

대전인체의 정전기 방전에 대한 동적해석 - 준정적해석과의 비교

Dynamic analysis of charged human body electrostatic discharge
- comparison with quasi-static discharge

이종호*, 김두현*, 김상철**, 김상렬***

* 충북대학교 안전공학과, ** 세명대학교 산업안전공학과,

*** 안동전문대학 산업안전위생과

Abstract : In order to understand the characteristics of electrostatic discharge (ESD) by a charged human body, a dynamic analysis method based on RCL circuit and a quasi-static analysis method based on two-body model are introduced. In this paper, these methods calculate waveforms, discharge energy and potential difference to analyze the ESD phenomena from given initial conditions and geometry. Results are compared and discussed.

1. 서론

현대 산업설비에 있어 정전기 방전(Electrostatic Discharge, ESD) 현상을 적절히 제어하지 못해 여러 형태의 산업재해와 생산성 저하등의 장·재해로 인한 많은 피해가 발생되고 있다. 특히 대전인체의 방전현상은 대전물체와 물체사이의 방전으로 인한 문제보다 더 심각하며, 이에 대한 정량적 해석 및 분석을 통하여 올바른 위험성을 평가하는 것이 필요하다.⁽¹⁾

ESD 현상을 설명하기 위하여 HBM, CDM, FIM⁽²⁾ 등의 여러 모델이 발표되고 있으나, 실제의 현상을 완전하게 기술하지는 못하는 실정이다. 이에 각국에서는 EOS/ESD 심포지엄을 개최하여 정전기 방전 현상의 올바른 메카니즘을 이해하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 인체의 정전기 방전 현상을 해석하기 위한 Human-Body Model(HBM)⁽³⁾⁽⁴⁾에서 구 모델을 이용한 준정적해석법(Quasi-static Analysis)⁽⁴⁾과 RLC 회로 모델을 사용한 동적해석법(Dynamic Analysis)⁽⁶⁾을 도입한다. 준정적해석법에서는 인체와 전자장비를 표면적이 동일한 두 개의 구, 즉 Two Body Model에 입각한 Maxwell 방정식을 이용하여 전위차 및 방전

에너지등을 계산하고, 동적해석법에서는 방전경로 저항을 시간의 함수로 간주하는 Rompe Weisel Model의 해석결과와 고정저항으로 해석한 결과를 분석한다. 서로 다른 모델에 의한 해석 결과를 비교 분석함으로써 방전현상을 정확하게 이해하고자 하며 이를 토대로 ESD현상의 위험성을 올바르게 평가하는데 필요한 기초자료를 얻고자 한다.

2. 준정적해석

ESD 현상을 해석하기 위한 가장 기본적인 방법으로, 인체와 물체사이의 ESD로 인한 여러 현상을 이해하기 위하여 두 개의 구로 모델링한 Two Body system을 이용하고 있다. 이것은 두 도체간의 전기적 관계를 용량계수의 함수로 간단하게 행렬식으로 수식화할 수 있는 Maxwell 방정식에 기반을 두고 있다.

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

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

여기서, Q_1, Q_2 는 body1(인체)과 body2(물체)의 전하량, V_1, V_2 는 전위, c_{11}, c_{22} 는 자기용량계수, c_{12} 는 상호용량계수를 나타낸다.

두 개의 구에 대한 용량계수들의 해석적식은 참고문헌[5]에 제시되어 있다.

본 연구에서는 1)인체;비접지, 물체;비접지인 Two Body Model, 2)인체;비접지, 물체;접지인 Two Body Model의 2가지 경우에 대하여 방전 전후의 전위차와 에너지를 검토하여 방전확률, 방전강도 측면에서 그 특성을 해석하고자 한다.

1)인체;비접지, 물체;비접지인 Two Body Model

Body 1은 대전되어 있고 body 2는 대전되어 있지 않은 상태로 system 모델은 Fig. 1에서 보여주고 있다. 초기 식은 다음과 같이 주어진다.

