

## 자계-열계를 결합한 초고압 GIS용 모선의 온도상승 예측

김종경, 민경조, 김한균, 한성진  
동아대학교 전기공학과

### Prediction of Temperature Rise in EHV GIS Bus Bar by Coupled Magneto-Thermal F.E A

Joong Kyoung Kim, Kyung Jo Min, Han kyun Kim, Sung Chin Hahn  
Dept. of Elec. Eng. Dong-A Univ.

**Abstract** - This paper presents a new magneto-thermal finite element analysis for predicting the temperature rise of the EHV GIS bus bar. The power losses of a bus bar calculated by the magnetic field analysis are used as the input data to predict the temperature rise for the thermal analysis. The heat-transfer coefficients on the boundaries are analytically calculated by applying the Nusselt number considering material constant and model geometry for the natural convection. The temperature distribution in a bus bar by coupled magneto-thermal finite element analysis shows good agreement with the experimental data.

### 1. 서 론

최근 들어 우리나라의 전력수요가 경제성장과 함께 매년 증가함에 따라 에너지 저감형 고효율 및 환경 친화적인 초고압 전력기기의 수요가 증가하고 있으며, 이에 따라 경제성을 향상시키고 환경문제에 보다 능동적으로 대처하기 위해서 적극적으로 고전압 대용량화, 소형 축소화 기술이 개발되고 있다. 초고압 GIS의 경우 차단부와 CT를 동일 용기 내에 넣거나, 차단기, 단로기, 모선 등을 3상 일괄하는 방법에 의해 소형 축소화를 시키고 있다. 그러나 다양한 분야의 전력에너지 변환기기들이 개발되고 있는 추세에서 고전적 방법에 의한 전력기기의 설계 및 해석기술은 한계가 있다. 특히 초고압 전력기기는 제품의 성능과 품질이 설계/ 소재/ 가공/ 조립기술에 크게 영향을 받으며, 설계기술의 비중이 절대적이다. 그리고 초고압·대용량의 전력기기일수록 고도의 기술을 필요로 한다. 이러한 초고압 GIS용 모선의 기초 설계기술에는 절연설계와 통전설계가 있으며, 특히 초고압 GIS용 모선의 통전설계시 주도체의 지름, 탱크의 지름, 탱크의 두께, 재질 등의 설계 파라메터들을 결정해야 하는데 이는 절연적 제한요소보다 열적 제한요소가 더 큰 영향을 주는 것으로 보고되고 있다. 따라서 전류통전시 초고압 GIS용 모선의 내부 및 외부탱크의 온도상승을 정확히 예측하는 것이 매우 중요하다. 그러나 온도상승을 예측하기 위하여 열해석을 할 때 해석모델의 각 경계면에서 열전달계수를 정확히 적용하는 것은 상당히 어렵다[1~4].

본 논문에서는 자계해석을 통해 주도체의 출순과 외부탱크의 외류순을 계산하여 열원으로 하고, 물질 상수, 해석 모델의 형상 등을 고려한 Nusselt Number를 이용하여 자연대류 열전달계수를 해석적으로 구한다. 이를 유한요소법과 결합함으로써 새로운 자계-열계가 결합된 초고압 GIS용 모선의 온도분포 예측기법을 다룬다. 또한 온도에 따라 변화하는 전기적 저항과 열전달계수를 고려함으로써 온도해석의 정확도를 높이고자 하였다. 이 기법을 실제 모델에 적용한 결과, 온도분포 특성이 실제 측정값과 거의 일치하였다.

### 2. 자계해석

#### 2.1 정자계 지배방정식

모선에 정상 교류전류가 흐를 때 준정상 맥스웰 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3)$$

식(3)으로부터 자속밀도  $\vec{B}$ 는 자기 벡터 포텐셜  $\vec{A}$ 를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} = \mu \vec{H} \quad (4)$$

식(1)으로부터 지배방정식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times \vec{A}) = \vec{J} = \vec{J}_s + \vec{J}_e \quad (5)$$

여기서,  $\vec{J}_s$ 는 전원전류이고,  $\vec{J}_e$ 는 와전류이다.  
도체에 유기되는 와전류는 다음과 같고,

$$\vec{J}_e = \sigma_e \vec{E} = -\sigma_e \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (6)$$

