

3차원 전계해석 기법을 이용한 GIS 삼상 일괄형 스페이스 고찰

강종성, 이방욱, 강성모, 오일성
LG산전

Three-dimensional Analysis for Three-phase Spacers
in Gas Insulated System

J.S. Kang, B.W. Lee, S.M. Kang, I.S. Oh
LG Industrial Systems

Abstract - Recently, as the technology for the development of high voltage power apparatus using SF6 gas has made remarkable progress, it became possible to develop more compact power apparatus adopting single body substation system. In these gas insulated power apparatus, it is impossible to achieve perfect and safe insulation using only SF6 gas, because some solid insulation parts should be installed to support current-carrying conductor parts for electrical and mechanical safety.

When spacers were installed in SF6 gas insulation system, they were exposed to severe electrical intensification which could reduce system insulation performance and restrict the rated operating voltage. So, it is necessary to clarify the dielectric characteristics of spacers by analytically and experimentally, in order to design and develop more compact and optimum gas insulated systems.

In this paper, the field distribution of three-phase spacers were investigated using three dimensional electrostatic field analysis tool adopting BEM method. And the obtained results were compared to the conventional two dimensional computations. According to these three dimensional calculations, it was possible to find out weak points in the spacer more clearly and these results could be applied to design more compact and optimum three phase spacer developments.

1. 서 론

최근 SF6 가스를 이용한 고전압 전력기기는 급속히 발전하여, 변전소 전체를 일체화 하는 것은 물론 기기를 소형 축소화하는 추세에 있다. 이러한 가스절연방식을 채택한 초고압 전력기기에는 SF6가스만으로 전기적 절연을 하는 것은 불가능하며, 고전압 도체부분을 고정시키고 지지하며, 외함의 밀폐를 유지하기 위해 고체절연물이 필요하며, 이것을 스페이스라 부르고 있다.

SF6 가스 중에 스페이스가 존재하면 고전압 절연계통에서 복합유전체를 형성하게 되어 가스만 있을 경우보다 복잡한 현상이 일어나며, 전기적 절연에서 가장 취약한 부분이 되기 쉬우므로 초고압기기의 운전전압은 스페이스의 절연파괴 현상에 제한을 받게 된다. 따라서 초고압기기의 소형 축소화 및 경제적인 절연설계상 스페이스의 연면방전 특성 연구와 아울러 이상적인 스페이스의 형상 결정 및 절연특성에 영향을 미치는 인자에 대한 영향을 파악하는 것은 대단히 중요하다. 이를 위해서는 고전압 전력기기 설계시 전계분포를 수치적으로 해석하는 전계해석이 필요하다.

본 논문에서는 기존의 축대칭을 근사 모의하는 2차원 전계해석 뿐만 아니라, 경계요소법을 이용한 3차원 전계해석 소프트웨어를 이용하여 3상 일괄형 스페이스의 3

차원 전계해석을 수행하였다. 일반적으로 3상 일괄형 스페이스의 경우 축대칭으로 근사하기 어려우나 여러 가지 이유로 인해 기존에는 축대칭 근사모델을 사용해 왔었다. 본 논문에서는 기존의 축대칭 해석모델과 일반 3차원 모델링을 통한 전계해석 결과를 비교해 보았으며, 3차원 전계해석을 통해 수치해석적으로 구한 전계분포를 이용하여 기존 스페이스의 절연 취약부분과 절연파괴전압을 예측할 수 있었으며, 또한 전계집중을 완화하는 형상변경을 고려할 수 있었다.

2. 본 론

2.1 경계요소법의 원리

경계요소법(Boundary Element Method)은 최근 많은 공학분야에 적용되고 있는 수치해석기법 중의 하나이며, 유한요소법이나 유한차분법과 달리 경계 혹은 표면에 해당하는 부분만 이산화가 요구되며, 이러한 경계부분에서만 수치연산이 행해진다.

일반적으로 경계요소법은 다루어야 할 방정식의 수가 유한요소법에 비해 매우 적으므로 사용하는 컴퓨터의 용량이 적어도 무방하며 입력 및 출력자료가 비교적 간단하다는 장점이 있으며, 또한 경계면에서의 거동이 매우 중요한 2차원 및 3차원 해석에 매우 효율적으로 적용될 수 있다는 장점이 있다. 그림 1은 유한요소법과 경계요소법의 요소분할의 차이점을 보여주는데 경계요소법의 요소분할에는 인위적인 경계가 없는 것을 알 수 있다.

