

## Two-body 모델을 이용한 대전 인체의 방전 위험성 예측에 관한 연구

고은영, 김두현\*, 김상철\*\*

충북대학교 대학원, 충북대학교 안전공학과\*, 세명대학교 산업안전공학과\*\*

### 1. 서론

현대 사회는 첨단 산업의 발전으로 공장내에서 발생하는 정전기를 적절히 제어하지 않으므로 여러 형태의 산업재해와 생산성 저하등의 장·재해로 인한 많은 피해가 발생되고 있다. 특히 정전기 방전 (ElectroStatic Discharge)[1] 중에서 인체의 대전으로 인한 방전 현상은 다른 물체의 대전으로 인한 정전기 방전 문제보다 더 심각하게 취급하여 이에 대한 정량적 해석 및 그 위험성을 올바르게 인식하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 대전 인체와 근접 물체간의 방전 현상을 규명하기 위하여 인체와 근접 물체의 정전 용량을 측정하여 이와 동일한 정전 용량을 가지는 구로 모델링한 two-body 문제로 정전기 현상을 해석하고자 한다.[2] 이는 두 물체간의 일차적 방전에 이어 발생하는 연속방전은 쉽게 제어될 수 있는 현실적 입장을 고려한 모델로서, 정전기 방전 현상을 해석함에 있어서 가장 기본적인 모델로 평가되고 있다. 이 모델은 맥스웰 방법(Maxwell's method)을 이용한 행렬 방정식으로 방전 현상을 수식화 할 수 있으며, 이 방정식을 이용하여 물체의 전위차, 방전 파형 및 방전 에너지를 계산할 수 있다.[3-5] 본 논문에서는 이와같은 분석 기법을 토대로 인체 대전으로 인한 정전기 위험성을 3차원 그래프를 통하여 쉽게 평가할 수 있는 two-body 모델을 이용한 프로그램을 개발 및 실험으로서 이를 검증하고자 한다. 인체와 인접 물체간의 거리 및 정전 용량을 측정하고, 이를 two-body 문제로의 모델링을 통하여 방전 가능성을 진단하고, 가연성 물질이 존재하는 작업장에는 최소 착화 에너지의 개념을 이용한 화재 폭발 가능성을 평가한다. 해석 결과를 최적의 안전 대책을 제시할 수 있는 척도로 사용하여 인체의 정전기 방전으로 인한 위험성을 제거하고 제반 사고를 예방할 수 있도록 한다.

### 2. 이론적인 접근

#### 2-1. 충전된 인체로부터 정전기 방전 현상의 모델

충전된 인체로부터 정전기 방전 현상의 모델을 해석하기 위해 본 연구에서는 two-body 모델을 사용하였다. Two-body 모델은 인체의 정전 용량을 측정하여 이와 동일한 정전 용량을 갖는 구로 모델링한 것으로, body 1은 인체를 나타내며, body 2는 반도체 칩이나 그 외 전자장치를 의미한다. 그림 1은 two-body 모델을 보여주는 것으로, 맥스웰의 방법을 이용한 행렬 방정식을 통해 각 body의 전위, 에너지를 구할 수 있다.

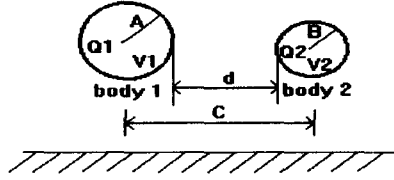


Fig 1. two-body 모델

2-2 Maxwell 방법을 이용한 해석

Two-body 모델에 맥스웰의 방정식을 적용하면,

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

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

맥스웰의 방정식을 이용하여 2가지의 경우로 나누어 전위 및 전위차, 방전에너지를 구하면 다음과 같다.