이로부터 지배방정식은 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times \vec{A}) = \vec{J}_s - \sigma_e \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (7)$$

#### 2.2 발생손실

열적 스트레스를 야기시키는 열원으로 초고압 GIS용 모선의 각 요소의 재질에 따른 손실을 계산하여 온도상승의 원인을 구명해야하며, 주요 발열원으로는 주도체의 출순실과 모선에서 발생한 자속이 외부탱크에 쇄교함으로써 발생하는 와류손 등이 있다. 단위 길이당 도체와 외부탱크의 손실은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P = \int \frac{J^2}{\sigma} dS \quad (8)$$

여기서,  $dS$ 는 전류가 흐르는 미소 단면적이다.

### 3. 열해석

#### 3.1 복사

초고압 GIS용 모선의 온도상승 조건하에서는 고체부분에서만 복사를 고려하고, 실제 복사에 의한 초고압 GIS용 모선표면에서의 열에너지 방출은 미약하다. 표면적이  $A_i$ 과  $A_o$ 이고, 균일한 온도  $T_i$ 과  $T_o$ 로 유지되며,  $\epsilon_i$ 과  $\epsilon_o$ 가 각각 도체 및 외부탱크의 표면 방사율이라고 하면, 이때 복사 열전달률은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q = \frac{\sigma(T_i^4 - T_o^4)}{\frac{1-\epsilon_i}{A_i\epsilon_i} + \frac{1}{A_i F_{12}} + \frac{1-\epsilon_o}{A_o\epsilon_o}} \quad (9)$$

여기서, 초고압 GIS용 모선과 같이 무한히 긴 원통에 대해 형상계수  $F_{12}=1$ 이다.

#### 3.2 대류와 열전달계수

대류 열전달은 유체속도뿐만 아니라 유체의 물성치인 동점성 계수, 열전도도, 밀도, 비열에 의해 크게 좌우되며, 또한 형상과 고체표면의 거칠기, 유체 유동의 형태와도 관계가 있기 때문에 대류 열전달의 관계식은 다소 복잡하다. 특히 대류 열전달계수  $h$ 는 고체 표면과 유체 사이의 단위 표면적당, 단위 온도차에 대한 열전달률로 정의되며, 일반적으로 대류 열전달계수는 유체의 흐름 방향에 따라 변화한다. 이와 같은 경우에 전체표면에 대하여 국소 대류 열전달 계수를 적당히 평균하여 평균 대류 열전달 계수를 구한다. 안쪽과 바깥쪽 지름이 각각  $D_i$ 와  $D_o$ 이고, 두 원통 사이의 간격  $L_c=(D_o-D_i)/2$ 인 수평 동심원통의 자연대류에 의한 열전달률은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q = \frac{2\pi k N u H}{\ln(D_o/D_i)} (T_i - T_o) \quad (10)$$

자연대류를 고려한 Nusselt number  $Nu$ 는 다음과 같다.

$$Nu = 0.386 \left( \frac{Pr}{0.861 + Pr} \right)^{1/4} (Ra_L)^{1/4} \quad (11)$$

본 논문에서는 정확한 열전달계수를 계산하기 위해 자연대류를 고려한 Nusselt number를 제시하였고, 이 Nusselt number를 이용해 자연대류를 고려한 열전달계수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$h = \frac{k}{L} Nu = 0.386 \frac{k}{L} \left( \frac{Pr}{0.861 + Pr} \right)^{1/4} (Ra_L)^{1/4} \quad (12)$$

### 4. 초고압 GIS용 모선의 모델

본 논문의 삼상모선 모델의 사양은 362kV 64kA

4000A GIS용 모선모델로서 그림 1과 표 1에서 각각 나타내었다. 표에서 보는바와 같이 주도체의 재질은 알루미늄을 사용하였으며, 외부탱크의 재질은 스테인레스스틸을 사용하였다. 그리고 주도체 내부와 주도체와 외부탱크 사이는 SF6 가스로 채워져 있다.

