

## 고에너지전자에 의한 유전체의 깊은층 충전전기마당모의계산

한경임, 정연성, 최충직

고에너지전자에 의한 유전체의 깊은층충전과 방전효과는 표면대전현상과 함께 위성사고의 중요한 원인의 하나로 되고있다.[1, 2]

위성매질의 깊은층충전과 방전현상에 대한 연구[3]는 위성의 운행궤도에서 깊은층충방전효과를 검출분석하는 방법과 지상모의실험장치를 리용한 시험, 깊은층충방전리론모형에 기초한 수값모의실험을 통하여 진행되고있다.

본문에서는 쏘임유도전도모형[4]에 기초하여 고에너지전자에 의한 유전체내부에서의 깊은층충전과 그에 의한 내부전기마당계산방법을 고찰하고 테플론재료의 두께와 시간에 따르는 내부전기마당의 변화특성을 평가하였다.

### 1. 계 산 모 형

평판형유전체매질에 수직으로 고에너지전자가 입사하는 경우 매질의 깊은층충전전기마당의 세기  $E$ 는 쏘임시간  $t$ 와 매질층깊이자리표  $x$ 의 함수로 표시된다.

직각자리표계안에 두께가  $d$ 인 유전체매질층에 고에너지전자가  $x$ 축방향으로 입사할 때 입사방향의 매질면을 정면으로, 다른쪽 면은 뒤면으로 설정하고 매질층의 뒤면은 접지되었다고 가정하였다.(그림 1)

그림 1에서 구역 1은 전자쏘임에 의하여 전하가 침적되고 유전체의 전도도가 고유전도도와 쏘임유도전도도에 의하여 결정되는 구역이고 구역 2는 전자의 최대주행거리를 초과하는 구역으로서 전자의 쏘임이 없으므로 유전체의 전도도가 고유전도도에 의해서만 결정되는 구역이다.

유전체의 정면( $x=0$ )에 입사하는 전자흐름의 세기를  $\varphi(0)$ , 접지면에서의 전자흐름세기를  $\varphi(d)$ , 유전체내부에서의 전자흐름세기를  $\varphi(x)$ , 전기마당의 세기를  $E(x, t)$  라고 하면 가우스정리로부터 유전체내부에서의 전기마당방정식을 다음과 같이 쓸수 있다.

$$\frac{dE(x, t)}{dt} = \frac{1}{\varepsilon} \{ e[\varphi(0) - \varphi(x)] - \sigma(E(x, t), \varphi(x)) \cdot E(x, t) \} \quad (1)$$

여기서  $e$ 는 전자의 전기소량,  $\sigma$ 는 재료의 전도도,  $\varepsilon$ 은 재료의 상대유전률이다.

립자쏘임을 받는 환경에서 재료의 전도도는 쏘임세기와 온도, 전기마당세기의 영향을 고려하여 평가하여야 한다.

립자쏘임을 받을 때 재료의 전도도는 재료의 고유전도도  $\sigma_0$ , 쏘임유도전도도  $\sigma_r$ , 재료

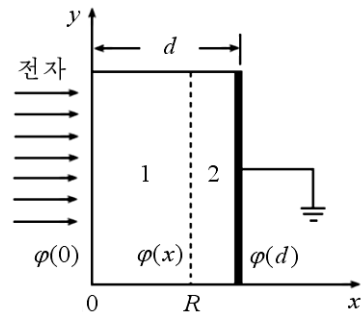


그림 1. 유전체의 전자쏘임  
1-쏘임구역, 2-압전도구역

내부전기마당에 의한 전도도변화량  $\sigma_E$ 의 합으로 표시된다.

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_r + \sigma_E \quad (2)$$

쪼임유도전도도  $\sigma_r$ 는 전하축적에 의하여 재료의 전도도가 증가하는 몫을 표시하는데 그 크기는 쪼임선량을  $\dot{D}$ 에 관계된다.

$$\sigma_r = k_p \cdot \dot{D}^\Delta \quad (3)$$

식 (3)에서  $k_p$ 는 재료에 관계되는 쪼임상수,  $\Delta$ 는 온도에 관계되는 무차원지수로서 0.5~1의 값을 가지며 쪼임선량을  $\dot{D}$ 는 다음과 같다.[4]

$$\dot{D} = k_r \cdot \gamma \cdot e \cdot \varphi(x) \quad (4)$$

여기서  $k_r$ 는 상수로서  $k_r = 1.92 \cdot 10^5 \text{ Gy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{A}^{-1}$ 이고  $\gamma$ 는 기하인자로서 평판매질에 대하여  $\gamma = \int_0^{\pi/2} 2\pi \sin \theta \cdot \cos \theta d\theta = \pi$ 이다.

