

고분자애자의 표면전하밀도 분포에 관한 연구

양재진*, 황복명*, 김관성*, 이준호**
 *대한전선(주) 기술연구소, **단국대학교 전기공학과

A Study on The Distribution of Surface Charge Density on Polymer Insulators

J.J Yang*, B.M Hwang*, K.S Kim*, J.H Lee**
 *Taihan Electric Wire Co. Ltd R&D Center
 **Dept. of Electrical Eng. Dankook University

Abstract - In this paper, we study the distribution of surface charge density on polymer insulators. The electric field of polymer insulators is calculated by axisymmetric 3-D FEM with dc source. And the surface charge density is calculated by electric scalar potential and boundary condition for electrostatic fields. Simulation model is the inclined type polymer insulator with a shed.

2. 해석 이론

본 장에서는 맥스웰 방정식과 유한요소법을 이용하여 고분자애자 표면의 전하밀도를 계산하는 과정을 기술하였다. 먼저 축대칭 형상을 갖는 고분자 애자의 전계분포를 해석하기 위해 축대칭 3차원 정전장 유한요소법을 도출하였다. 그리고 유한요소법으로 구한 전기스칼라포텐셜과 정전계 경계 조건으로부터 애자 표면의 전하밀도를 구하는 방법을 기술하였다.

1. 서 론

최근 세계적으로 고분자애자는 소형, 경량화 및 유지보수의 장점으로 기존의 자기애자를 대신하여 송배전선로, 전철선로 및 변전기기 등에 급속히 적용, 보급되고 있다.

국내에서도 배전용 및 전철용 애자가 개발되어 실용화되고 있으며 송전급 애자 및 초고압 부상등의 연구, 개발이 활발히 진행되고 있다. 그러나 고분자애자 재료 특성 및 제조공법에 관한 연구는 활발하지만 설계에 관한 기초적 연구가 많이 부족하다.

본 연구에서는 고분자애자 표면의 전하밀도 분포를 맥스웰 법칙과 유한요소법을 이용하여 계산하였다. 고분자애자 표면의 전하밀도 분포는 방전특성을 이해하는데 뿐만 아니라 애자의 정전용량을 계산하기 위한 자료로 활용될 수 있다.

고분자애자 표면의 전하밀도를 구하기 위하여 먼저 애자형상을 고려한 축대칭 3차원 정전계 유한요소법을 이용하여 해석 영역의 전기스칼라포텐셜을 구하였다. 그 결과와 정전장의 경계조건으로부터 애자 표면의 전하밀도를 계산하였다.

해석 모델로서 하나의 경사형 웨드를 갖는 고분자애자를 선정하였다. 그리고 웨드 상부에 도전성 수막이 형성되어 있는 것으로 오손을 모의하여 청정시와 오손시의 고분자애자 표면전하밀도 분포차이를 비교하였다.

2.1 축대칭 3차원 정전장 유한요소해석

시간적으로 계의 변화가 없는 맥스웰 방정식과 보조 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \vec{E} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (2)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (3)$$

여기서, \vec{E} : 전계의 세기 [V/m]

\vec{D} : 전속밀도 [C/m²]

ρ : 전하밀도 [C/m³]

ϵ : 유전율 [F/m]

전기 스칼라 포텐셜 V (V)를 식 (4)와 같이 정의하면, 식 (1), (2), (3) 그리고 (4)로부터 식 (5)와 같은 정전장의 지배방정식을 도출할 수 있다.

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (4)$$

$$\nabla^2 (\epsilon V) = -\rho \quad (5)$$

축대칭 원통 좌표계에서 전기스칼라포텐셜 V 는 $\hat{\theta}$ 방향으로 같은 값이 되므로, 2차원 (r, z) 좌표에서만 고려하면, 식 (5)는 다음과 같다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \epsilon \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon \frac{\partial V}{\partial z} \right) = -\rho \quad (6)$$

위 식 (6)에 Gerlekin법을 적용하여 유한요소정식화를 수행하면 식 (7)과 같은 전기스칼라포텐셜 V 에 대한 대형 행렬방정식이 얻어진다.

$$[K][V] = [Q] \quad (7)$$

여기서 $[K]$ 는 유한 삼각형요소의 기하형상과 물질상수로부터 구해지는 정방행렬이고, $[Q]$ 는 외부에서 주어지는 전하밀도의 열벡터이다. 그리고 $[V]$ 는 구해야 할 미지변수인 전기스칼라포텐셜의 열벡터이다.

