

해석적 기법을 이용한 초고압 GIS용 삼상모선의 온도분포 해석

論 文

55B-4-2

Analysis of Temperature Distribution in EHV GIS Three-Phase Busbar Using Analytic Technique

金重經[†] · 韓聲鎮^{*}

(Joong-Kyoung Kim · Sung-Chin Hahn)

Abstract - This paper presents a new magneto-thermal finite element analysis for predicting the temperature rise of the EHV GIS busbar. Joule's heat due to current flowing in the main conductor and the heat due to the induced eddy current in the tank are calculated by the magnetic field analysis. And these heats are used as the input data to predict the temperature rise for the thermal analysis. However, it is not easy to apply the heat-transfer coefficients on the boundaries for the thermal analysis. In this paper, 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 the busbar by coupled magneto-thermal finite element analysis shows good agreement with the experimental data.

Key Words : Busbar, Natural Convection, Nusselt Number, Temperature Distribution, Coupled Analysis

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 위해 적극적으로 고전압 대용량화, 소형 축소화 기술이 개발되고 있다[1]. 그러나 다양한 분야의 전력에너지 변환기들이 개발되고 있는 추세에서 고전압 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[2]. 초고압 전력기기 중 초고압 GIS의 경우 차단부와 CT를 동일 용기 내에 넣거나, 차단기, 단로기, 모선 등을 3상 일괄하는 방법에 의해 소형·축소화를 시키고 있다. 이러한 초고압 GIS용 모선의 기초 설계기술에는 절연설계와 통전설계가 있으며, 특히 초고압 GIS용 모선의 통전설계시 주도체의 지름, 탱크의 지름, 탱크의 두께, 재질 등의 설계 파라메타들을 결정해야 하는데 이는 절연적 제한요소보다 열적 제한요소가 더 큰 영향을 주는 것으로 보고되고 있다[3]. 따라서 전류통전시 초고압 GIS용 모선의 내부 및 외부탱크의 온도상승을 정확히 예측하는 것이 매우 중요하다. 이전의 온도

상승을 예측을 하는 방법에는 초고압 GIS용 모선 모델을 제작 후 통전시험을 통하여 온도규격의 통과여부를 판단하는 방법, 대수적인 방정식을 이용하여 초고압 GIS용 모선 모델을 해석하는 방법 등의 고전적인 방법을 이용하였으나, 오늘날에는 초고압 GIS용 모선 모델의 각 부분 온도분포 예측 및 설계 파라메타들의 최적설계를 위하여 수치해석적 방법을 주로 이용하고 있다[4]. 그러나 온도상승을 예측하기 위하여 열해석을 할 때 해석모델의 각 경계면에서 열전달계수를 정확히 적용하는 것은 상당히 어렵다.

본 논문에서는 자체해석을 통해 주도체의 줄손과 외부탱크의 와류손을 계산하고, 동점성계수, 열전도도, 밀도, 비열과 같은 유체의 물성치, 유체의 이동 방법, 해석 모델의 형상 및 위치 등을 고려한 Nusselt Number를 이용하여 자연대류 열전달계수를 해석적으로 구한다. 이를 유한요소법과 결합함으로써 새로운 자체-열계가 결합된 초고압 GIS용 모선의 온도분포 예측기법을 다룬다. 또한 온도에 따라 변화하는 전기적 저항과 열전달계수를 고려함으로써 온도분포 해석의 정확도를 높이고자 하였다. 이 기법을 실제 모델에 적용한 결과, 온도분포 특성이 실제 측정값과 거의 일치하였다.

2. 온도분포 해석 이론

2.1 정자계 지배방정식

모선에 정상 교류전류가 흐를 때 준정상 맥스웰 방정식은 다음과 같다.

