

연성해석을 이용한 초고압 모선부 온도 상승 예측 기술

윤정훈, 안희섭, 최종웅, 오일성
(주) LS 산전

An Estimation Technology of Temperature Rise in GIS Bus Bar using Three-Dimensional Coupled-Field Multiphysics

Jeong-Hoon Yoon, Heui-Sub Ahn, Jongung Choi, Il-Sung Oh
LS Industrial Systems

Abstract -This paper shows the temperature rise of the high voltage GIS bus bar. The temperature rise in GIS bus bar is due to Joule's losses in the conductor and the induced eddy current in the tank. The power losses of a bus bar calculated from the magnetic field analysis are used as the input data for the thermal analysis to predict the temperature. The required analysis is a couple-field Multiphysics that accounts for the interactions between three-dimensional AC harmonic magnetic and fluid fields. The heat transfer calculation using the fluid analysis is done by considering the natural convection and the radiation from the tank to the atmosphere. Consequently, because temperature distributions by couple-field Multiphysics (coupled magnetic-fluid) have good agreement with results of temperature rise test, the proposed couple-field Multiphysics technique is likely to be used in a conduction design of the single-pole and three pole-encapsulated bus bar in GIS.

1. 서 론

최근의 가스절연개폐장치는 고효율 및 소형화의 추세에 따라 크기와 무게가 감소하고 있지만 반면에 단위체적당 열 발생률은 점차 증가하는 추세이다[1]. 모선부는 정상상태에서 가스절연개폐장치가 허용할 수 있는 최대 정격전류를 결정하는 데 가장 중요한 역할을 하는 구성 요소이며, 이에 따라 설계 시 모선부의 열적성능에 대한 평가는 필수적이다. 통전 시 모선부에서 발생하는 열원은 크게 3가지로 구분된다. 도체의 줄손, 탱크에 유도되는 와전류손, 도체의 접촉저항에 의한 손실 등이다. 이와 같은 모선의 열 손실 평가 및 온도상승을 예측하기 위해 다양한 선행 연구가 진행되어 왔다. 최근까지 많이 적용되었던 방법은 도체 및 탱크에서 발생하는 열손실을 2차원 전자계해석으로부터 구하고, 1차원 열 회로망 방법을 이용하여 열 손실을 계산하여 온도상승을 예측하였다[1],[2],[3]. 도체 및 탱크 주위에 발생하는 SF₆가스 및 외부공기의 유동은 대류 열전달계수를 이용하여 모델링을 하였으며 에너지 평형방정식을 반복 계산함으로써 최종적인 온도를 구하였다. 이와 같은 방법은 짧은 시간에 모선부의 전체적인 온도특성을 간략하게 파악할 수 있다는 장점이 있는 반면에 3차원 형상을 고려할 수가 없으며, 이에 따라 국소적인 위치에서의 온도 특성 및 최적화된 디자인을 결정하는데 사용하기에는 한계가 존재한다. 본 연구에서는 이러한 열손실들과 열 유동을 각각의 상용프로그램을 이용하여 3차원으로 계산하고 각각의 프로그램에서 필요한 데이터들을 수렴할 때까지 반복계산을 수행함으로써 초고압 모선부의 온도상승을 예측하였다. 또한 해석결과와 시험결과를 비교함으로써 해석모델에 대한 검증은 하였으며, 또한 도체와 탱크의 사이즈 및 재질 선정 등 통전설계에 이용하기 위한 3차원 모델을 개발 예정이다[4],[5].

2. 본 론

2.1 전자계 해석을 위한 지배 방정식

교류전류가 삼상도체에 인가되었을 때, 도체에 흐르는 전류와 탱크에 유도되는 전류는 정상상태의 맥스웰방정식과 자기 벡터 포텐셜 \vec{A} 와 스칼라 포텐셜 V 를 사용하여 계산되어진다[6].

$$\nabla \times \nu \nabla \times \vec{A} - \nabla \nu \nabla \cdot \vec{A} = \vec{J}_s \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \left(-\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \sigma \nabla V \right) = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times \nu \nabla \times \vec{A} - \nabla \nu \nabla \cdot \vec{A} + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \sigma \nabla V = 0 \quad (3)$$

2.1.1 표피 효과 및 열손실

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} \quad (4)$$

전자계에서는 교류신호가 어떤 매질(도체나 손실유전체)을 진행할 때 식(4)와 같이 주파수, 도전율, 투자율에 따라 교류신호가 내부로 깊이 침투해 들어가지 못하고 그 표면에 집중되는 현상을 표피효과라 하며 전류가 도체를 흐를 때 그 표면으로부터 표피두께에 집중되어 흐르게 된다. 본 연구에서도 전자계해석 시 표피두께에 따라 흐르는 전류를 계산하여 식 (5)에 적용하여 열손실을 해석하였다.

$$Q' = \text{Re} \left(\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [p] \{J\} \cdot \{J^*\} \right) \quad (5)$$

2.2 유동해석을 위한 지배 방정식

정상상태 지배방정식은 방정식은(6),(7),(8)과 같으며 부력에 의한 자연대류를 고려하기 위해 Boussinesq approximation을 사용하였다[7],[8]. 전류에 의한 도체의 줄손실, 유도전류에 의한 와전류손은 에너지 방정식의 생성항에 포함된다.