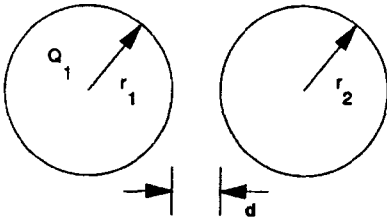


Fig. 1 General Two Shpere ESD Model for Two Floating Bodies

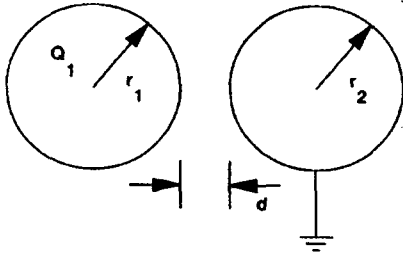


Fig. 2 General Two Sphere ESD Model with Floating Source and Grounded Sink

$$Q_1 = c_{11} V_1 + c_{12} V_2 \quad (3)$$

$$0 = c_{12} V_1 + c_{22} V_2 \quad (4)$$

식 (3)과 (4)로부터 방전전의 body 전위는 다음처럼 계산된다.

즉, $V_1 = Q_1 / c_{11} - c_{12}^2 / c_{22}$, $V_2 = -V_1 c_{12} / c_{22}$ 그리고, 전위차는 식(5)로 나타내는데 방전 확률을 의미한다.

$$V_1 - V_2 = \frac{Q_1}{[c_{11} - c_{12}^2 / c_{22}]} \left[1 + \frac{c_{12}}{c_{22}} \right] \quad (5)$$

System의 방전 전 초기에너지는 다음과 같다.

$$E_{i1} = \frac{1}{2} Q_1 V_1 = \frac{1}{2} \frac{Q_1^2}{c_{11} - c_{12}^2 / c_{22}} \quad (6)$$

방전은 두 개의 구를 연결하는 가는 도체에 모형화하였다. 이때 원래의 전하 Q_1 은 각각의 body로 분배되어 ESD 후의 양쪽 body는 같은 전위를 가지게 된다.

$$q_1 = c_{11} V + c_{12} V \quad (7)$$

$$q_2 = c_{12} V + c_{22} V \quad (8)$$

$$Q_1 = (c_{11} + 2c_{12} + c_{22}) V \quad (9)$$

두 body의 전위는 공통 전위 V 를 가진다.

$$V = \frac{Q_1}{c_{11} + 2c_{12} + c_{22}} \quad (10)$$

방전으로 이동된 전하량은 식(8)로부터 계산된다.

$$q_2 = V(c_{12} + c_{22}) = \frac{Q_1(c_{12} + c_{22})}{c_{11} + 2c_{12} + c_{22}} \quad (11)$$

System의 방전 후의 최종에너지는 다음과 같으며, 이 결과는 방전으로 소비된 에너지가 전하원의 제곱에 비례한다는 것을 보여준다.

$$\begin{aligned} E_{f1} &= \frac{1}{2} q_1 V + \frac{1}{2} q_2 V = \frac{1}{2} Q_1 V \\ &= \frac{1}{2} \frac{Q_1^2}{(c_{11} + 2c_{12} + c_{22})} \end{aligned} \quad (12)$$

방전강도는 초기에너지와 최종에너지의 차로 평가할 수 있다.

$$E_{D1} = E_{f1} - E_{i1} \quad (13)$$

2)인체;비접지, 물체;접지인 Two Body Model

Body 1은 대전된 상태이고 body 2는 body 1에 의해 유도되어 전하량을 가지고 있다. System 모델은 Fig. 2에서 보여주고 있으며, 초기 system 방전식은 다음 식으로 주어진다.

$$Q_1 = c_{11} V_1 \quad (14)$$

$$Q_2 = c_{12} V_1 \quad (15)$$

$$V_1 = \frac{Q_1}{c_{11}} \quad (16)$$

방전하는 동안의 전하량 Q_1 은 body 1에서 body 2로 흐르며, 접지도체에서 흐르는 전하량은 body 1 전하량과 body 2 전하량의 차 ($Q_G = |Q_1| - |Q_2|$)로 구한다.

System의 초기에너지(방전으로 소비된 에너지)는 식(17)으로 구한다.

$$E_i = \frac{1}{2} Q_1 V_1 \quad (17)$$

Body 2가 접지되어 있는 경우, 방전 확률과 방전 강도는 전하원 Q_1 에 비례한다. Body 1과 body 2 사이 그리고 body 2에서 접지로의 전하 이동율은 식(18), (19)과 같이 전류로 각각 나타낼 수 있다.

$$i_2 = \frac{dQ_1}{dt} \quad (18)$$

$$i_3 = \frac{d[|Q_1| - |Q_2|]}{dt} \quad (19)$$

이 준정적분석법에서는 방전하는 두 도체 사이의 이동되는 전하량 및 전위분포 등을 시간과는 무관하게 해석하기 때문에 방전과정의 정확한 물리적 메커니즘을 알 수 없다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 동적해석법에 의한 ESD현상의 해석이 필요하다.