### 5. 결과 및 고찰

초고압 GIS용 삼상모선 모델의 온도상승을 야기하는 열원이 되는 주도체부의 줄손과 외부탱크부의 외류손을 자계해석에서 구하였으며, 각 경계면에서의 자연대류를 고려한 열전달계수의 값은 앞에서 제시한 방법으로 구하였다. 삼상모선의 경우 자속발생 메커니즘이 복잡한 현상이므로 원통의 원주 방향으로의 평균치로 손실값을 대신했다. 자계해석을 통해 구한 발생손실과 각 경계면에서의 열전달계수를 표 2에 나타내었다. 그림 2는 삼상모선에 정상 교류전류가 흐를 때 자속분포로 각 상에서 발생한 자속이 외부탱크의 중심에 대해 편심하여 발생함을 알 수 있다. 그림 3은 이때 유기되는 와전류의 전류밀도를 나타내며 표피효과의 영향으로 전류밀도 분포가 각 주도체 표면에 집중됨을 알 수 있다.

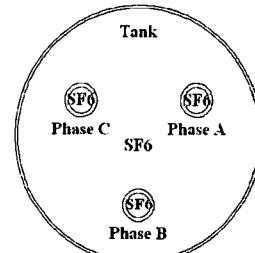


그림 1. 삼상모선 모델의 단면적

표 1. 삼상모선 모델의 사양

Spec.	Material	Inner Diameter [mm]	Outer Diameter [mm]
Conductor	Aluminum	92	120
Tank	Stainless Steel	900	920

표 2. 삼상모선 모델의 발생손실과 열전달계수

Spec.	Conductor			Tank
	Phase A	Phase B	Phase C	
Power Losses [W/m]	90.48	90.49	90.49	71.21
Heat Transfer Coefficient [W/m²·K]	5.1325	6.4062	5.1328	3.0044

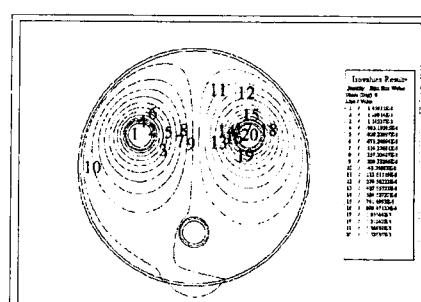


그림 2. 삼상모선 모델의 자속분포

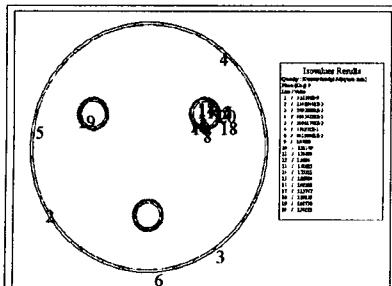


그림 3. 삼상모선 모델의 전류밀도분포

본 논문에서 제시한 기법을 이용하여 예측된 초고압 GIS용 삼상모선의 정상상태 온도분포를 그림 4에 나타내었고, 각 부분의 온도상승 예측값, 수학적으로 구해진 온도상승 예측값, 그리고 실험을 통한 실제 측정값을 표 3에서 비교하였다. 각 상의 주도체 부위에서의 실제 측정값은 A상의 경우 약 53.3°C이고, B상의 경우 약 48.6°C이고, C상의 경우 약 52.7°C이다. 이에 반해 예측된 온도값은 A상의 경우 약 52.86°C이고, B상의 경우 약 47.17°C이고, C상의 경우 약 52.86°C이다. 또한 외부탱크 부위에서의 측정값은 약 30°C이고, 예측된 온도는 약 24.42°C임을 알 수 있다. 이 결과를 보면 도체부에서는 도체와 가스 사이의 경계면에서 열전달 계수를 앞에서 제시한 방법으로 산정하여 측정값과 거의 일치하는 온도를 예측할 수 있었다. 그러나 탱크부에서는 탱크 내에 세 개의 서로 다른 열원이 존재하기 때문에 탱크와 대기 사이의 경계면에서 단일한 값을 갖는 열전달 계수를 적용할 수가 없다. 본 논문에서는 이들의 평균값을 적용하여 구하였기 때문에 탱크부에서 실제 측정값과 온도상승 예측값이 차이가 나는 것으로 생각된다.