**Case I;** 두 body 모두 비 접지 된 경우

맥스웰의 방정식을 이용하여 계산하면

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

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

방전하기 전에 전위차를 계산하면

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

방전시에 방출된 에너지 값은

$$\begin{aligned} \Delta E &= E_I - E_F \\ &= \frac{1}{2} Q_1^2 \left[ \frac{c_{11} c_{22} - c_{12}^2}{c_{22}} - \frac{1}{c_{11} + 2c_{12} + c_{22}} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

**Case II;** body 1(인체)은 비접지, body 2는 접지된 경우

$$Q_1 = c_{11} V_1 \quad (7)$$

$$Q_2 = c_{12} V_1 \quad (8)$$

body 1의 전위를 구하면,

$$V_1 = \frac{Q_1}{c_{11}} \quad (9)$$

방전 에너지의 차는 다음식과 같다.

$$\Delta E = \frac{1}{2} Q_1 V_1 \quad (10)$$

### 3. 안전성 평가를 위한 Flow chart

Two-body 모델 이론으로 인체와 다른 물체간에 방전 현상에 대해 방전이 일어날 가능성과 안전성 평가를 분석하는데 사용하는 Flow chart이다.

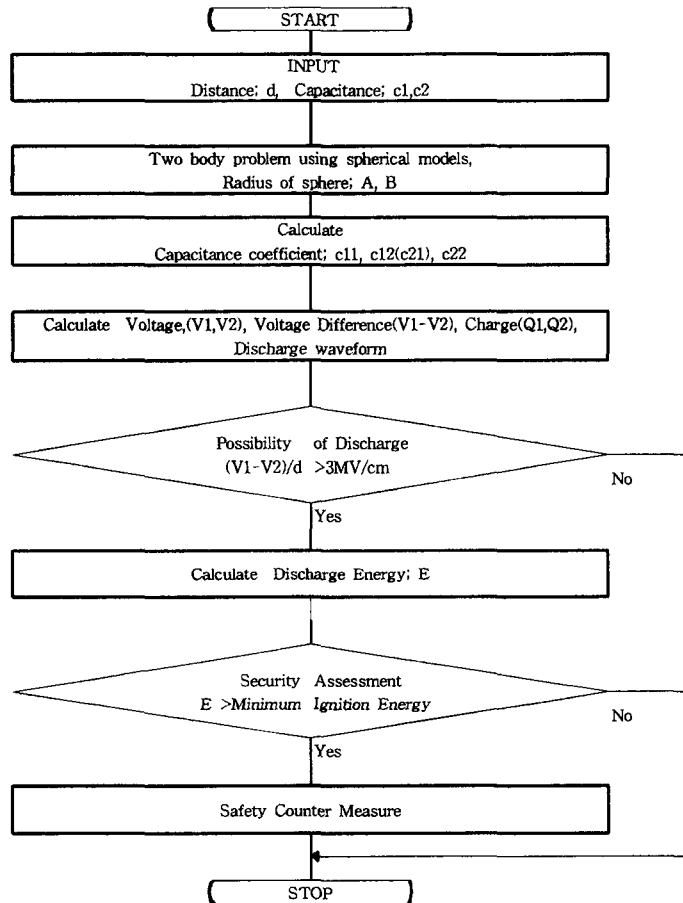


Fig. 2 안전성 평가를 위한 Flow chart

### 4. 사례 연구

#### 4-1. 시스템의 전위차 및 방전 에너지 분석

본 연구에서는 body 1을 인체의 표면적과 동일한 구로 나타내고, body 2에 반경을 0.1m에서 10m로 변화시키며, 구 사이의 간격을 0.01m에서 1m까지로 했을 때의 전위차를 계산하면 다음과 같다.

그림 3은 Case I에서의 전위차로서 body 1에 비해 body 2의 크기가 큰 경우에는 거의 일정했고, 반대의 경우에는 급격히 상승하는 전위차를 보였다. 또한 두 body사이의 거리가 증가 할수록 전위차는 증가했다. 그림 4는 Case II에서의 전위차로서 body 1의 크기에 비해 body 2의 크기가 큰 경우에는 전위차가 비교적 일정하게 나타났고, 반대로 경우에는 급격히 감소하는 전위차를 보였다. 또한 거리에 따른 전위차는 증가했다.