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

[†] 교신저자, 正會員 : 東亞大 工大 電氣工學科 博士課程

E-mail : jkkim@donga.ac.kr

^{*} 正會員 : 東亞大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2006年 1月 10日

最終完了 : 2006年 2月 28日

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

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

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 전류전류이고, \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

열원으로 초고압 GIS용 모선의 도체 지름, 탱크 지름, 탱크 두께, 도체와 탱크의 재질 등 설계 파라메타들에 따른 손실을 계산하여 온도상승의 원인을 규명해야 한다. 초고압 GIS용 모선에서 주요 발열원으로는 주도체의 줄손실, 모선이 만드는 자속이 외부탱크에 쇄교함으로써 발생하는 와류손, 용량, 구조물, 접지선 등을 통해 흐르는 유도전류에 의한 줄손실 등이 있다. 본 연구에서는 주요 발열원으로 주도체에 통전전류가 흐를 때 발생하는 줄손실과 주도체에 흐르는 전류가 만드는 자속이 외부탱크에 쇄교함으로써 발생하는 와류손을 고려한다. 이에 따라 주도체에 흐르는 입력 전류값, 주도체의 재질, 외부탱크의 재질, 주도체의 치수, 외부탱크의 치수 그리고 단상 통전 혹은 삼상 통전에 따라 발생하는 손실이 다르게 된다. 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.

2.3 복사

초고압 GIS용 모선의 온도상승 조건하에서는 고체부분에

서만 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, ϵ_i 과 ϵ_o 가 각각 도체 및 외부탱크의 표면 방사율이라고 하면, 이때 복사 열전달률은 다음과 같이 표현할 수 있다[5].

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

여기서, 열전달률 \dot{Q} 란 단위시간에 전달된 열에너지로 정의되며 단위는 W 이다. 방사율 ϵ 은 같은 온도에서 실제표면에서 방사된 복사와 흑체에 의해 방사된 복사의 비율로 정의되며 그 범위는 $0 \leq \epsilon \leq 1$ 이다. 초고압 GIS용 모선과 같이 무한히 긴 원통에 대해 형상계수 $F_{12} = 1$ 이다.

2.4 대류와 열전달계수

대류 열전달은 유체 속도뿐만 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[6]. 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[7].

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

자연대류를 고려한 Nusselt number Nu 는 다음과 같다.

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

($Pr \geq 0.7, 100 < Ra_L < 10^8$)

여기서, Grashof number Gr 은 유체에 작용하는 점성력에 대한 부력의 비를 나타내는 무차원 수이다. Prandtl number Pr 은 속도경계층 두께와 열경계층 두께의 비로 정의되며 속도 및 열경계층의 상대적인 증가율을 나타내는 무차원 수이다. Rayleigh number Ra 는 Grashof number와 Prandtl number의 곱으로 정의되며 경계층의 상태를 나타내는 무차원 수이다. Nusselt number Nu 는 어떤 유체층을 통과하는 전도에 의해 일어나는 열전달의 크기에 대한 같은 유체층을 통과하는 대류에 의해 일어나는 열전달의 크기로 정의되며 수가 커질수록 대류의 효과는 커진다.

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

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

2.5 에너지 평형방정식

열해석시 대류 열유속 \dot{q}_{conv} 는

$$\dot{q}_{conv} = h(T_s - T_\infty) \quad (13)$$

이며, 복사 열유속 \dot{q}_{rad} 는

$$\dot{q}_{rad} = h_r(T_s - T_\infty) \quad (14)$$

이다. 여기서, 복사 열전달 계수 h_r 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$h_r = \epsilon\sigma(T_s + T_\infty)(T_s^2 + T_\infty^2) \quad (15)$$

도체 및 탱크의 각 경계에서 전달되는 총 열유속 \dot{q} 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{q} = \dot{q}_{conv} + \dot{q}_{rad} \quad (16)$$

여기서, 열유속 \dot{q} 란 단위면적당, 단위시간당 전달되는 열 에너지로 정의되며 단위는 W/m^2 이다.