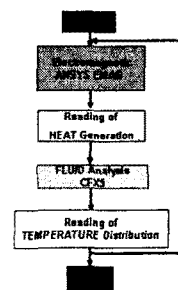
$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_m} \left(\rho u_m u_i + p \delta_{mi} - \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_m} + \frac{\partial u_m}{\partial x_i} \right) \right) = S_i'' \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_m} \left(\rho u_m T - k \frac{\partial T}{\partial x_m} \right) = S^T \quad (8)$$

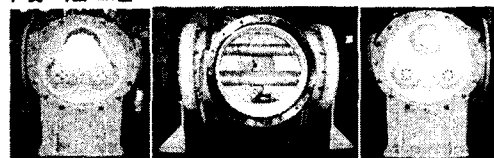
2.3 연성해석

3차원 전자계해석과 열 유동해석을 사용하여 연성해석 함으로써 초고압 GIS 모선부의 온도상승을 예측하는데 사용하였다. 그림 1은 연성해석의 흐름도를 나타내고 있다. 한 개의 격자를 통해 연성해석을 수행함으로써 데이터 변환 시 발생하는 수치적 오차를 줄일 수 있어 해석 모델 각 부분을 분석하는데 유용하게 사용할 수 있다.



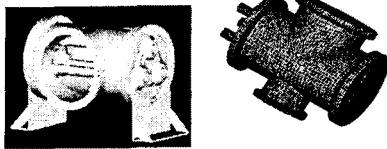
<그림 1> 연성해석에 사용되는 프로그램의 흐름도

2.4 해석 및 시험 모델



<그림 2> 온도상승시험에 사용한 모델

실험 및 해석 모델은 그림 2,3과 같으며 삼상모선에 60[Hz], 2000A, 4000A를 인가하여 IEC규격에 따라 실험을 하였다. 해석 모델의 격자생성 개수는 2,055,947이며 노드개수는 3,053,380이 해석에 사용되었다.



〈그림 3〉 연성해석에 사용되어진 모델 및 요소분할

2.5 접촉부 모델링

접촉부의 열접촉 저항 모델링은 전기기기의 열 해석 시 중요한 요소 중의 하나이다. 접촉부를 통과하는 전류는 통전면적이 작아지므로 발열량이 급격히 증가하게 된다. 따라서 전력기기의 접촉부는 전류통전에 의한 발열 및 열 저항을 동시에 고려할 수 있도록 모델링이 되어야 한다. 접촉저항을 계산하는 다양한 수학적 모델이 있지만 본 연구에서는 측정된 접촉부의 전기저항으로부터 식 (9)를 사용하여 실제 접촉면적을 계산하였다. 그림 4에 실제 접촉부의 형상과 해석 모델의 접촉부의 예를 도시하였다. 그림 4에 나타난 바와 같이 계산된 실제 접촉면적은 겉보기 면적의 5%이하였으며, 이 결과는 일반적으로 알려진 결과와 유사하였다[9].

$$R_m = \rho_c \frac{l}{A_c} \quad (9)$$



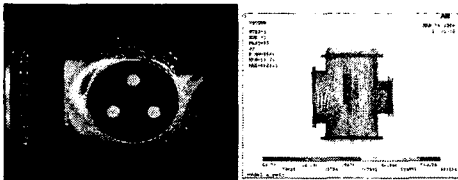
〈그림 4〉 연성해석에 사용되어진 접촉부(A-spot)

2.6 해석조건

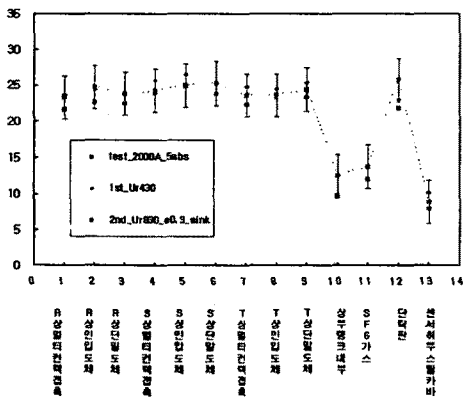
탱크 외부와 주위 공기와의 유동을 고려하기위해 전체 표면에 Opening 경계조건을 사용하였다. 탱크 외부 표면에서 발생하는 복사 열 전달을 고려하기 위해 방사계수를 변화($\epsilon:0.0\sim0.9$)시켜서 적용하였다. 알루미늄이나 구리 도체의 경우 방사계수의 크기가 약 0.01이므로 내부 도체와 탱크 내부 표면 사이의 복사 열전달은 무시하였다. 실험 시 사용되는 연결 동 부스바의 열전도에 따른 열손실도 고려하였다. 탱크의 비투자율은 430, 830을 사용하였다. 탱크에 유도되는 와전류손을 정확히 계산하기 위해서 비투자율을 측정하여 사용하였다.

