E(q, I) = \frac{q^2}{2C} + \frac{1}{2} LI^2 \quad (5)$$

에너지  $E(E_0$ : 초기 에너지)는 capacitor의 전계 에너지와 inductance의 자계 에너지의 합을 의미하고 있으며, 식 (3)은 아크의 conductance가 절연 파괴 초

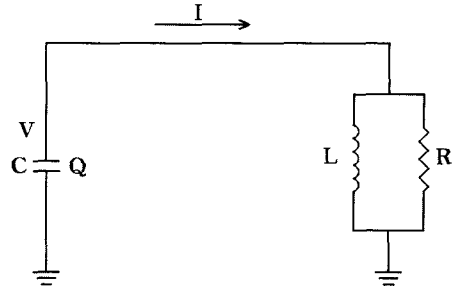


Fig. 1. Equivalent circuit for a dynamic analysis

기치인  $1/R_0$ 를 지나 회로의 저장 에너지 중 저항에 의해 손실된 에너지에 비례하여 증가하는 것을 나타낸다. 따라서, 식 (3)은 이 모델의 기본 전제가 되고 있으며, 이 식을 이용하여 식 (2)를 이 모델의 미분 방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$Lq'' + \frac{k_r g^2}{k_r g^2 / R_0 + (E_0 - E)} q' + \frac{q}{C} = 0 \quad (6)$$

식 (6)은 2계 비선형 미분방정식으로서 해석적인 해를 구하기가 어렵다. 그래서 방전 경로상의 inductance  $L$ 이 매우 작은 값을 가지므로  $L=0$ 으로 단순화시키면 Bernoulli 방정식 형태로 되어 해석적인 해를 구할 수 있다.

$$q' + \frac{1}{2C^2 k_r g^2 R_0} (2Ck_r g^2 + R_0 q_0^2) q = \frac{1}{2C^2 k_r g^2} q^3 \quad (7)$$

식 (7)에서 해석적인 해인 전하량  $Q(t)$ 를 구하고,  $V(t) = Q(t)/C$ 를 이용하여 전위를 구할 수 있다.

$$Q(t) = \frac{\sqrt{1 + \alpha_r} Q_0}{(1 + \alpha_r e^{\beta_r t})^{1/2}} \quad (8)$$

여기에서,  $\alpha_r = \frac{2k_r}{R_0 C E_b^2}$ ,  $\beta_r = \frac{1 + \alpha_r}{k_r} E_b^2$  이고,

$V_0$ 는 초기 대전 전압이고,  $E_b$ 는 절연 파괴 전계로 대전 전위와 방전 간격에 따라 변하는 값이 이용된다. 그리고 전류 방정식은  $I(t) = dQ(t)/dt$ 의 관계식에서 식 (9)로 나타낼 수 있다.

$$I(t) = \frac{1}{2} C V_0 \beta_r \sqrt{1 + \alpha_r} \cdot \frac{\alpha_r e^{\beta_r t}}{(1 + \alpha_r e^{\beta_r t})^{3/2}} \quad (9)$$

그리고, 식 (9)와  $V(t)$ 를 이용하여 방전경로상의 저항식을 구한다.  $\alpha_r$ 값은 작은 값이므로 무시한다.

$$R(t) = R_0 \frac{e^{-\beta_r t} + \alpha_r}{1 + \alpha_r} = \frac{2}{\beta_r} C \left(1 + \frac{1}{\alpha_r} e^{-\beta_r t}\right) \quad (10)$$

위의 해석 모델을 근거로 하여 대전 인체의 방전 에너지를 물리적으로 해석하여 그 결과를 two body model과 비교하고, 대전 인체의 정전기 방전 위험성을 평가하고자 한다<sup>3-5)</sup>.

### 2.2. Two body model

인체와 피방전 물체간의 방전 현상은 인체와 물체사이의 전기적 관계를 나타낸 용량계수의 함수와 Maxwell 방정식에 기초를 둔 two body model (TBM)을 사용하는데 이것을 Fig. 2에서 보여주고 있다.

식 (11)과 (12)는 이 모델의 기본 방정식이 되고 있다.

$$Q_1 = c_{11} V_1 + c_{12} V_2 \quad (11)$$

$$Q_2 = c_{12} V_1 + c_{22} V_2 \quad (12)$$

여기에서,  $Q_1, Q_2, V_1, V_2$ 는 각각 전하원인 body 1과 피방전 물체인 body 2의 전하량과 전위를,  $c_{11}, c_{22}$ 는 자기 용량계수,  $c_{12}$ 는 상호 용량계수를 나타낸다.