또한, 에너지 평형방정식은

$$\nabla \cdot \mathbf{q} = Q - \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (17)$$

로 주어지며, 이는 열해석시 지배방정식이 된다.

에너지 평형방정식은 체적 V 에 대해 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\rho CV \frac{dT}{dt} = I^2 R(T) - hA_s(T - T_\infty) - \epsilon\sigma A_s(T^4 - T_\infty^4) \quad (18)$$

따라서 식 (18)로부터 정상상태에서의 통전전류 I 는

$$I = \left\{ \frac{hA_s(T - T_\infty) + \epsilon\sigma A_s(T^4 - T_\infty^4)}{R(T)} \right\}^{1/2} \quad (19)$$

와 같다.

3. 결과 및 고찰

3.1 초고압 GIS용 삼상모선의 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 스테인레스틸을 사용하였다. 그리고 주도체 내부와 주도체와 외부탱크 사이는 SF6 가스로 채워져 있다.

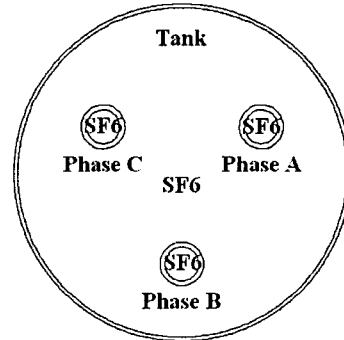


그림 1 삼상모선 모델의 단면적

Fig. 1 Cross-section of three-phase busbar model

표 1 삼상모선 모델의 사양

Table 1 Dimension of three-phase busbar model

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

3.2 결과 및 고찰

초고압 GIS용 삼상모선 모델의 온도상승을 야기하는 열원이 되는 주도체부의 줄손과 외부탱크부의 와류손을 자체 해석에서 구하였으며, 각 경계면에서의 자연대류를 고려한 열전달계수의 값은 2.4절 대류와 열전달계수의 식 (12)를 이용해 구하였다. 삼상모선의 경우 자속발생 메커니즘이 복잡한 현상이므로 원통의 원주 방향으로의 평균값으로 손실값을 대신하였다. 이에 따른 자연대류를 고려한 열전달계수를 산정하기 위한 입력창을 그림 2에 나타내었다. 그림 3은 해석적 기법을 이용하여 구한 자연대류를 고려한 열전달계수의 출력창을 나타낸다. 열전달계수의 산정 알고리즘은 그림 4와 같으며, 우선 자체해석을 통해 구한 주도체부 및 외부탱크부의 손실과 물질값들을 그림 2의 입력창에 입력하게 되면, 입력된 파라메타를 온도 Δt 만큼 변화시켜 에너지 평형방정식인 식 (18)을 만족할 때까지 반복하여 산정한다. 그리고 보정값은 식 (9)와 식 (10)을 이용해 열전달률의 변화에 따라 결정한다. 이 과정에서 도체와 외부탱크에서의 열

전달계수 및 에너지 평형방정식에 의한 각 도체와 외부탱크의 온도가 산정된다.

그림 2 열전달계수 산정을 위한 입력창
Fig. 2 Input window for calculating heat-transfer coefficients

그림 3 산정된 열전달계수의 출력창
Fig. 3 Output window of calculated heat-transfer coefficients