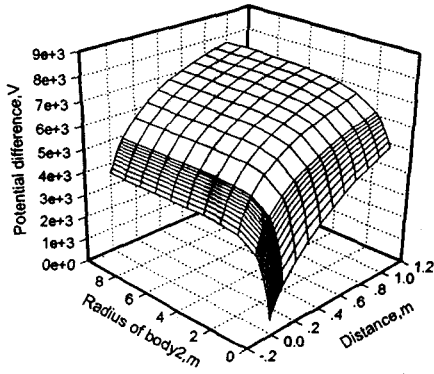


Fig. 3 Case I 에서의 전위차

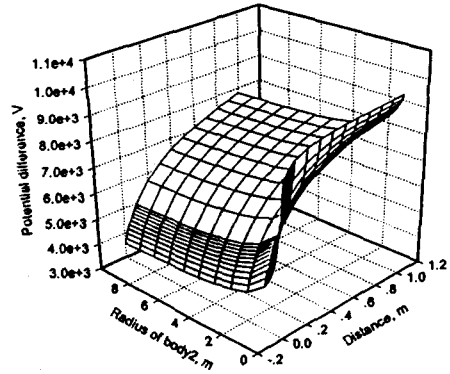


Fig. 4 Case II 에서의 전위차

#### 4-2. 방전 실험 결과

##### 4-2-1. 인체 방전 실험

인체를 이용한 방전 측정 방법은 피실험자가 절연판위에서 정전기 발생장치에 왼손을 접근하여 인체에 충전을 하고, 오른손의 손가락으로 전극에 방전을 시켜, 이 파형을 스토리지 스코프를 이용하여 순간 전압 파형을 보이도록 하였다.

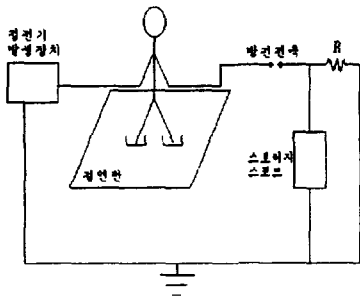


Fig. 5 인체를 이용한 정전기 방전 실험장치

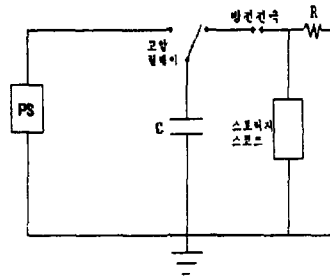


Fig. 6 콘덴서를 이용한 정전기 방전 실험장치

##### 4-2-2. 콘덴서의 방전 실험

대전 인체의 방전 현상에 가장 접근된 실험 방법으로 콘덴서를 이용한 방전 실험을 들 수 있다. 이 방법은 간단하고 실제 인체의 방전에서 일어나는 여러 가지 현상과 동일하게 실험을 진행할 수 있어 가장 신뢰성 있는 데이터를 얻을 수 있다. 측정방법은 고전압 직류 전원공급장치로 전원을 콘덴서에 충전하여, 이를 고압릴레이를 이용하여 방전, 스토리지 스코프에 전압파형을 보여주었다.

##### 4-2-3. 실험 결과

인체 방전 실험과 콘덴서의 방전 실험에서의 두 방전 파형과 이론적인 방전 파형을 비교 분석함으로써 이론과 실험의 타당성을 검토할 수 있다.

그림 7은 인체 및 콘덴서를 이용한 방전 실험과 방전이론에 의한 이론값을 나타낸 그림으로 방전 파형이 유사하게 나왔음을 알 수 있다.

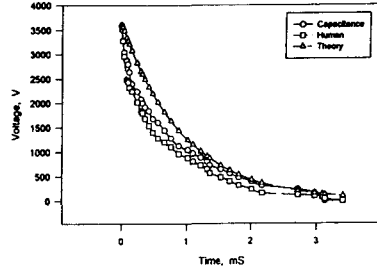


Fig.7 전압방전과형

전극거리에 따른 최소 방전전압을 1mm에서부터 10mm까지 변화의 형태를 그림 8에 나타내었다. 전극 거리가 멀어짐에 따라 최소 방전 전압도 상승하는 것을 볼 수있다. 본 실험에서는 콘덴서의 내압이 10kV이기에 전극거리를 10mm이상으로 거리를 변화시켜주면, 방전이 일어나지 않으므로 측정이 불가능했다. 1mm에서 최소 방전 전압은 2800V로 시작하여 전극거리에 따른 최소 방전전압이 선형으로 증가하는 것을 보여주었다. 이 그림은 방전이 일어날 수 있는 한계 거리를 나타낸것으로, 인체에 전압이 9000[V]까지 충전된 경우, 10mm 이내로 다른 물체에 접근하지 않는다면, 방전은 발생하지 않으므로 위험성이 없다고 볼수 있다.