대전된 인체의 방전형태를 이해하기 위해 대전되어 있는 인체는 비접지 상태로 하고, 피방전 물체는 접지상태로 한다. 이 조건은 실제 작업장에서의 정전기 방전으로부터 재해를 방지하기 위한 환경을

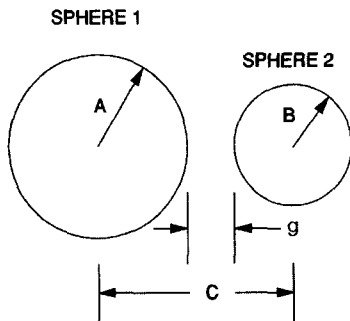


Fig. 2. Two sphere model for ESD

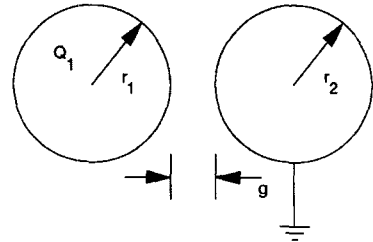


Fig. 3. General two sphere ESD model with a floating source and a grounded sink

나타내고 있다. 이때 body 2의 전압은 대지 전압과 같아지며, 대지로부터 전하를 얻어 전하량을 갖는 상태가 된다. 이 모델은 Fig. 3에서 보여주고 있다. 방전하기 전의 초기 식은 다음과 같이 된다.

$$Q_1 = c_{11} V_1 \quad (13)$$

$$Q_2 = c_{12} V_1 \quad (14)$$

$$V_1 = Q_1 / c_{11} \quad (15)$$

$$E_i = \Delta E = \frac{1}{2} Q_1 V_1 \quad (16)$$

Body 2가 접지됨으로써 body 2의 전위가 없기 때문에 방전 에너지는 body 1의 방전 전 초기 에너지가 되고, 식 (16)으로 구한다. 이것은 방전으로 소비된 에너지가 되며, 결국 방전 확률과 방전 강도라는 측면에서는 인체에 대전된 전하량인  $Q_1$ 에 비례하게 된다<sup>6,7)</sup>.

### 3. 사례연구 및 검토

대전된 인체의 정전기 방전 메카니즘에 대한 수치 해석을 하기 위하여 정전기 해석시 사용하고 있는 조건은 다음과 같다. 인체 저항을 1500[Ω], 정전 용량을 100[pF]으로 하는 DOD (Dept. of Defense) Standard 1686을 사용하였다. 이 기준은 산업현장에서 많이 사용하고 있으며, 정확도보다는 일관성이 그 목적을 두고 있다. 인체에 대전된 초기 전하량은 정전기 방전 해석에서 중요한 인자로서 방전 에너지 해석시 많이 사용하고 있는 인자인데 일반적으로 접촉대전으로 인체가 얻는 전하량인  $1 \times 10^6$ [C]으로 사례 연구를 하였다.

### 3.1. Rompe-Weisel Model

방전 현상은 전자의 급격한 증가로 인한 전자 사태(electron avalanche)에 의해 진행(Townsend theory) 되기 때문에 처음에는 극한 저항을 가지다가 결국에는 낮은 저항으로 변화하게 된다. 따라서 정전기 방전 해석시 방전경로상의 저항이 일정한 것이 아니라 변화하는 것으로 해석을 해야 한다. 방전 경로상의 저항이 시종속성을 가진 경우의 전압과 에너지 변화를 Fig. 4과 Fig. 5에서 보여주고 있다.

Fig. 4은 방전 전압이 시간에 따라 낮아지다가 방전 간격이 작을수록 수렴되는 속도가 점점 빠르게 진행하고 있다. Fig. 5은 방전으로 소실되는 에너지가 방전 간격이 작을수록 빠른 속도로 초기 에너지 상태로 수렴되고 있다. 간격이 작을수록 inductance L과 conductance C에 저장되는 에너지가 작아져서, 저항을 통하여 외부로 빠져나가는 방전 에너지가 커지고 있다. 즉, 방전 간격이 작을수록 방전이 잘 일어난다.

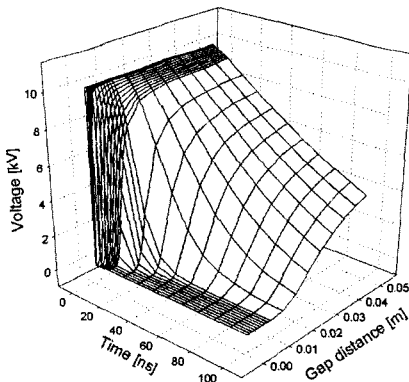


Fig. 4. Voltage variation for gap change in case of a time-varying resistance

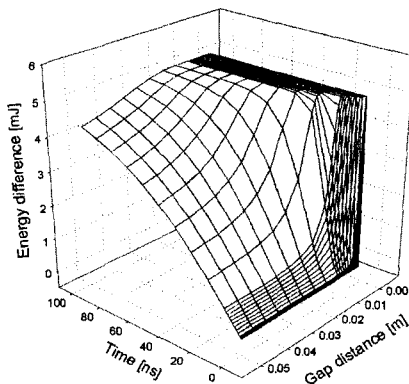


Fig. 5. Energy difference variation for gap change in case of a time-varying resistance