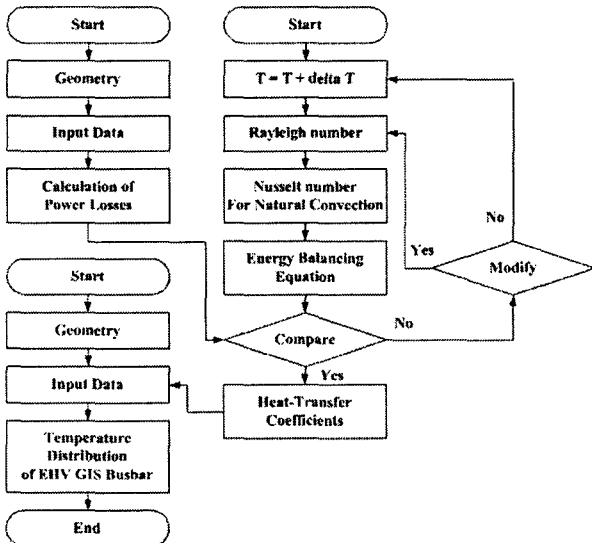


그림 4 열전달계수의 산정 알고리즘
Fig. 4 Algorithm for calculating heat-transfer coefficients

자계해석을 통해 구한 발생손실과 각 경계면에서의 열전달계수를 표 2에 나타내었다. 그림 5~7은 삼상모선에 정상 교류전류가 흐를 때 자속분포로 전류의 위상변화에 따라 자속의 중심축이 이동하는 것을 알 수 있으며, 각 상에서 발생한 자속이 외부탱크의 중심에 대해 편심하여 발생함을 알 수 있다. 한편 초고압 GIS용 삼상모선 모델에 대한 와전류 분포는 그림 8과 같으며, 자계해석을 통해 구한 와전류 밀도를 그림 9에 나타내었다.

표 2 삼상모선 모델의 발생손실과 열전달계수
Table 2 Power losses and heat-transfer coefficients

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/m ² °C]	5.1325	6.4062	5.1328	3.0044

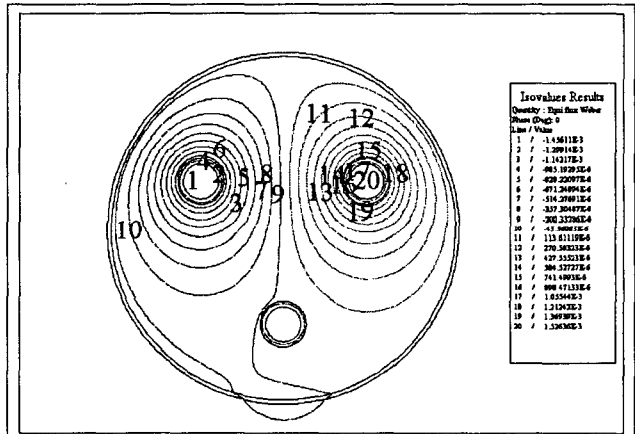


그림 5 삼상모선 모델의 자속분포(Deg=0)
Fig. 5 Flux distribution of three-phase busbar model(Deg=0)

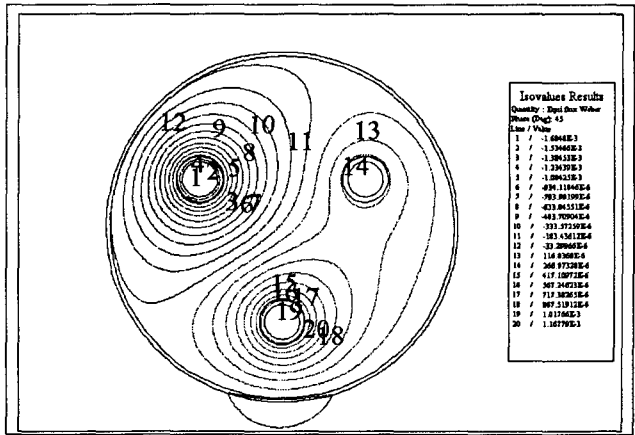


그림 6 삼상모선 모델의 자속분포(Deg=45)
Fig. 6 Flux distribution of three-phase busbar model(Deg=45)

