

준정적해석과 동적해석을 통한 인체 방전 에너지 해석

이종호 · 김두현 · 김상렬*

충북대학교 안전공학과 · *안동과학대학 산업보건과

1. 서 론

정전기는 일상생활에서 흔히 일어나는 현상으로 산업 전반에 걸쳐 많은 응용을 하고 있다. 그러나 정전기 방전 현상은 절연내력을 초과할 때 갑작스럽게 방출되면서 일어나는 공기중 전자전도 현상으로 외부 환경에 민감한 전기·전자 소자의 오동작 피해를 주거나 가연성 재료를 폭발시킬 수 있는 에너지원이 될 수 있다. 또한 정전기 피해의 원인 분석이 곤란하기 때문에 정전기 방전 현상의 정확한 이해가 필요하다. 따라서 방전 위험성 평가시 초기에 대전된 인체 전하량이 모두 방전 에너지로 쓰인다는 비현실적인 가정을 사실적인 방전 모델로하여 방전현상을 이해하고, 정량적 해석 및 분석을 통하여 위험성을 올바르게 인식하고 평가하는 것이 필요하다. 이에 ESD 현상에 대한 HBM, CDM, FIM 등 여러 모델을 이용하여 방전 메커니즘을 발표하여 정전기 현상을 이해하고, 각 중 규제를 강화하거나 확대하여 재해를 방지하고 있다. 그러나 국내의 인체 정전기 방전으로 인한 위험성을 올바르게 파악할 수 있는 연구나 연구 자료 및 문헌이 미비한 실정이다.^[1-3]

본 연구는 방전 현상을 더욱 잘 이해할 수 있고, ESD 현상의 위험성을 올바르게 평가하기 위해서 대전된 인체의 정전기 방전 현상을 Human Body Model (HBM)을 이용한 준정적 해석법(Quasi-static Analysis)과 방전 경로상의 저항이 시간에 따라 변하는 R(t)C회로 모델을 사용한 동적 해석법(Dynamic Analysis)을 도입하여 서로 다른 모델의 해석 결과를 비교 분석하였다.

2. 정전기 방전의 이론적 해석 기법

2-1. 준정적 해석

정전기 방전해석시 중요한 인자인 인체의 대전 전하량으로 인체와 피방전 물체간의 방전 현상을 해석하였다. 해석 방법은 인체와 물체사이의 전기적 관계를 용량계수의 합수로 간단하게 수식화한 Maxwell방정식에 기반을 두고 있다. 인체와 피방전 물체를 두 개의 구로 모델링한 Two Sphere System(Two Body Model ; TBM)을 Fig. 1에서 보여주고 있다.

$$Q_1 = c_{11} V_1 + c_{12} V_2 \quad (1)$$

$$Q_2 = c_{12} V_1 + c_{22} V_2 \quad (2)$$

여기에서, body 1(전하원;인체)과 body 2(피방전 물체)의 전하량을 Q_1 , Q_2 , 전위를 V_1 , V_2 라 하고, c_{11} , c_{22} 는 자기 용량계수, c_{12} 는 상호 용량계수를 나타낸다.

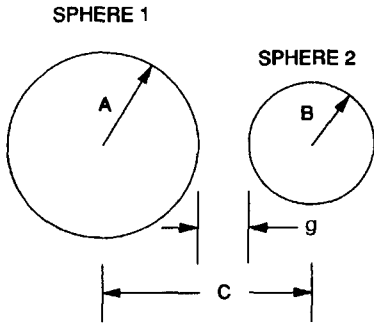


Fig. 1. Two sphere model for ESD

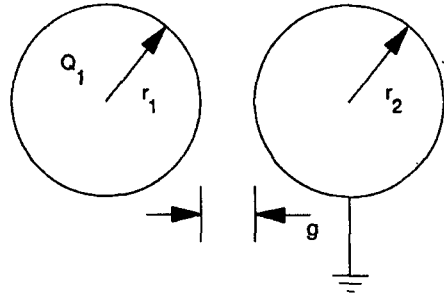


Fig. 2. General two sphere ESD model with a floating source and a grounded sink

대전되어 있는 body 1(인체)과 대전되어 있지 않은 body 2(피방전 물체)로 이루어진 상태에서 body 2를 접지한 경우, body 2의 전압은 대지 전압으로 되고, 대지로부터 전하를 얻어 전하량을 갖는 상태가 된다. System의 모델은 Fig. 2에서 보여주고 있으며, 방전하기 전의 초기 식은 다음과 같이 된다.