3. 동적해석

실제 정전기 방전시 방전경로 상에서는 매우 복잡한 방전 메카니즘이 존재하는데 방전경로내에 인덕턴스 존재와 이 존재가 방전에 영향을 미친다는 점에 감안하여 인체의 정전기 방전을 RLC회로로 모델링하고자 한다. 이 때 경로상의 저항은 방전전의 무한대의 크기에서 방전이 진행됨에 따라 어떤 값으로 줄어드는 시간의 함수인 $R(t)$ 로 모델하여야 한다. $R(t)$ LC 회로를 이용한 Rompe-Weisel Model은 방전시 경로의 전도도가 아크 에너지에 비례한다는 가정을 기초로 삼고 있다.^[6] 즉,

$$k_r g^2 \frac{d}{dt} \frac{1}{R(t)} = I^2 R \quad (20)$$

k_r 은 비례계수를 나타내는 상수이며, g 는 방전경로 길이 즉 인체와 물체간의 거리를 나타낸다. Fig. 3의 등가회로에서 회로방정식은 식(21)과 같다.

$$Lq'' + R(t)q' + \frac{q}{C} = 0 \quad (21)$$

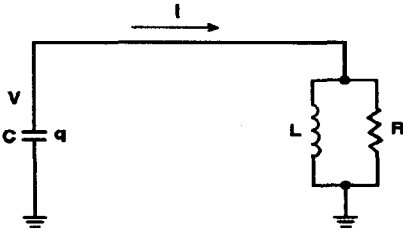


Fig. 3 Equivalent circuit for Dynamic Analysis

전하량과 전류의 관계식으로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} -k_r g^2 \frac{d}{dq} \frac{1}{R} &= IR \\ &= \frac{q}{C} + Lq'' = \frac{q}{C} + LI \frac{dI}{dq} \end{aligned} \quad (22)$$

이 식을 시간 t 에 대하여 적분하면,

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_0} + \frac{1}{k_r g^2} (E_0 - E) \quad (23)$$

$$E(q, I) = \frac{q^2}{2C} + \frac{1}{2} LI^2 \quad (24)$$

에너지 E (E_0 : 초기치 $q_0^2/2C$)는 커패시터의 전계에너지와 인덕터의 자계에너지의 합을 나타낸다. 식 (23)은 아크의 콘덕턴스가 절연 파괴 초기치인 $1/R_0$ 를 지나 회로의 저장 에너지중 저항에 의해 손실된 에너지에 비례하여 증가하는 것을 나타낸다. 식(23)을 이용하면 식(21)은 식(25)로 나타내어진다.

$$Lq'' + \frac{k_r g^2}{k_r g^2/R_0 + (E_0 - E)} q' + \frac{q}{C} = 0 \quad (25)$$

식 (25)는 2계 비선형 미분방정식으로서 해석적인 해를 구하기가 어렵다. 경로상의 인덕턴스 L 이 매우 적으므로 $L=0$ 인 경우를 고려하면 식(26)의 Bernoulli 방정식으로 나타난다.

$$\begin{aligned} q' + \frac{1}{2C^2 k_r g^2 R_0} (2Ck_r g^2 + R_0 q^2) q \\ = \frac{1}{2C^2 k_r g^2} q^3 \end{aligned} \quad (26)$$

이 식의 해 q 를 구하고 $V=q/C$ 를 이용하면 전위는 식(27)과 같다.

$$V(t) = \frac{\sqrt{1 + \alpha_r} V_0}{(1 + \alpha_r e^{\beta_r t})^{1/2}} \quad (27)$$

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

이다. 그리고 전류 방정식은 식 (28)로 나타낼 수 있다.

$$I(t) = \frac{1}{2} C V_0 \beta_r \sqrt{1 + \alpha_r} \cdot \frac{\alpha_r e^{\beta_r t}}{(1 + \alpha_r e^{\beta_r t})^{3/2}} \quad (28)$$

최대 전류 발생시간 및 최대전류는 식(29)와 식(30)으로 주어진다.

$$t_{pr} = 1/\beta_r \ln(2/\alpha_r) \quad (29)$$

$$I_{pr} = \frac{1}{3\sqrt{3}} C V_0 \beta_r \sqrt{1 + \alpha_r} \quad (30)$$

전류를 최대전류의 함수로 나타내면 식(31)과 같다.