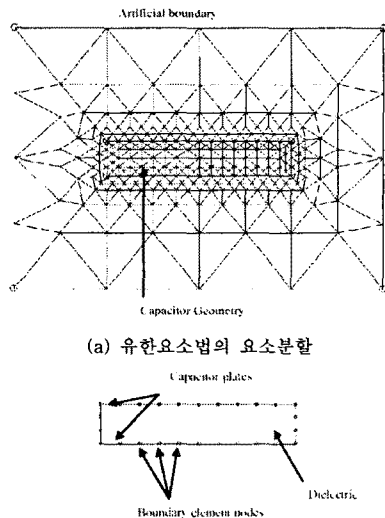


그림 1. 커패시터 모델의 요소분할

경계요소법을 이용한 정전계 해석에는 경계 혹은 표면 을 미소하게 분할하여 각 요소의 전하밀도를 구하는 간 접경계요소법 혹은 표면전하법이 있으며, 전하밀도 대신 에 경계 혹은 표면의 전위와 전계를 적용하여 전장을 구 하는 직접경계요소법이 있다.

경계요소법을 이용한 정전계 수치해석의 지배방정식은 Maxwell 방정식인데, 즉

$$\nabla \times \vec{E} = 0$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_c$$

단, ρ_c 는 체적전하밀도이다.

또한 유전체 혹은 절연체 사이의 경계면에서는 다음과 같은 경계조건을 만족해야 한다.

$$\vec{n} \cdot (\vec{D}_1 - \vec{D}_2) = \rho_s$$

단, \vec{n} 은 매질2에서 매질1의 법선방향 단위벡터이다.

전위 ϕ 는 아래와 같이 정의되므로

$$\vec{E} = -\nabla\phi$$

Green의 함수를 이용하면 전위 ϕ 는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\phi(r) = \frac{1}{\epsilon_0} \left\{ \int_V G(r, r') [\rho_c(r') + \rho'_s(r')] dt' \right. \\ \left. + \int_S G(r, r') [\rho_s(r') + \rho'_s(r')] dt' \right. \\ \left. G(r, r') = \frac{1}{4\pi |r - r'|} \right.$$

본 논문에서는 경계요소법을 이용한 3차원 정전계 해석 소프트웨어인 "COULOMB"를 이용하여 GIS 내부에 사용되는 3상 일괄형 스페이스의 전계를 수치해석으로 구 하였다.

2.2 해석오차

3상 일괄형 스페이스의 전계해석을 수행하기 전에 경 계요소법을 이용한 상용 수치해석 소프트웨어의 해석 정 확도를 살펴보기 위해 수식으로 이미 알려진 두 도체의 배치를 두 종류의 상용 소프트웨어에서 각각 2차원 및 3 차원으로 해석하여 각 경우의 최대 전계값을 비교해 보 았다.

먼저 같은 크기의 두 구도체를 그림 2와 같이 배치한 경우 최대전계값은 아래와 같은 수식으로 표현된다.

$$E_{max} = \frac{0.9V_0}{d} \left(1 + \frac{P}{2} \right)$$

$$0.4 \leq P \leq 14 \quad (P = d/a)$$

또한 두개의 토로이달(toroidal) 도체를 그림 3과 같이 배치한 경우 최대전계값은 아래와 같은 수식이 된다.

$$E_{max} \cong \frac{V_0}{r_1 - r_2} \frac{r_1 - r_2}{r_2 \ln \frac{r_1}{r_2}} \frac{R_{2a} - R_{2i}}{R_{2i} \ln \frac{R_{2a}}{R_{2i}}}$$

표 1은 두 경우의 배치 각각에서 수식 및 해석결과의 비교표를 나타낸다. 2차원 전계해석과 3차원 전계해석의 최대전계값은 서로 비슷한 것을 알 수 있으나, 수식에 의해 계산된 값과는 최대 8% 정도 차이를 보인다. 수식 에 의해 계산된 최대전계값에 비해 낮은 것을 알 수 있 는데, 이는 수식에 의해 계산된 값도 근사값인 것을 고 려하고 두 해석모델의 결과가 비슷한 것을 고려할 때 일 반 3차원 전계해석의 가능성을 보여주는 것으로 생각된 다. 토로이달의 경우에는 3차원 전계해석 결과값이 6% 정도 작게 나타났다.