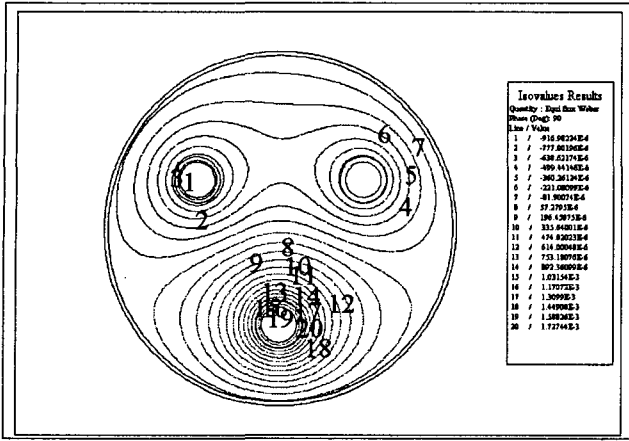


그림 7 삼상모선 모델의 자속분포(Deg=90)
Fig. 7 Flux distribution of three-phase busbar model(Deg=90)

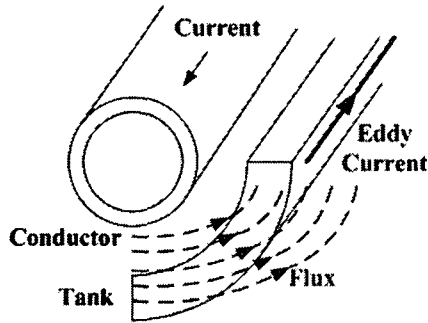


그림 8 삼상모선 모델의 와전류 분포
Fig. 8 Eddy current profile of three-phase busbar model

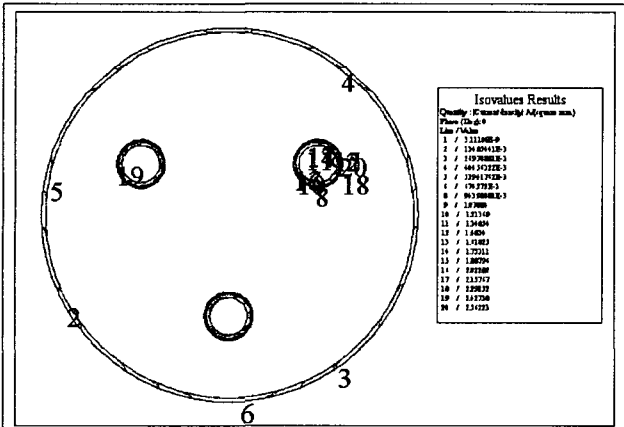


그림 9 삼상모선 모델의 전류밀도분포
Fig. 9 Current density of three-phase busbar model

본 논문에서는 자체해석을 통해 주도체의 줄손과 외부 탱크의 와전손을 계산하여 열원으로 하고, 동점성 계수, 열전도도, 밀도, 비열과 같은 유체의 물성치, 유체의 이동 방법, 해석 모델의 형상 및 위치 등을 고려한 Nusselt Number를 이용하여 자연대류 열전달계수를 해석적으로 구하였다. 이를 유한요소법과 결합하여 열해석을 함으로써 초고압 GIS용 삼상모선의 정상상태 온도분포를 예측하였다. 그림 10은 본 논문에서 제시한 기법을 이용하여 예측한 초고압 GIS용 삼

상모선 모델의 정상상태 온도분포 나타내고 있다. 또한 실험을 통한 실제 측정값, 그림 3에서 에너지 평형방정식을 이용하여 대수적으로 구한 온도상승 예측값, 그리고 본 논문에서 제시한 기법을 이용하여 예측한 온도상승 예측값을 표 3에서 비교하였다.

각 상의 주도체 부위에서의 실제 측정값은 A상의 경우 53.3°C이고, B상의 경우 48.6°C이고, C상의 경우 52.7°C이다. 이에 반해 예측된 온도값은 A상의 경우 52.86°C이고, B상의 경우 47.17°C이고, C상의 경우 52.86°C이다. 또한 외부 탱크 부위에서의 측정값은 30°C이고, 예측된 온도는 24.42°C임을 알 수 있다.