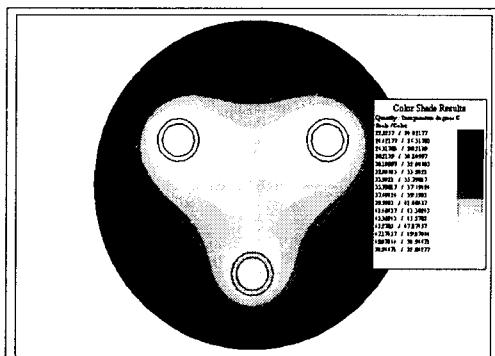


그림 4. 삼상모선 모델의 정상상태 온도분포

표 3. 삼상모선 모델의 각 부분의 예측온도

Temperature [°C]	Conductor			Tank
	Phase A	Phase B	Phase C	
Measurement	53.3	48.6	52.7	30
Analytic Method	61.72	55.99	61.73	25.43
Coupled F.E.M	52.83	47.17	52.86	24.42

그림 5는 온도에 따라 변화하는 열전달 계수와 전기적 저항의 변화를 고려하여 초고압 GIS용 삼상모선의 과도상태 온도분포 곡선을 나타내고 있다. 곡선을 보면 대략 19000sec에서 포화되기 시작하여 대략 30000sec에서 정상상태에 달함을 알 수 있다.

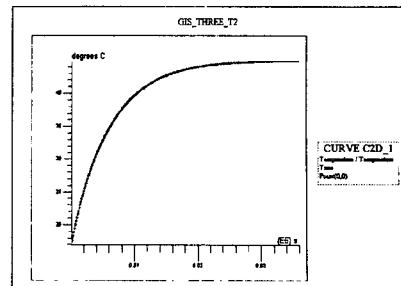


그림 5. 삼상모선 모델의 과도상태 온도분포 곡선

## 6. 결 론

본 논문에서는 자계해석을 통하여 주도체의 줄손실과 외부탱크의 와류손을 계산하고, 물질 상수, 해석 모델의 형상 등을 고려한 Nusselt Number를 이용하여 자연대류 열전달계수를 해석적으로 구하였다. 이를 유한요소법과 결합해서 초고압 GIS용 모선의 온도분포를 예측하기 위한 새로운 자계-열계가 결합된 기법을 제시하였다. 또한 온도에 따라 변화하는 전기적 저항과 열전달 계수를 고려함으로서 온도해석의 정확도를 높이고자 하였다. 이 방법을 실제 모델에 적용한 결과, 온도분포 특성이 측정값에 거의 일치하는 것을 확인할 수 있었으며, 온도상승을 예측함으로써 설계기준을 마련할 기초연구를 확립할 수 있다. 그러므로 본 논문에서 초고압 전력기기의 온도상승을 예측하는 자계-열계가 결합된 새로운 기초해석 기법을 제안하였다.

향후 실제 유동해석을 통하여 삼상모선의 탱크 내 SF6 가스의 유동분포 및 주도체 배열의 변화에 따른 온도상승을 고려함으로서 각 경계면에서의 국부적인 열전달 계수를 산정하여 보다 정확한 초고압 GIS용 모선의 온도상승을 예측하고, 이를 다른 전력기기의 통전설계에 응용하고자 한다.

## [참 고 문 헌]

- M.Khalifaed, "High Voltage Engineering", Chap10, Marcel Dekker, Inc. 1990, New York.
- M.Necati ozisik, "Heat Transfer A Basic Approach", McGraw-Hill Publishing Company, 1990.
- 한국전기연구소, "초고압 전력기기 기술개발을 위한 연구 기획", 통상산업부, 1997.
- H. Sadakuni, K. Sasamori, H. Hama, K. Inami, "Insulation and current carrying design for GIS", JIEE, pp.33-42, SP-96-12(1996).
- S. W. Kim, H. H. Kim, S. C. Hahn, "Coupled Finite-Element-Analytic Technique for Prediction of Temperature Rise in Power Apparatus", IEEE Trans. Magnetics, Vol.38, No.2, pp.921-924, March 2002.
- J. K. Kim, S. C. Hahn, "Temperature Rise Prediction of EHV GIS Bus Bar by Coupled Magneto-Thermal Finite Element Method", IEEE Trans. Magnetics, Vol.41, No.5, pp.1636-1639, MAY 2005.
- W.Z Black, B.A.Bush, Robert T. Coneybeer, "Steady-state and Transient ampacity of busbar", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 9, No.4, pp.1822-1829, October 1994.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2003-B-271) 주관으로 수행된 과제임.