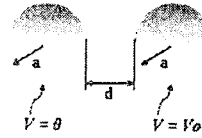


그림 2. 구대구 배치

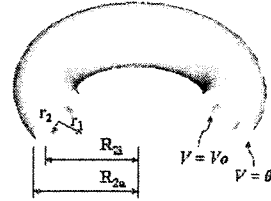


그림 3. 토로이달대토로이달 배치

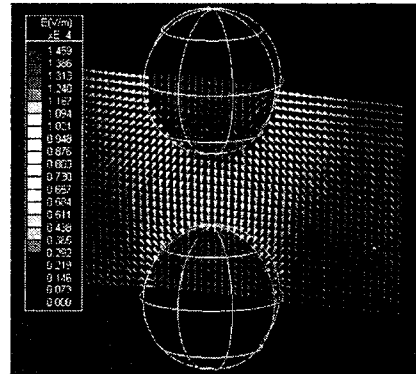


그림 4. 구대구 3차원 전계해석 결과

	sphere [V/m]	toroidal [V/m]
수식	13500	15434.5
2차원 해석	14253 (106%)	15447 (100%)
3차원 해석	14590 (108%)	14580 (94%)

표 1. 최대전계값 비교

2.3 삼상 일괄형 스페이스 전계해석

기존에 알려진 스페이스 형상에 대한 전기적 기본 요 건은 다음과 같으며, 아래의 기본 요건을 만족시키면서 그 크기가 최소가 되도록 설계하기 위해서는 수치 전계 해석을 이용한 절연물과 전극현상의 최적화 설계기법의 적용이 필요하다. 또한 스페이스 에폭시 수지물에 대한 설계기준 전계강도를 만족시키는 형상을 얻기 위해서 3 차원 전계해석 소프트웨어를 이용하여 삼상 일괄형 스페 이스의 전계분포를 살펴보아야 한다.

- 1) 연면방전 특성을 개선시키기 위해 스페이스의 표면에서 최대전계값이 도체부에서의 최대전계값보다 낮아야 하며, 표면의 연면전계 성분은 균등한 분포를 이루어야 한다.
- 2) 스페이스의 절연부와 도체와의 접촉 계면에서의 접촉 각의 영향을 피하기 위해 도체부와 절연부는 직각으로 접촉되도록 설계되어야 한다.
- 3) 스페이스에서 가장 취약부분인 도체부와 절연부, 그리고 가스공간과의 교차점인 삼중점의 전계를 완화시킬

수 있도록 설계되어야 한다. 이 경우에 대한 대책으로서 내부설치나 미소갭의 설치 등을 들 수 있다.

일반적으로 삼상 일괄형 스페이서의 경우 축대칭으로 근사하기 어려우나 여러 가지 이유로 인해 기존에는 축대칭 근사모델을 사용해 왔다. 그림 5는 삼상 일괄형 스페이서의 한 상을 축대칭으로 근사하여 2차원 전계해석한 결과인데, 2차원 해석결과를 살펴보면 각 절연매질에서의 최대 전계값의 영역을 알 수 있으며, 기존에는 이 영역의 전계값을 기준으로 스페이서를 설계하였는데, 본 연구에서는 일반 3차원 정전계해석을 행하여 그 주요 영역에서의 전계값을 서로 비교해 보았다.

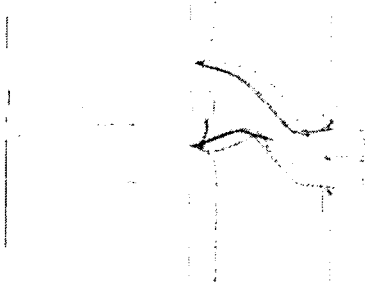


그림 5. 축대칭 근사모델 해석 예

그림 6는 삼상 일괄형 스페이서의 일반 3차원 해석모델의 요소를 분할한 그림이며, 해석 모델은 에폭시 수지 스페이서 및 쉘딩, 도체부, 외함을 고려하였다. 3상 중 한 도체부에만 100V 경계조건을 주었으면, 나머지 도체부 및 쉘딩 외함의 경계조건은 접지로 하였다. 요소분할은 각 부분의 표면에 약 56000개 정도로 하였으며, 그림에서 알 수 있듯이, 에너지가 상대적으로 집중하는 영역에 좀 더 많은 요소가 생성된 것을 알 수 있다.