한 요소에서의 요소행렬, 요소 전기스칼라포텐셜, 요소 구동항 $[K]^e$, $[Q]^e$ 는 다음과 같다.

$$K_{ii}^e = \iint \epsilon \left(\frac{\partial N_i^e}{\partial r} \frac{\partial N_i^e}{\partial r} + \frac{\partial N_i^e}{\partial z} \frac{\partial N_i^e}{\partial z} \right) 2\pi r dr dz \quad (8)$$

$$Q_i^e = \iint \rho N_i^e 2\pi r dr dz \quad (9)$$

여기서 N_i^e : 요소 e 내에서 i 번째 절점의 형상함수

식 (7)의 대형행렬방정식을 구하여 계산한 각 절점에서의 전기스칼라포텐셜을 이용하여 해석영역내 임의의 점의 전기스칼라포텐셜을 식 (10)과 같이 구할 수 있다.

$$V = \sum_{i=1}^3 V_i^e N_i^e(r, z) \quad (10)$$

여기서 V_i^e : 요소 e 내에서 i 번째 절점의 전기스칼라포텐셜

2.2 전하밀도 계산

전기장에서 두 매질 사이의 전속밀도에 대한 경계조건은 다음과 같다.

$$D_{1n} - D_{2n} = \rho_s \quad (11)$$

여기서 D_{1n} 과 D_{2n} 은 각 매질의 경계에서 전속밀도의 법선 성분을 의미하며, ρ_s (C/m^2)는 표면전하밀도이다. 따라서 식 (11)로부터 다음과 같이 표면전하

밀도를 계산할 수 있다.

$$\rho_s = \epsilon_1 \frac{\partial V_1}{\partial n} - \epsilon_2 \frac{\partial V_2}{\partial n} \quad (12)$$

실제로 유한요소법으로 구한 포텐셜로 전하밀도를 계산할 때에는 애자의 경계를 따라 내부와 외부에서의 전체의 세기를 구한 다음, 여기에 단위 벡터 성분을 취하여 유전율 ϵ 을 각각 곱한 차를 구하면 된다.

3. 적용 사례

본 논문에서 제안한 방법을 모의하기 위하여 그림 1.과 같이 경사형 웨드를 하나 갖는 고분자애자를 모델로 하였다. 그리고 고분자애자의 오손시 표면전하밀도의 분포를 청정시와 비교하기 위하여 오손애자를 그림 1.과 같은 형상에서 그림 2.와 같이 웨드 상에 링 형상의 도전성 수막이 있는 모델로 가정하였다.

웨드 재료의 비유전율은 3으로 하였고, 상부전극에 1[V], 하부전극에 0[V]를 고정경계조건으로 주었다.

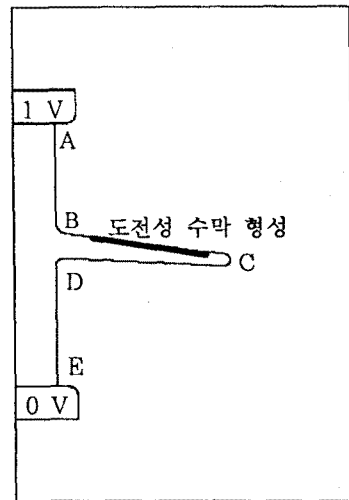


그림 1. 해석모델

유한요소법 적용시 웨드 상부의 도전성 수막은 등포텐셜 경계조건을 적용하여 해석하였다.

그림 3.은 고분자애자의 청정시 등전위선 분포를 도시한 것으로서 등전위선과 거의 일치하는 본 모델의 웨드 형상에서는 오손시의 등전위선분포와 매우 유사한 결과를 얻었다.