고에너지전자쪼임에 의하여 재료의 깊은층에 전하축적이 이루어지면 내부전기마당 세기가 증가하므로 재료의 전도도가 증가하고 그로 인한 루실전류에 의해 발열로 생기는 온도변화가 호상 련관되어 전도도에 영향을 준다. 그러므로 식 (2)에서 전기마당세기와 온도에 의한 전도도변화를 표시하는  $\sigma_E$ 는 전기마당세기  $E$ 와 온도  $T$ 의 함수로 다음과 같이 표시된다.

$$\sigma_E = \sigma_T \left[ \frac{1}{3} \left( 2 + \text{ch} \frac{\beta E^{1/2}}{2kT} \right) \right] \cdot \left( \frac{2kT}{eE\delta} \text{sh} \frac{eE\delta}{2kT} \right) \quad (5)$$

$$\sigma_T = \frac{\text{일정}}{kT} \exp \left( -\frac{E_a}{kT} \right) \quad (6)$$

여기서  $\beta = (e^3 / \pi \epsilon)^{1/2}$ ,  $\delta = 1 \text{ nm}$ ,  $k$ 는 볼츠만상수,  $E_a$ 는 활성화에너지이다.

식 (1)과 (2)로부터

$$\frac{dE(x, t)}{dt} = \frac{1}{\epsilon} \{ e[\varphi(0) - \varphi(x)] - [\sigma_0 + \sigma_r(\varphi(x)) + \sigma_E(E(x, t), T)] \cdot E(x, t) \} \quad (7)$$

를 얻을수 있다. 이 방정식은 시간  $t$ 와 매질층의 깊이  $x$ 에 관한 계차그물을 구성하여 수치풀이방법으로 임의의 매질층깊이와 시간에 따르는 전기마당의 세기  $E(x, t)$ 를 구할수 있다. 계차풀이는 다음과 같다.

$$E(x, t + \Delta t) = E(x, t) + \frac{\Delta t}{\epsilon} \{ e[\varphi(0) - \varphi(x)] - [\sigma_0 + \sigma_r(\varphi(x)) + \sigma_E(E(x, t), T)] \cdot E(x, t) \} \quad (8)$$

전자쪼임이 없는 경우 유전체재료내부에는 전하가 존재하지 않으므로 전기마당이 생기지 않으며 초기조건은  $E(x, 0) = 0$ 이다.

## 2. 계산결과와 분석

$E(x, t)$ 를 결정하기 위한 계차그물에서 유전체재료층의 깊이에 따르는 전자흐름세기  $\varphi(x)$ 를 MCNP5를 리용하여 계산하고 시간계차식 (8)에서 초기조건  $E(x, 0) = 0$ 을 리용하여  $(x, t)$ 마디점들에서의 전기마당세기를 계산하였다. 유전체재료는 위성재료로 많이 리용되고있는 테플론을 선택하고 그것에 입사하는 전자의 에너지는 2MeV, 입사면에서 전자의

흐름세기는  $\varphi(0)=1.2\cdot 10^7\text{개}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 으로 하였다.

계산에 리용한 테플론재료의 특성값들은 표와 같다.

표. 테플론재료의 특성값				
상대 유전률	고유전도도 $/(\Omega^{-1}\cdot\text{m}^{-1})$	조임상수 $/(\text{s}\Omega^{-1}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{Gy}^{-1})$	밀도 $/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	절연파괴전압 $/(\text{V}\cdot\text{m}^{-1})$
2.1	$10^{-16}$	$1.6\cdot 10^{-12}$	2.15	$4\cdot 10^8$

테플론재료에 에너지가 2MeV인 단색전자가 입사할 때 재료의 투과깊이에 따르는 전자흐름세기  $\varphi(x)$ 의 변화는 그림 2와 같다.

그림 2에서 보는바와 같이 테플론재료에서 2MeV전자의 최대주행거리  $\sim 0.5\text{cm}$  근방에서 전자의 흐름세기는 0으로 낮아진다.

테플론재료의 깊이가 각각 0.12, 0.24, 0.36, 0.48cm인 경우 시간에 따르는 전기마당세기의 변화는 그림 3과 같다.

그림 3에서 보는바와 같이 조임시간이 증가함에 따라 각이한 층깊이에서의 축적전하량은 증가하므로 전기마당의 세기는 초기에 일정한 시간동안 급격히 증가하다가 일정한 시간이 지난 후에는 전하의 축적과 루실이 평형상태에 도달하여 포화에 이른다. 또한 전기마당의 세기는 투과깊이가 작은 위치에서 빨리 포화에 도달하며 보다 깊은 층일수록 포화에 도달하는 시간이 길어진다.

테플론재료에서 매질층의 깊이에 따르는 전기마당세기의 변화는 그림 4와 같다. 재료 내부에 전자가 축적되므로 전기마당세기는 부의 값을 가진다. 그러나 그림 4에서는 전기마당세기의 부호를 고려하지 않고 전기마당세기의 절대크기를 고찰하였다.