$$Q_1 = c_{11} V_1 \quad (3)$$

$$Q_2 = c_{12} V_1 \quad (4)$$

$$V_1 = Q_1 / c_{11} \quad (5)$$

Body 2가 접지됨으로써 body 2의 전위가 없기 때문에 system의 방전 에너지는 body 1의 방전 전 초기 에너지가 되고 식 (6)로 구한다. 이것은 방전으로 소비된 에너지이며, 방전 에너지 차가 된다. 결국, 방전 확률과 방전 강도는 대전된 전하원 Q_1 에 비례한다.^[4-6]

$$E_i = \Delta E = \frac{1}{2} Q_1 V_1 \quad (6)$$

2-2. 동적 해석

기존의 인체 정전기 방전은 RC 회로로 해석됨으로써 방전 메카니즘의 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.

$$k_r g^2 \frac{d}{dt} \frac{1}{R(t)} = I^2 R \quad (7)$$

k_r 은 비례 계수로 $0.5 \sim 1.0 [\text{atm} \cdot \text{cm}^2 / \text{V}^2]$ 의 값을 가지며, 절연 파괴 전계가 $50 [\text{kV/cm}]$ 에서 1의 값을 갖는다. 방전 간격 길이 g 는 인체와 물체간의 거리를 나타낸다. 회로 방정식은 Fig. 3의 등가 회로에서 식 (8)과 같이 나타낸다.

$$Lq'' + R(t)q' + \frac{q}{C} = 0 \quad (8)$$

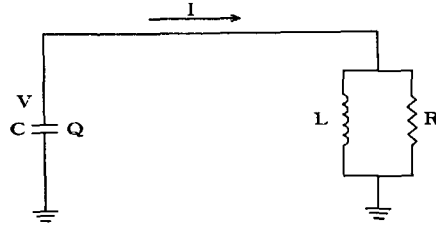


Fig. 3. Equivalent circuit for a dynamic analysis

식 (7)에서 $i = dq/dt$ 의 관계로부터 다음의 관계를 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_0} + \frac{1}{k_r g^2} (E_0 - E) \quad (9)$$

$$E_0 = \frac{Q_0^2}{2C} \quad (10)$$

에너지 방정식은 다음과 같다.

$$E(q, I) = \frac{q^2}{2C} + \frac{1}{2} LI^2 \quad (11)$$

에너지 $E(E_0$:초기 에너지)는 capacitor의 전계 에너지와 inductance의 자계 에너지의 합을 의미하고 있으며, 식 (9)는 아크의 conductance가 절연 파괴 초기치인 $1/R_0$ 를 지나 회로의 저장 에너지 중 저항에 의해 손실된 에너지에 비례하여 증가하는 것을 나타낸다. 따라서, 식 (9)는 이 모델의 기본 전제가 되고 있다. 식 (9)를 이용하여 식 (8)을 이 모델의 미분 방정식으로 나타내면 식 (12)와 같다.

$$Lq'' + \frac{k_r g^2}{k_r g^2/R_0 + (E_0 - E)} q' + \frac{q}{C} = 0 \quad (12)$$

식 (12)는 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.

$$q' + \frac{1}{2C^2 k_r g^2 R_0} (2Ck_r g^2 + R_0 q^2) q = \frac{1}{2C^2 k_r g^2} q^3 \quad (13)$$

식 (13)에서 해석적인 해인 전하량 $Q(t)$ 를 구하고, $V(t) = Q(t)/C$ 를 이용하여 전위를 구할 수 있다.

$$Q(t) = \frac{\sqrt{1 + a_r} Q_0}{(1 + a_r e^{\beta_r t})^{1/2}} \quad (14)$$

여기에서, $a_r = \frac{2k_r}{R_0 C E_b^2}$, $\beta_r = \frac{1 + a_r}{k_r} E_b^2$ 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 (15)로 나타낼 수 있다.

$$I(t) = \frac{1}{2} C V_0 \beta_r \sqrt{1 + \alpha_r} \cdot \frac{\alpha_r e^{\beta_r t}}{(1 + \alpha_r e^{\beta_r t})^{3/2}} \quad (15)$$

그리고, 식 (15)와 $V(t)$ 를 이용하여 방전경로상의 저항식을 구한다. α_r 값은 작은 값을 가지므로 무시한다.^[7-8]

$$\begin{aligned} R(t) &= R_0 \frac{e^{-\beta_r t} + \alpha_r}{1 + \alpha_r} \\ &= \frac{2}{\beta_r} C \left(1 + \frac{1}{\alpha_r} e^{-\beta_r t}\right) \end{aligned} \quad (16)$$

위의 두 모델에 바탕을 두고 사례 연구를 통하여 준정적 해석법과 동적 해석법에 의한 해석 결과 등을 비교하고, 대전 인체의 정전기 방전 위험성을 평가하고자 한다.