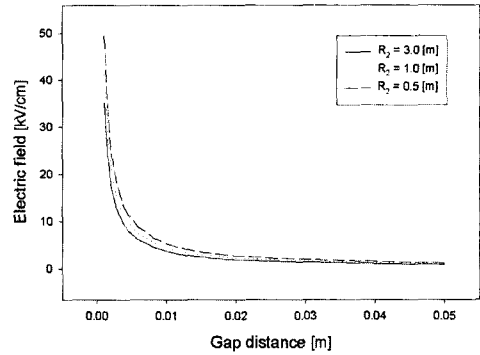


Fig. 6. Electric field variation ; a sink is grounded

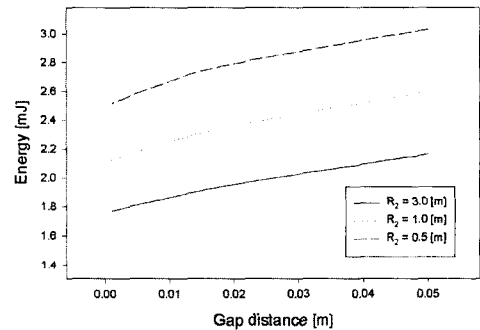


Fig. 7. Energy variation of body 1 ; a sink is grounded

### 3.2. Two Body model

인체의 정전 용량인 100[pF]을 이용하여 반경이 1[m]인  $R_1$ (body 1)으로 인체를 나타내었고, 피방전 물체는 반경 0.5~3[m]를 가지는  $R_2$ (body 2)로 하여 모델화 하였다.

대전된 인체를 피방전 물체(접지된 전자 장비)로 접근시 전계와 에너지 변화를 Fig. 6과 7에서 보여 주고 있다. Fig. 6은 전계를 보여주는 것으로 방전 간격이 작을수록 그리고 body 2의 반경이 작을수록 절연 파괴 전계인 30[kV/cm]에 빨리 도달하여 방전이 이루어지고 있다. 따라서 방전 조건 중에서 방전 간격뿐만이 아니라 전기기기 등의 피방전 물체의 크기도 중요한 요인이 되고 있다. 방전 전·후의 에너지차를 나타내는 Fig. 7은 body사이의 거리가 아주 작은 경우에 한하여 나타낸 것이기 때문에 body 2의 크기가 작을수록 상승하고 있으며, 방전 간격에 도달할수록 감소하고 있다.

### 4. 방전 에너지 비교 및 위험성 평가

대전된 인체의 정전기 방전시 Rompe-Weisel

model과 TBM에 의한 에너지 변화를 비교함으로써 기존의 정전기 방전 에너지 식인  $1/2 \cdot CV_0^2$ 에서 탈피한 새로운 방전 에너지를 구할 수 있으며 이것을 사용하여 현실적인 정전기 방전 위험성 분석할 수 있다.

방전이 일어나는 절연 파괴 간격에서의 방전 에너지를 구하기 위해서 식 (11)로부터 전하량의 변화에 따른 에너지 해석을 한 후 불꽃 방전 속도를 고려한 Rompe-Weisel model의 에너지를 구한다. 이 에너지와 일반적으로 사용하는 기존의 방전 에너지 식인  $E = 1/2 \cdot CV_0^2$ , 그리고 TBM 해석에서 나온 에너지를 Fig. 8에서 비교하고 있다. Fig. 8에서의 3가지 에너지는 전하량이 증가할수록 커지는 거의 같은 양상을 보여주고 있으며, 전하량이  $4 \times 10^{-6}[C]$ 이 되면  $1/2 \cdot CV_0^2$  해석에 의한 에너지 값과 같이 일치하여 증가하게 된다. 하지만 대전 전하량이 적을 경우 기존 식과 비교하여 전하량이 인체에 잔존하게 되는 것을 알 수 있었다.

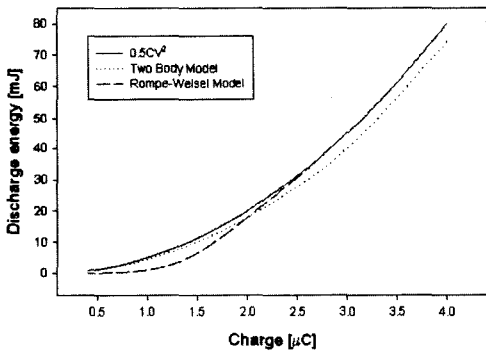


Fig. 8. Comparison of discharge energy for a case of  $0.5CV_0^2$ , TBM, and Rompe-Weisel model as a function of charge