$$I(t) = \frac{3\sqrt{3}}{2} I_{pr} \frac{\alpha_r e^{\alpha_r \beta_r t}}{(1 + \alpha_r e^{\beta_r t})^{3/2}} \quad (31)$$

그리고, 식 (27)와 (28)를 풀면 I-V에 대한 식을 만들 수 있다.

$$\frac{I}{I_{pr}} = \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{V}{V_0} [1 - (\frac{V}{V_0})^2] \quad (32)$$

α_r 을 무시하면 방전경로의 저항은 시간의 함수인 식(33)으로 나타난다.

$$\begin{aligned} R(t) &= R_0 \frac{e^{-\beta_r t} + \alpha_r}{1 + \alpha_r} \\ &= \frac{2}{\beta_r} C (1 + \frac{1}{\alpha_r} e^{-\beta_r t}) \end{aligned} \quad (33)$$

위의 식을 바탕으로 사례연구를 통하여 준정적해석법과 동적해석법에 의한 해석결과들을 비교하고 정전기 방전 위험성을 평가하고자 한다.

4. 사례연구 및 검토

대전인체가 물체에 접근하는 상황의 방전 메카니즘에 대한 수치해석을 하기 위하여

인체와 방전경로의 초기저항을 $1500[\Omega]$, 인체의 정전용량을 $100[\text{pF}]$, 그리고 인체의 초기전하량을 $1 \times 10^{-6} [C]$ 으로 가정한다.

4.1 준정적해석

준정적해석에서 body 1은 인체로 모델화하였으며, 1m로 고정된 반경 R_1 을 가지고, body 2는 반경 $R_2(0.5\text{m} \sim 3\text{m})$ 를 가진 전자장비로 모델화하였다. 두 구 사이의 간격을 $0.001 \sim 0.05\text{m}$ 로 변화시켜 간격변화에 따른 전계, 전위차, 그리고 에너지차를 계산하고 비교하였다.

1)인체;비접지, 물체;비접지인 Two Body Model

인체가 Q_1 이라는 전하량($1 \times 10^{-6} C$)을 가진 상태에서 body 2로 접근할 때 body 사이의 전위차, 전계, 전위, 에너지차에 대한 그림을 Fig. 4~7에서 보여주고 있다. Fig. 4는 인체가 전자장비로 접근시 두 body 사이의 전위차가 body 2가 클수록 그리고 body 사이의 간격이 클수록 커지는 것을 나타낸다. Body 사이의 전계를 나타내는 Fig. 5는 body 사이의 간격이 짧을수록 그리고 body 2