3. 실험결과 및 해석 결과 비교

그림 5는 ANSYS를 사용하여 계산되어진 탱크에 분포되어 있는 와전류와 CFX를 통한 공기와 가스중의 속도분포를 나타내고 있다. 유동속도는 내부가스 약 0.05m/s, 외부공기 약 0.3~0.4m/s의 계산결과를 나타내고 있다.

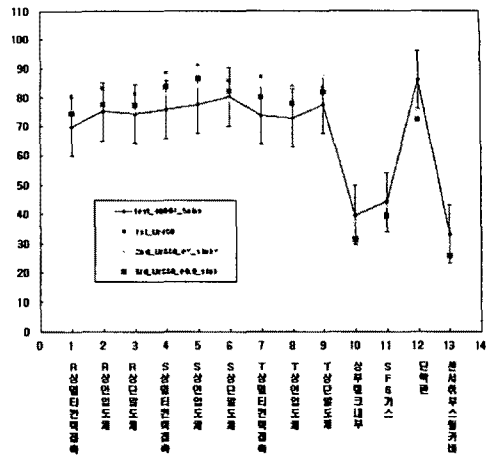


〈그림 5〉 CFX(좌측)와 ANSYS(우측)의 속도분포와 와전류 분포



〈그림 6〉 2000A, 5bar(절대압력), 60[Hz]삼상 모선부 해석결과와

실험결과 비교



〈그림 7〉 4000A, 5bar(절대압력), 60[Hz]삼상 모선부 해석결과와 실험결과 비교

2000[A], 60[Hz], 5[bar](절대압력)에 대한 실험결과와 해석결과를 비교하여 그림 6에 나타내었으며 그림 7에는 4000[A]에 대한 결과들을 비교하였다. 그림 6, 7의 Y축 오차막대는 각각 $\pm 3^{\circ}\text{C}$, $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 를 표시하고 있다. 비투자율(Ur)과 방사계수(ϵ)의 변화와 실험용 연결 부스바의 열손실의 고려 유무에 따른 해석결과들을 비교하였다. 위와 같은 비교는, 실제 물리적인 현상들을 해석조건에 포함시켜 실험결과와의 오차를 줄이고자 하는 목적에서 수행하였다. 2000[A], 4000[A] 두 경우 모두 실험결과와 정성적인 경향은 잘 일치하는 것을 볼 수 있으며, 실험값 비교 최대 상대오차는 2000[A]의 경우 12%, 4000[A]의 경우는 17%이다.

3. 결 론

본 논문에서는 3차원 연성해석을 통해 초고압 GIS모선부의 온도상승 예측을 하였다. 상용프로그램인 ANSYS와 CFX를 사용하였으며 하나의 생성된 격자를 통해 계산을 하였다. IEC규격에 따라 2000[A], 4000[A]의 실험을 수행하여 시험용 챔버의 각 부분들의 측정 데이터와 해석결과를 비교하였다. 그 결과, 패턴의 유사성을 나타냈으며, 2000[A]는 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 의 오차범위 안에서 일치하는 결과를 나타내었다. 향후 물성치 변화에 따른 온도상승 특성과 접촉부 모델링 방법, 생성할 격자의 간격, 방사계수측정 등 많은 연구들을 통해 임의의 3차원 형상에 대해서도 정밀도가 높은 프로그램을 개발할 예정이다. 다양한 조건에서 해석한 결과를 데이터 베이스화하여 초고압 GIS모선부 통전설계 시 사용할 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Fitzgerald, C., Jones, S., Kunze, D., Paton, D and Waymark, M., 2004, "A Compact, High Capacity 330kV Substation for the System Sydney CBD," Cigre 2004, B3-203
- [2] W. S. Kim, H. H. Kim, S. C. Hahn, B. Y. Lee, K. Y. Park and I. H. Shin, 2002, "Coupled Finite-element-analytic Technique for Prediction of Temperature Rise in Power Apparatus," IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 38, No. 2, pp. 921~924
- [3] M. Moallem and R.Jafari "Transformation method in the coupled FE Magneto-thermal field" IEEE Trans. Magnetics, vol. 34, NO. 5, September 1998.
- [4] S. W.Kim, H.H.kim, S.C.Hahn, "Coupled finite-element-analysis technique for prediction of temperature rise in power apparatus" IEEE Trans. Magnetics, vol. 38, NO.2, March. 2006
- [5] M. Moallem and R.Jafari "Transformation method in the coupled FE Magneto-thermal field" IEEE Trans. Magnetics, vol. 34, NO. 5, September 1998.
- [6] OSZKAR BIRO and KURT PREIS "On the Use of the Magnetic Vector Potential in the finite element analysis of three-dimensional eddy currents" IEEE Trans. Magnetic, vol. 25, NO.4, July. 1989.
- [7] Kraus, A. D and Bar-Cohn, A. , "Thermal analysis and Control Electric Equipment", 1983
- [8] IEC-60943, "Guidance concerning the permissible temperature rise for parts of electrical equipment, in particular terminals", 24th edition, 1998
- [9] Slade, P. G, 1999. "Electric Contacts," Marcel Dekker, Inc, New York