3. 사례연구 및 검토

인체가 대전되어 방전이 이루어지는 메카니즘에 대한 수치 해석을 하기 위하여 인체 저항을 1500[Ω], 정전 용량을 100[pF]으로 하는 *DOD Standard 1686*을 사용하였다. 이 기준은 현재 산업 전반에 걸쳐 많이 사용하고 있으며, 정확도보다는 일관성에 그 목적을 두고 있다. 그리고 인체의 초기 전하량은 1×10^{-6} [C]으로 사례 연구를 하였다.

3-1. 준정적 해석

준정적 해석에서 body 1은 인체로 하여, 인체의 정전 용량 100[pF]을 갖는 구의 반경 1[m]로 인체를 고정시킨 반경 R_1 으로 하였고, body 2는 피방전 물체인 반경 R_2 로 하여 0.5~3[m]를 가지는 피방전 물체로 모델화하였다.

대전된 인체를 접지된 전자 장비로 접근시 인체의 전위와 에너지 변화를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 4는 body 2의 크기가 작을수록 그리고 body 사이의 거리가 멀수록 인체 전위가 상승하고 있다. 방전 전·후의 에너지차를 나타내는 Fig. 5는 body 사이의 거리가 아주 작은 경우에 한하여 나타낸 것이기 때문에 body 2의 크기가 작을수록 상승하고 있으며, 방전 간격에 도달할수록 감소하고 있다는 것을 보여주고 있다.

3-2. 동적해석

정전기 방전 해석은 방전하는 동안의 저항을 일정하다고 하여 해석하여 왔다. 그러나 Townsend 이론에서와 같이 방전은 전자의 급격한 증가로 인한 전자 사태에 의해 진행되기 때문에 처음에는 극한 저항을 가지다가 결국에는 낮은 저항으로 변화하게 된다.

방전 경로상의 저항이 시종속성을 가진 경우의 전압과 전류의 변화를 Fig. 6과 Fig. 7에서 보여주고 있다. Fig. 6은 방전 전압이 시간에 따라 낮아지다가 방전 간격이 작을수록 수렴되는 속도가 점점 빠르게 진행하고 있다. Fig. 7은 방전 간격이 작을수록 최대 방전 전류에 도달하는 시간과 최대 방전 전류값이 빠르고, 크게 나타나고 있다.

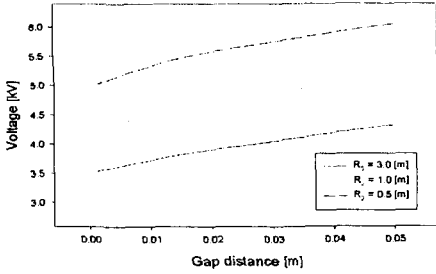


Fig. 4. Voltage variation of body 1 ; a sink is grounded

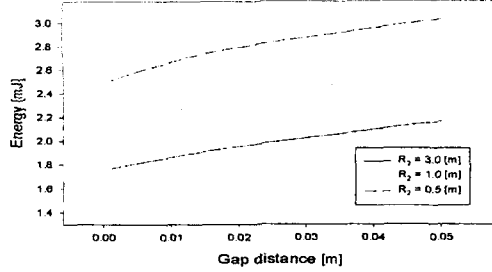


Fig. 5. Energy variation of body 1 ; a sink is grounded

Fig. 8은 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.

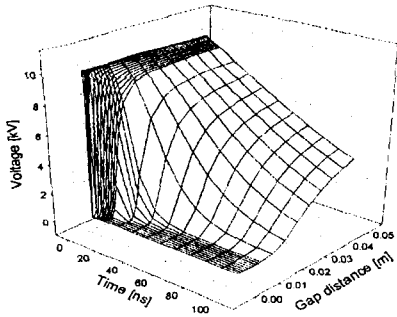


Fig. 6. Voltage variation for gap change in case of a time-varying resistance

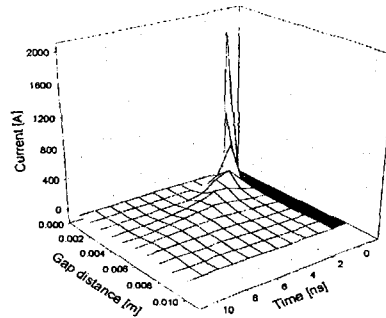


Fig. 7. Current variation for gap change in case of a time-varying resistance ; gap distance = 0.01~0.001 [m]

3-3. 준정적 해석과 동적 해석의 비교

대전된 인체의 정전기 방전시 준정적 해석과 동적 해석의 결과를 에너지의 변화를 비교함으로써 기존의 정전기 방전 에너지인 $1/2 \cdot CV_0^2$ 에서 탈피한 새로운 방전 에너지를 구할 수 있으며 이것을 사용하여 현실적인 정전기 방전 위험성 평가를 할 수 있다.