이 결과를 보면 모선내의 도체부에서는 도체와 가스사이의 경계면에서 열전달계수를 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 열전달계수를 적용할 수가 없다. 본 논문에서는 이들의 평균값을 적용하여 구하였기 때문에 탱크부에서 실제 측정값과 온도상승 예측값이 차이가 나는 것으로 생각된다.

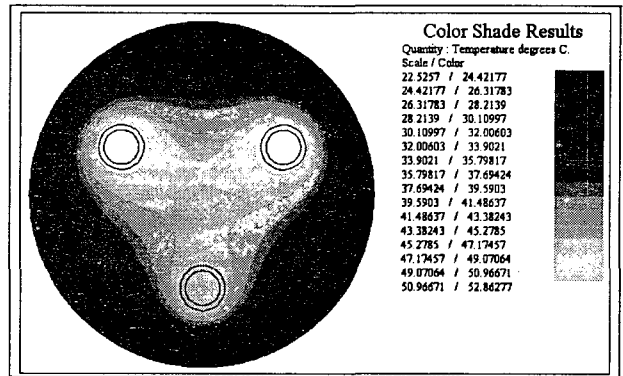


그림 10 삼상모선 모델의 정상상태 온도분포
Fig. 10 Temperature distribution of three-phase busbar model

표 3 삼상모선 모델의 각 방법에 따른 예측온도
(대기온도=11.3°C)

Table 3 Predicting temperature by each methods
(Ambient temperature=11.3°C)

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 11은 온도에 따라 변화하는 열전달계수와 전기적 저항의 변화를 고려하여 초고압 GIS용 삼상모선 모델의 과도상태 온도곡선을 나타내고 있다. 곡선을 보면 대략 1900sec

에서 포화되기 시작하여 대략 30000sec에서 정상상태에 달함을 알 수 있다.

표 4는 시간이 1000sec, 10000sec, 20000sec, 30000sec일 때 초고압 GIS용 삼상모선 모델의 각각 온도상승 예측값을 나타내고 있다. 이와 같이 정상상태뿐만 아니라 온도에 따른 열전달계수와 전기적 저항의 변화를 고려하여 과도상태에서의 온도상승도 예측하였다.

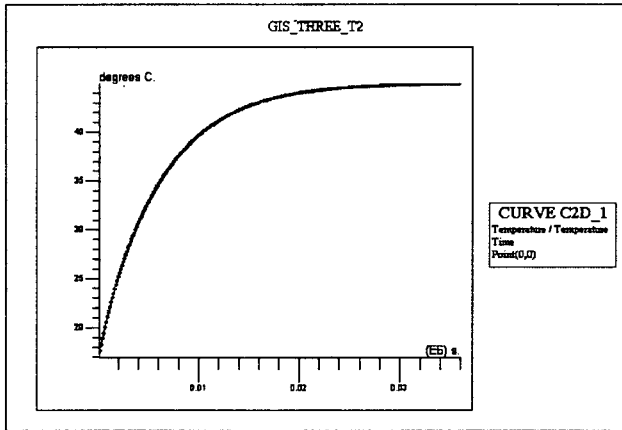


그림 11 삼상모선 모델의 시간에 따른 온도곡선
 Fig. 11 Temperature - time curve of three-phase busbar model

표 4 삼상모선 모델의 각 시간에 따른 예측온도
 Table 4 Predicting temperature by each times

Spec.	Conductor[°C]			Tank [°C]
	Phase A	Phase B	Phase C	
1,000 [sec]	21.9	21.64	21.82	20.53
10,000 [sec]	45.31	41.02	45.30	23.86
20,000 [sec]	51.31	45.91	51.34	24.31
30,000 [sec]	52.54	46.91	52.50	24.39