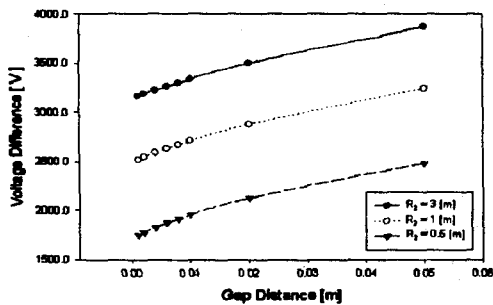


Fig. 4 Potential Difference for case where Source & Sink are Floating

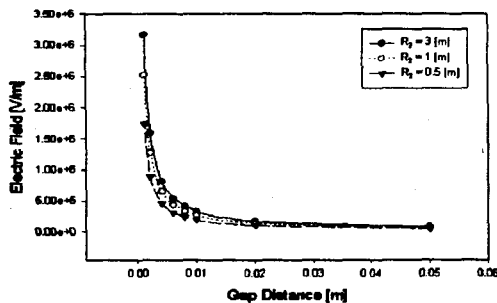


Fig. 5 Electric Field for case where Source & Sink are Floating

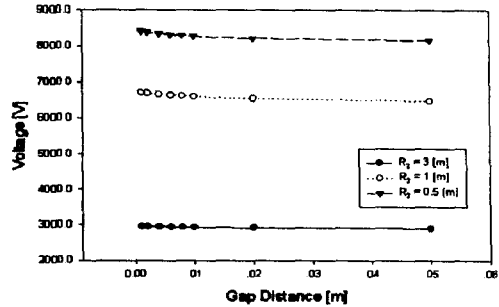


Fig. 6 Voltage for case where Source & Sink are Floating

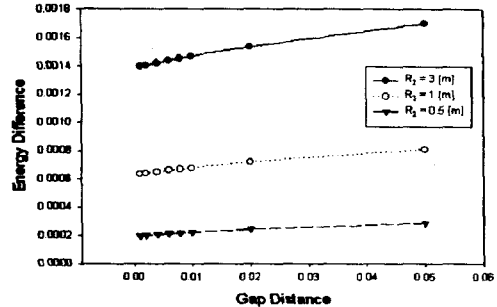


Fig. 7 Energy Difference for case where Source & Sink are Floating

가 클수록 커지는 것을 알수 있는데 이것은 대전되지 않은 물체가 클수록 방전이 일어날 가능성이 크다는 것을 보여준다. Body 2의 크기가 클수록 방전강도를 나타내는 에너지차가 크다는 것을 Fig. 7에서 보여준다. 그리고 Fig. 6은 방전 후에 인체의 초기 전하량이 양쪽의 body로 분산된 후에 공통전위 V 가 됨을 나타낸다.

2)인체;비접지, 물체;접지인 Two Body Model

인체가 Q_1 이라는 전하량($1 \times 10^{-6} C$)을 가진 상태에서 body 2를 접지시켰을 때 전자장비는 대지로부터 전하량을 얻고 전위는 0으로 된다. 이때 body 1을 접지된 전자장비로 접근시킬때의 전위와 에너지를 Fig. 8, Fig. 9에 나타내었다. Body 2가 접지되어 있는 이 환경은 실제 작업장에서의 정전기 환경을 나타낸다. Body 2가 접지되어 있는 상태에서 body 2의 크기가 클수록 그리고 body 사이의 거리가 멀수록 인체 전위와 에너지가 상승하는 것을 알 수 있다. 이것은 body 사이의 거리가 아주 작은 경우에 한하여 나타내는 것으로 body 사이의 거리가 멀수록 거의 일정하게 된다.

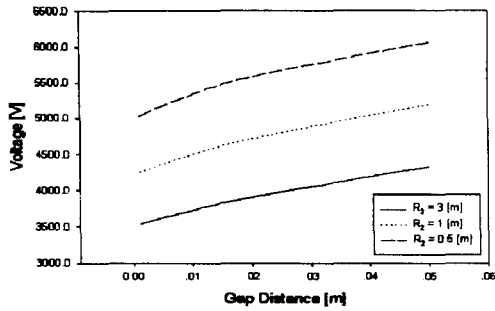


Fig. 8 Voltage of Body1 for case where Sink Grounded

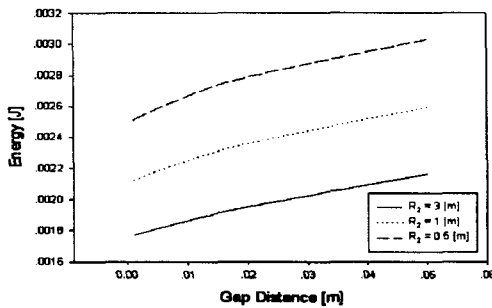


Fig. 9 Energy of Body1 for case where Sink Grounded

4.2 동적해석

정전기 방전 메카니즘을 설명하기 위해 저항의 시중속성과 시독립성의 경우를 비교한다. 이것을 위해 방전이 일어나는 순간의 방전경로의 저항을 처음에는 무한대의 저항에서 시간이 흐름에 따라 변하는 경우와 저항이 일정한 경우로 해석하였다.

1) $R = R(t)$

저항의 시중속성과 관련한 전류와 전압의 변화를 Fig. 10, Fig. 11에서 보여주고 있다.