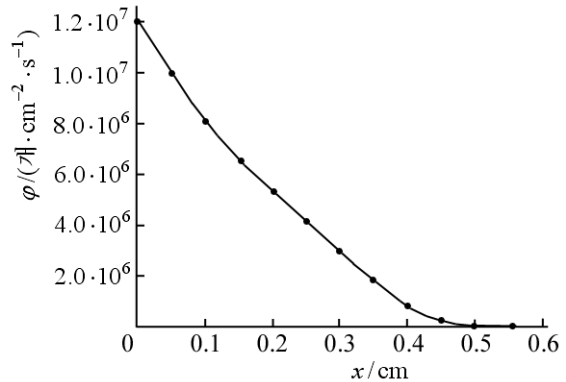


그림 2. 투과깊이에 따르는 전자흐름세기

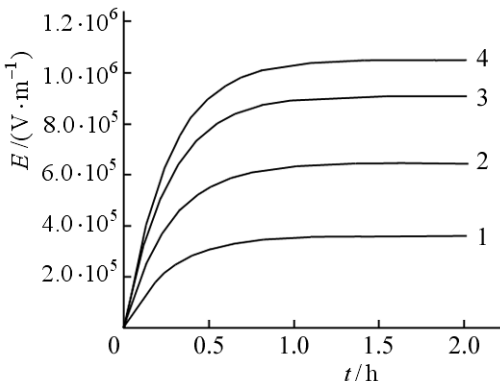


그림 3. 시간에 따르는 전기마당세기의 변화  
1-4는 x값이 0.12, 0.24, 0.36, 0.48cm인 경우

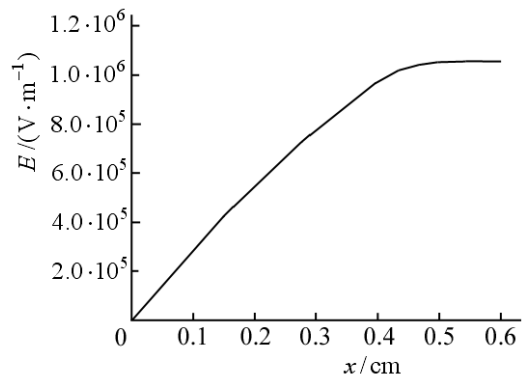


그림 4. 매질층의 깊이에 따르는 전기마당세기의 변화

그림 4에서 보는바와 같이 뒤면에 접지를 연결한 경우 유전체매질속에서 전기마당세기는 매질층의 깊이가 증가할수록 증가하며 최대전기마당의 세기는 뒤면에서 나타난다는 것을 알수 있다. 매질이 얇은 경우에는 일부분의 전자가 매질층을 투과하므로 축적된 전

하량은 제한되고 형성된 최대전기마당의 세기는 비교적 작아진다.

매질의 두께가 두꺼워지면 축적된 전하량이 점차 증가하는데 따라서 매질내부의 최대전기마당세기도 증가한다.

매질의 두께가 주어진 에너지를 전자에 대한 최대주행거리를 초과하면 전자가 매질두께를 투과할수 없으므로 매질속에 축적된 전하량은 최대에 도달하게 된다.

## 맺 는 말

1) 유전체매질에서 고에너지전자조임에 의한 깊은충충전전기마당의 세기는 각이한 매질충깊이에서 시간에 따라 증가하여 포화에 도달하는데 충깊이가 증가할수록 포화에 도달하는 시간이 길어진다.

2) 충전전기마당세기는 매질층의 깊이가 증가할수록 세지며 뒤면접지방식인 경우 최대전기마당의 세기는 매질의 뒤면에서 나타난다.

3) 매질의 두께가 두꺼울수록 최대전기마당세기가 증가하므로 깊은충충전에 의한 방전위험성을 감소시키려면 가능한껏 매질의 두께를 얇게 선정해야 하며 적당한 접지방식을 선택하여야 한다.

## 참 고 문 헌

- [1] H. Fujii; Department of Electrical Engineering, National College of Technology, 22, 493, 2013.
- [2] N. W. Green et al.; IEEE Transations on Plasma Science, 36, 5, 2482, 2008.
- [3] K. Labonte; IEEE Transactions on Nuclear Science, 29, 6, 1650, 1982.
- [4] 李国倡 等; 物理学报, 63, 20, 209401, 2014.

주체107(2018)년 9월 5일 원고접수

## Study on Simulated Calculation of the Deep Charging Electric Field in Dielectrics by Energetic Electrons

*Han Kyong Im, Jong Yon Song and Choe Chung Jik*

We studied the deep charging in the dielectrics and the method to calculate the internal electrical field by energetic electrons based on the radiation induced conductivity(RIC) model.

We evaluated the variable character of internal electric field to the thickness of Teflon and time.

Key words: dielectrics, deep charging, radiation induced conductivity(RIC)