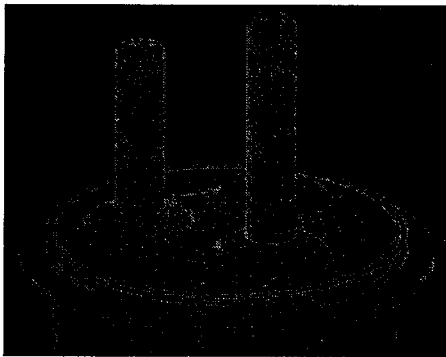


그림 6. 스페이서의 요소분할도

일반 3차원 해석모델의 각 주요 영역에서 구한 전계값은 2차원 축대칭 근사모델에서 계산된 값에 비해 대체적으로 큰 값을 보여 주었는데, 이는 단상의 축대칭 근사로 인해 도체 및 에폭시 수지의 형상이 전계를 완화시키는 방향으로 근사된 것으로 생각된다. 본 해석에서 최대 전계값의 경우 일반 3차원 해석모델의 값과 2차원 축대칭 근사모델의 값은 서로 비슷한 것을 알 수 있었는데, 이는 기존의 2차원 근사해석 모델의 적용가능성을 보여 준다고 사료된다. 본 해석에서 주요 영역에서 구한 전계값은 설계기준에 준하는 것을 알 수 있었다.

하지만 도체부의 접속을 위한 볼트체결부를 고려한 해석모델에서는 2차원 축대칭 근사모델의 경우 볼트체결부에 상당한 전계가 집중하는 것을 알 수 있었다. 이는 무

리한 축대칭 근사로 인해 실제 전계값보다 매우 큰 값을 보여주는 것으로 생각된다. 볼트체결부를 고려한 일반 3차원 해석모델에서는 2차원 해석모델에 비해 작은 최대 전계값을 보여주었는데, 이 최대전계값은 설계기준과 비교하여 형상 변경을 고려하고 있다. 그림 7은 볼트체결부를 고려한 일반 3차원 모델의 해석결과이다.

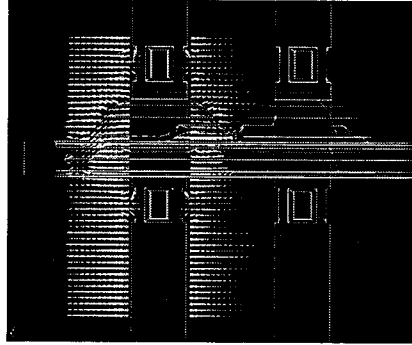


그림 7 볼트체결부를 고려한 해석모델

3. 결 론

경계요소법을 기반으로 하는 3차원 전계해석 소프트웨어를 이용하여 간략한 모델에서 기존의 2차원 전계해석과의 비교를 통해 3차원 정전계해석의 가능성을 확인하였다.

GIS 절연설계에 중요한 부분인 삼상 일괄형 스페이서를 축대칭 2차원 근사모델과 일반 3차원 모델에서 정전계 해석을 수행하였고 주요 영역에서 전계값을 각각 살펴보았다. 주요 영역의 전계값은 대부분 2차원 모델에 비해 3차원 모델의 값이 크게 나왔는데, 이는 2차원 해석모델의 근사에 기인한 것으로 사료되며 3차원 모델의 전계값을 이용하여 스페이서의 설계기준과 비교 검토하였다. 특히 볼트체결부를 고려한 경우는 2차원 해석의 최대전계값은 실제값보다 매우 크게 계산되는 것을 알 수 있었으며, 볼트체결부를 포함하는 해석모델에서는 3차원 해석을 이용하여 설계기준과 비교검토후 형상변경을 고려하였다.

GIS 삼상 일괄형 스페이서에서 경계요소법을 이용한 3차원 정전계해석을 수행한 결과를 이용하여 삼상 스페이서와 같은 비대칭 절연물에 대한 전계해석에서 3차원 정전계해석이 유용하게 사용될 수 있음을 알 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] D.I Yang et. al, "Reliability of epoxy spacer for EHV class gas insulated switchgear", IEEE 7th. International Conference on Appl.Superconductivity, Vol. 7, NO. 2, , pp 828-831 June 1997
- [2] J. Lopez Rolda et. al., "Experience Using the Boundary Element Method in Electrostatic Computations as a Fundamental Tool in High Voltage Switchgear Design". IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Washington DC, WA, USA, June 1998
- [3] S. S. Bamji et. al., "Electric Field Calculations with the Boundary Element Method", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Ottawa, ON, Canada, February 1993.