방전이 일어나는 절연 파괴 간격에서의 방전 에너지를 구하기 위해서 식 (11)로부터 전하량의 변화에 따른 에너지 해석을 한 후 불꽃 방전 속도를 고려하여 동적 해석 에너지를 구하였다. 이 동적 에너지와 일반적으로 사용하는 기존의 방전 에너지식인 $E = 1/2 \cdot CV_0^2$, 그리고 준정적 해석에서 나온 에너지를 Fig. 9에서 비교하고 있다.

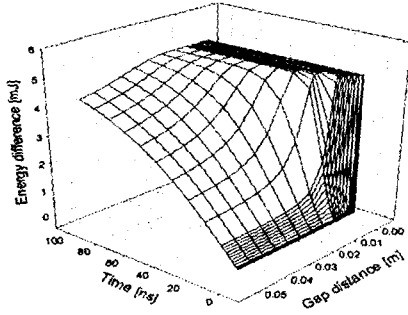


Fig. 8. Energy difference variation for gap change in case of a time-varying resistance

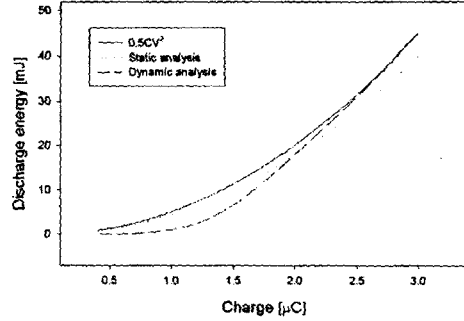


Fig. 9. Comparison of discharge energy for a case of $0.5CV^2$, static, and dynamic analysis as a function of charge

방전이 일어나는 절연 파괴 간격에서의 방전 에너지를 구하기 위해서 식 (11)로부터 전하량의 변화에 따른 에너지 해석을 한 후 불꽃 방전 속도를 고려하여 동적 해석 에너지를 구하였다. 이 동적 에너지와 일반적으로 사용하는 기존의 방전 에너지식인 $E = 1/2 \cdot CV_0^2$, 그리고 준정적 해석에서 나온 에너지를 Fig. 9에서 비교하고 있다.

Fig. 9에서의 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.

4. 결론

대전 인체에 의한 방전 현상을 해석하기 위하여 인체와 물체를 동일 표면적을 갖는 구로 등가화한 Two Body Model에 입각한 준정적 해석법과 방전 경로상에서의 동적 특성을 규명하기 위한 Rompe- Weisel Model을 사용한 동적 해석법을 도입하였다.

현재 정전기 방전의 위험성을 해석하기 위해 사용되는 전압이나 에너지 등에 관계된 식들은 대전 전하량이 모두 방전 에너지로 소모된다고 하여 사용하고 있으나 사실은 인체에 대전된 전하량이 모두 방전 에너지로 소모되지 않는다는 것을 알았다. 특히, 인체에 대전된 전위가 40[kV]이하의 경우 방전시 인체에 전하가 존재하게 된다. 인체의 정전기 대전은 주위 환경의 여건에 따라 대전 전하량이 달라지기 때문에 방전도 주위 환경에 많이 좌우되어, 40[kV]이상으로 대전되는 상황에 대해서는 정전기 재해 대책 수립에 만전을 기해야 할 것이다.

참고문헌

- [1] W. D. Greason, Electrostatic discharge in electronics, RSP, 1992.

- [2] W. R. Smythe, Static and dynamic electricity, 3rd ed., McGraw-Hill, 1968.
- [3] O. J. McAteer, Electrostatic discharge control, McGraw-Hill, pp. 178-185, 1990.
- [4] 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.
- [5] W. D. Greason, "ESD characteristics of a generalized two body system including a ground plane," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 27, pp. 471-479, 1991.
- [6] W. D. Greason, "Charge and potential control of Electrostatic Discharge(ESD) and the human body," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 32, pp. 1031-1043, 1996.
- [7] D. L. Lin, "Electron multiplication and electrostatic discharge wave forms," J. Appl. Phys., vol. 71(6), pp. 2580-2586, 1992.
- [8] 전춘생, 방전 · 고전압 공학, 동명사, 1995.