4. 결 론

본 논문에서는 자체해석을 통해 주도체의 줄손실과 외부 탱크의 와류손을 계산하고, 동점성계수, 열전도도, 밀도, 비열과 같은 유체의 물성치, 유체의 이동 방법, 해석 모델의 형상 및 위치 등을 고려한 Nusselt Number를 이용하여 자연대류를 고려한 열전달계수를 해석적 방법으로 구하였다. 이를 유한요소법과 결합해서 초고압 GIS용 모선의 온도분포를 예측하기 위한 새로운 자체-열계가 결합된 기법을 제시하였다. 또한 온도에 따라 변화하는 전기적 저항과 열전달계수를 고려함으로써 온도해석의 정확도를 높이고자 하였다. 이 방법을 초고압 GIS용 삼상모선 모델에 적용한 결과,

온도분포 특성이 측정값에 거의 일치하는 것을 확인할 수 있었으며, 온도상승을 예측함으로써 설계기준을 마련할 기초 연구를 확립할 수 있다. 그러므로 본 논문에서 초고압 전력기기의 온도상승을 예측하는 자체-열계가 결합된 새로운 기초해석 기법을 제안하였다.

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

감사의 글

본 연구는 2001학년도 동아대학교 교내학술연구비 (연구기초자료비) 지원에 의하여 수행된 과제임.

참 고 문 헌

- [1] 이경행, “초고압 전력기기의 기술동향”, 대한전기학회지, 제46권, 제8호, pp.23~30, 10월, 1997.
- [2] 한국전기연구소, “초고압 전력기기 기술개발을 위한 연구 기획”, 통상산업부, 1997.
- [3] H. Sadakuni, K. Sasamori, H. Hama, K. Inami, “Insulation and current carrying design for GIS”, JIEE, pp.33-42, SP-96-12, 1996.
- [4] 여운동, 정의섭, 박경엽, “2003년 기술산업정보분석 : 초고압 GIS”, 한국과학기술정보연구원, 2003.
- [5] M.Necati ozisik, “Heat Transfer A Basic Approach”, McGraw-Hill Publishing Company, 1990.
- [6] 이형직, “유한요소법에 의한 유체역학·열전도 해석 입문”, Pearson Education Korea, 2000.
- [7] Patrick H. Oosthuizen, “Introduction to Convective Heat Transfer Analysis”, McGraw-Hill, 1999.
- [8] Eric C. Guyer, “Handbook of Applied Thermal Design”, McGraw-Hill, pp.1-42~1-43, 1989.
- [9] M.Khalifaed, “High Voltage Engineering”, Chap10, Marcel Dekker, Inc. 1990, New York.
- [10] 기초전력공학공동연구소, “열전달 계수의 비선형성을 고려한 전력기기의 온도상승 예측”, 산업자원부, 2002.
- [11] 한국전기연구원, “자연대류 효과를 고려한 초고압 GIS용 모선의 온도상승 예측 기술개발”, 한국전기연구원, 2004.
- [12] 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.
- [13] D. Labridis, V. Hatzianthassiou, “Finite Element Computation of Field, Forces and Inductances in Underground SF6 Insulated Cables Using a Coupled Magneto-Thermal Formulation”, IEEE Trans. Magnetics, Vol.30, No.4, pp.1407-1415, July 1994.

- [14] Wu Anbo, Chen Degui, "Evaluation of Thermal Performance for Air-Insulated Busbar Trunking System by Coupled Magneto-Fluid-Thermal Fields", Power System Technology, Vol.4, pp.13-17, October 2002.
- [15] 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.
- [16] 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.

저 자 소 개



김 중 경 (金 重 經)

1976년 9월 9일생. 2002년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 ~ 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 051-200-6946

Fax : 051-200-6947

E-mail : jkkim@donga.ac.kr



한 성 진 (韓 聲 鎭)

1955년 6월 27일생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1983년 3월 ~ 현재 동아대 전기공학과 교수.

Tel : 051-200-7737

Fax : 051-200-6947

E-mail : schahn@dau.ac.kr