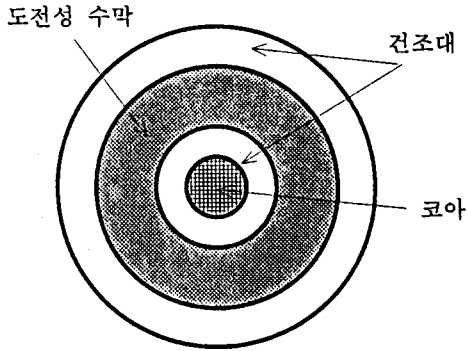


그림 2. 오손애자의 수막 형성

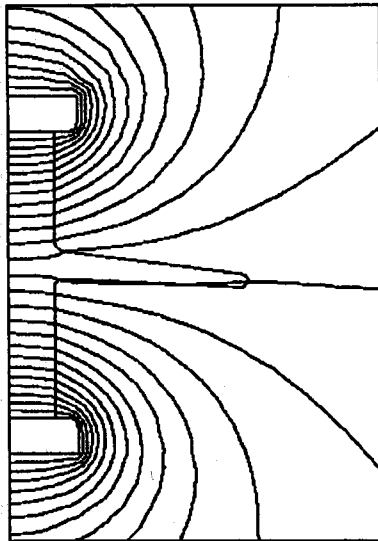


그림 3. 청정애자의 등전위 분포

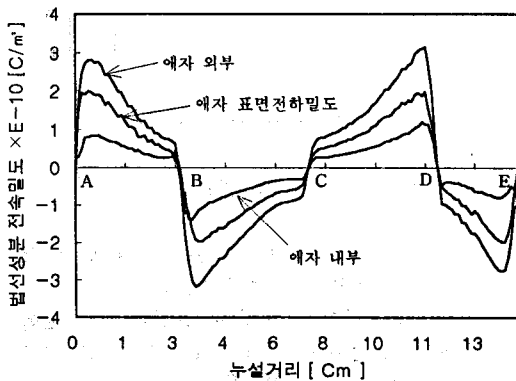


그림 4. 청정애자 표면전하밀도 분포

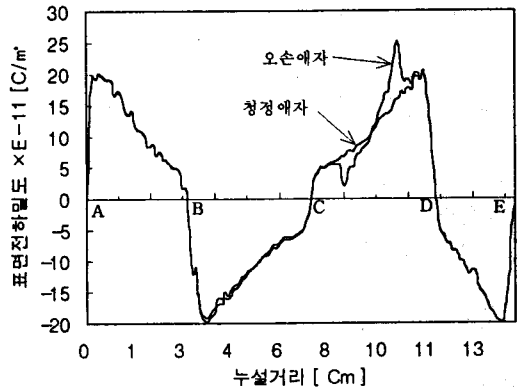


그림 5. 청정시와 오손시 애자 표면전하밀도 비교

그림 4.에서 누설거리인 그림 1.의 ABCDE를 따라 전속밀도와 표면전하밀도를 도시하였고, 그림 5.에서는 오손시의 청정시 전하밀도 분포를 비교하였다.

4. 결론

맥스웰 방정식과 유한요소법을 이용하여 고분자애자 표면의 전하밀도를 계산하는 방법을 제시하였다. 제시한 방법으로 경사형 웨드를 갖는 애자의 청정시와 오손시의 전하밀도 분포를 비교하였다.

앞으로 본 연구에서 계산한 표면전하밀도를 이용하여 복잡한 형상을 갖는 애자의 정전용량을 구하는 연구를 계속 진행할 것이며, 더불어 표면저항을 고려하여 전류누설특성과 정전용량을 동시에 모의하는 연구를 수행하여 고분자 애자 및 부싱등 절연물의 설계에 적극활용할 계획이다.

참고 문헌

- [1] 임달호, "전기계의 유한요소법", 동명사,
- [2] 김형석, 이기식, 한송엽, "표면에 도전율을 갖는 유전체 해석모델의 전계계산에 관한 연구", '95 대한전기학회 하계학술대회 논문집
- [3] 이복용, 이준호, 이기식, "전류가 흐르는 도체의 표면전하밀도 계산", '95 대한전기학회 하계학술대회 논문집
- [4] 이항범, 박일한, 한송엽, "유한요소법을 이용한 애자의 전계해석 및 최적형상 설계", '97 대한전기학회 하계학술대회 논문집
- [5] 김인식, "오염된 평판애자의 직류 플래시오버 메카니즘에 관한 연구" 경북산업대학 논문집, 1992