또한 전압변화에 따른 방전에너지의 변화로서 two-body모델의 이론값과 실험에 의한 측정치의 비교는 그림9에서 보여주었다. 그림 9는 body 사이의 거리를 1mm로하고 body2의 반경은 1.32cm로한 이론값과 콘덴서를 이용한 실험값의 변화에 따른 방전에너지를 보여준 것으로 비교적 두 값이 거의 일치한다. 보통 작업장에서 많이 사용하는 가스는 메탄, 에탄, 프로판등으로서 이 가스의 최소 점화에너지는 0.25~0.3mJ임을 고려할때, 방전 전압이 4500V이상이 되면 방전에너지가 1mJ 이라는 큰 방전에너지가 나온다는 것을 알수 있다. 더욱이 실제 작업장에서 인체 대전 전위는 수천에서 수만볼트까지 충전되므로 인체가 다른 물체에 방전하는 경우 정전기 위험성은 상당히 크다고 볼 수 있다.

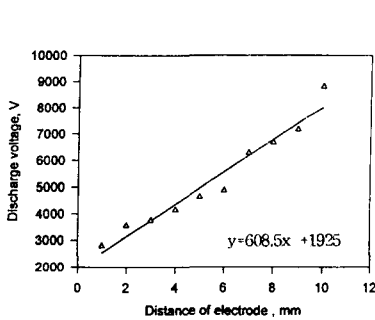


Fig. 8 전극거리에 따른 최소 방전 전압

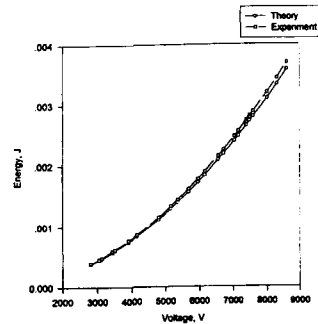


Fig. 9 전압변화에 따른 방전에너지

## 6. 결론

본 논문은 인체에 대전된 정전기의 방전 위험성을 해석하기 위하여 two-body 모델의 개념을 이용한 연구로써 인체와 근접 물체간의 거리와 정전용량을 측정하여 동일한 정전용량을 갖는 두 개의 구로 정의하였다. 맥스웰 방법(Maxwell's method)을 이용하여 물체의 전위(차), 방전 파형 및 방전 에너지를 계산함으로써 방전 현상을 해석하였다. 그 결과 전위차는 Case I(비접지 충전인체, 비충전 비접지물체)에서 인체에 비해 body 2의 크기가 작은 경우에 큰 전위차값이 나타났고, Case II(비접지 충전인체, 비충전 접지물체)에서는 반대의 결과를 얻었다. 이와같이 전위차가 크다는 것은 방전의 가능성이 상대적으로 높음을 나타낸다. 본 논문에서는 인체의 정전기 방전 위험성을 3차원 그래프를 통하여 평가할 수 있는 프로그램을 개발하였으며 실험을 통하여 이에 타당성을 검증하였다. 본 연구는 인체와 근접물체간의 방전현상을 모델링하였으나, 인체가 아닌 물체들간의 방전현상에 대해서도 적용가능하다. 사업장에서 정전기의 방전 위험성을 진단하고 복잡한 계측기 없이 정전기 재해의 가능성을 예측함으로써 정전기 사고에 대한 예방진단의 측면에서 매우 중요하다고 사료된다. 그러나, 습도나 근접접지체등과 같은 주변 환경에 대한 정확한 해석 이론의 개발 과 방전 경로의 규명, 경로임피던스의 정확한 측정을 통한 방전 에너지의 해석에 관한 지속적인 연구와 관심이 요구된다.

## 참고 문헌

- [1] Owen J. McAteer, "Electrostatic discharge control"  
Mcgraw-hill book company, pp169-202, 1990
- [2] Neil Sclator, "Electrostatic Discharge Protection for Electronics", TAB.  
professional and reference books, pp.94, 1990.
- [3] G.Theodore Dangelmayr, "ESD Program Management", VNR, 1990
- [4] Y. L. Chow and M. M. Yovanovich, "The shape factor of the capacitance  
of a conductor, "J. Applied Physics, vol. 53, no. 12, pp. 8470-8475, 1982.
- [5] W. D. Greason, "Analysis of the Charged/Discharged Processes for the  
basic ESD Model". IEEE Trans. Ind. Appl. vol.29, 1993