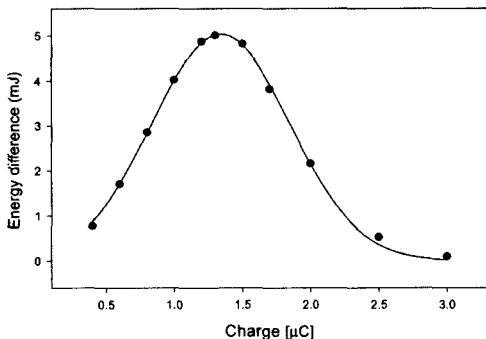


Fig. 9. A plot of curve fitting for energy difference between a Rompe-Weisel model and  $0.5CV_0^2$

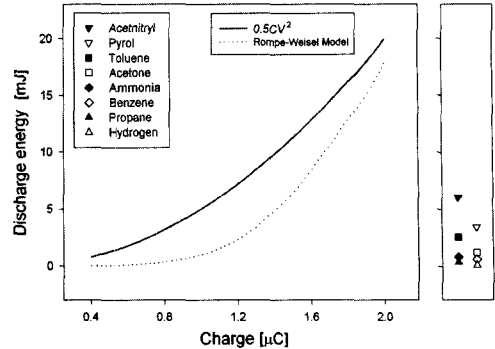


Fig. 10. Comparison of explosion hazards between  $0.5CV_0^2$  and energy by Rompe-Weisel Model for flammable gases

Fig. 9는 Rompe-weisel model과 기존  $1/2 \cdot CV_0^2$  식에 의한 에너지차( $\Delta E$ )를 보여주고 있다. 인체의 대전 전위에 따라 변하는 방전 에너지는 식  $1/2 \cdot CV_0^2$ 에서 curve fitting한 식 (17)에서 구한 에너지 차이만큼 빠춤으로써 실제 인체의 정전기 방전에 의한 에너지를 구할 수 있다. 여기에서,  $Q_0$ 는 인체의 초기 대전 전하량이다.

$$\Delta E = 0.005039 e^{-0.5 \left( \frac{Q_0 - 1.341 \times 10^{-6}}{5.05 \times 10^{-7}} \right)} \quad (17)$$

Fig. 10은  $1/2 \cdot CV_0^2$ 과 Rompe-Weisel model에 의한 에너지를 가연성 혼합 기체의 최소 발화 에너지와 같이 비교하고 있다. 대전된 인체의 정전기 방전 에너지는 폭발 범위에 있는 가연성 혼합 기체를 폭발시킬 수 있는데, 그 중에서 toluene의 경우를 예를 들면,  $1/2 \cdot CV_0^2$  식은 대전 전하량이 약  $0.7[\mu C]$ 에서, 그리고 Rompe -Weisel model은 대전 전하량이 약  $1.2[\mu C]$ 에서 폭발 가능성이 있는 것을 볼 수 있었다. 즉, 대전 전하량이 적은 경우에는 인체에 전하량이 잔존하게 되어 방전에너지에 의한 폭발 가능성이 적게 된다.

## 5. 결 론

인체에 대전된 정전기 방전 현상을 Rompe-Weisel model과 two body model을 도입하여 해석하였다.

인체에 대전된 전하량이 클 경우 인체 전하를 모두 방전 에너지로 사용하고, 작을 경우에 있어서는 인체에 잔존하게 됨을 알 수 있었다. 그리고 일반적으로 사용되는 에너지식인  $E = 1/2 \cdot CV_0^2$ 에서 탈

피한 새로운 정전기 방전 에너지를 구할 수 있어서 정전기 방전 피해의 원인 분석시 도움을 줄 수 있을 것이다. 따라서 인체의 정전기 대전은 주위 환경의 여건에 따라 대전 전하량이 달라지기 때문에 전하량이 모두 에너지로 사용되는 경우에 있어 대책을 강구하여 그 위험성을 제어해야 할 것이다.

### 참고문헌

- 1) W. R. Smythe, Static and dynamic electricity, 3rd ed., McGraw-Hill, 1968.
- 2) O. J. McAteer, Electrostatic discharge control, McGraw-Hill, pp. 178~185, 1990.
- 3) R. G. Renninger, "Mechanisms of charged-device electrostatic discharges", J. Electrostatics, vol. 28, pp. 253~283, 1992.
- 4) D. L. Lin, "Electron multiplication and electrostatic discharge wave forms", J. Appl. Phys., vol. 71(6), pp. 2580~2586, 1992.
- 5) 전춘생, 방전·고전압 공학, 동명사, 1995.
- 6) W. D. Greason, Electrostatic discharge in electronics, RSP, 1992.
- 7) W. D. Greason, "Quasi-static analysis of electrostatic discharge(ESD) and the human body using a capacitance model", J. Electrostatics, vol. 35, pp. 349~371, 1995.