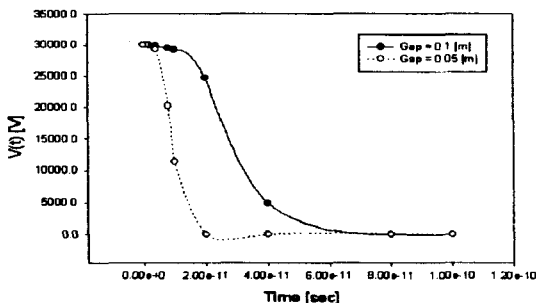


Fig. 10 Voltage for Time-dependent Resistance

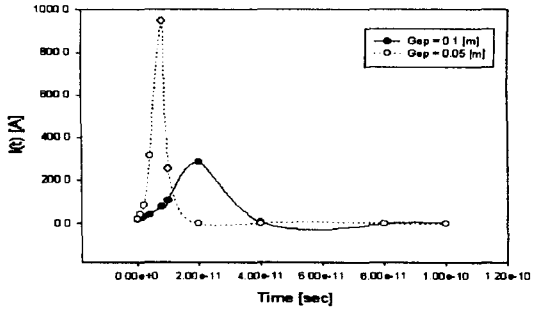


Fig. 11 Current for Time-dependent Resistance

Fig. 10에서 전압은 시간에 따라 낮아지다가 일정한 값으로 수렴하는데, 간격이 작을수록 수렴속도가 빠르다는 것을 알 수 있다. 저항이 시간에 따라 감소함으로써 전압도 같이 감소한다. Fig. 11은 $t=0.1[ps]$ 에서 전류가 최대가 되고, 간격이 작을수록 방전이 급격하게 이루어짐을 알 수 있다. 이것은 간격이 클수록 방전을 하기 위해서는 에너지가 더 많이 필요하다는 것을 나타낸다.

2) $R = R_0$

Fig. 12, Fig. 13은 저항이 시간에 따라 변하지 않는 경우로 Fig. 12는 저항의 시중속성과 비교하여 전압은 시간이 지남에 따라 서서히 작아지고, 전압이 일정한 값으로 가는데도 시간이 더 많이 걸리는 것을 알 수 있다. Fig. 13은 $t=[0.2ps]$ 에서 전류가 최대가 되는 데 시중속성과 비교하여 최대 전류치는 더 크고 최대 전류치에 도달하는 시간은 더 많이 걸린다.

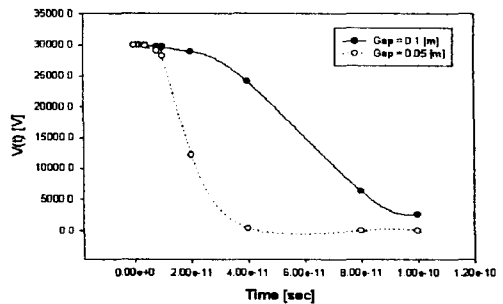


Fig. 12 Voltage for Time-independent Resistance

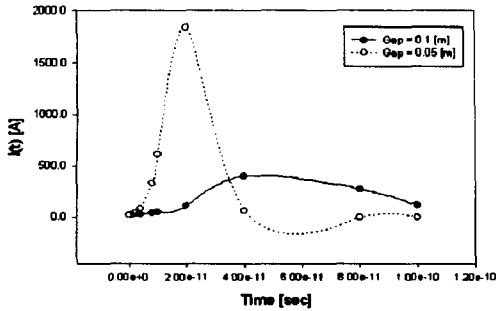


Fig. 13 Current for Time-independent Resistance

5. 결론

본 연구는 대전인체에 의한 방전현상을 해석하기 위하여 인체와 물체를 동일 표면적을 갖는 구로 등가화한 Two Body Model에 입각한 준정적해석법과 방전경로에서의 동적특성을 규명하기 위한 Rompe-Weisel Model을 사용한 동적해석법을 도입하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 방전 간격(d)에 따른 두 해석법상에서 간격이 작을수록 동적해석이 준정적해석보다 전위가 급격히 감소하는 것을 알 수 있었다.
2. 동적 해석법에서 경로저항을 변동저항(시간 t의 함수)으로 한 경우, 방전이 일어나는 시간이 고정저항으로 한 경우보다 더 빠르게 진행되고 최대 전류치는 다소 줄어든다는 것을 알 수 있었다.

이러한 해석 결과들은 실제 방전현상을 정밀측정한 결과와 정확하게 일치하지 않은 실정이다. 방전현상을 정확하게 이해하기 위해서는 방전현상의 해석 및 이론 연구를 통한 새로운 방전 모델의 개발이 필요하다. 방전 메커니즘에 대한 정확한 이해를 통하여 방전위험성 평가시 일반적으로 사용되는 방전에너지 $E = 1/2 CV^2$ 식에서 탈피한 새로운 진단 및 평가방법을 개발할 수 있다.

6. 참고문헌

- [1] W. D. Greason, "Electrostatic discharge in Electronics", 1992
- [2] Owen J. McAteer, "Electrostatic Discharge Control", McGRAW-HILL Book Company, pp. 178-185, 1990

- [3] W. D. Greason, "Electrostatic discharge : a charge driven phenomenon", J. Electrostatics, vol. 36, pp. 199-218, 1992
- [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, "Concepts in Modeling the effects of ESD in Electronic Systems", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 24, NO. 1, 1988
- [6] Robert G. Renninger, "Mechanisms of charged-device electrostatic discharges", J. Electrostatics, vol. 28, pp. 253-283, 1992