

열전달 계수의 변화를 고려한 초고압 GIS 모선의 온도 상승 예측

論 文
49B-5-4

Temperature Rise Prediction of Busbar of EHV GIS Considering Variation of Heat-Transfer Coefficient

金鉉勳* · 韓聲鎮** · 周秀元** · 鄭鎮教*** · 李秉潤*** · 朴敬燁§
(H. H. Kim · S. C. Hahn · S. W. Joo · J. K. Jung · B. Y. Lee · K. Y. Park)

Abstract - In order to design the current carrying conductor for GIS, it is important to predict temperature-rise when rated current flows in the bus bar. However, it is not easy to apply the correct heat transfer coefficient on the boundary between different material for the thermal analysis. In this paper, the heat transfer coefficient which depends on parameters such like material constant, model geometry as well as ambient temperature, was calculated by analytic method. The calculated coefficient is used for the temperature rise prediction by F.E.M. The results show good agreement with experimental data.

Key Words : Gas Insulated Substation (GIS), 열전달 계수(heat transfer coefficient), GIS 모선(GIS busbar), 유한요소법(FEM)

1. 서 론

초고압 GIS(GIS : Gas Insulated Substation)는 변압기를 제외한 차단기(GCB : Gas Circuit Breaker), 단로기(DS : Disconnecter), 접지 개폐기(ES : Earthing Switch), 모선(Bus), 스페이서(Spacer), 붓싱, PT, CT 등을 SF₆가 들어있는 금속용기에 넣어서 시스템화한 전력기기이다.[1] 우리나라의 전력수요는 경제성장과 함께 매년 증가하고 있으며, 이에 따라 초고압 GIS의 활용이 매우 다양화되어 소형화, 고신뢰성화가 크게 요구되고 있다. 그림 1은 초고압 GIS 시스템의 구조를 보여주고 있다.

일반적으로 GIS 모선에는 6000 [A]이상의 대전류가 흐른

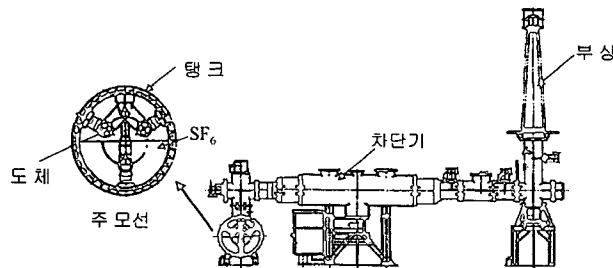


그림 1 초고압 GIS 의 구조
Fig. 1 Construction of EHV GIS

다. GIS 모선의 통전설계시 주도체의 지름, 탱크의 지름, 탱크의 두께 등과 같은 설계 치수를 결정하여야 하는데, 이때 열적 제한 요소가 절연설계에 따른 제한조건보다 더 크게 영향을 주는 것으로 보고되고 있다.[2]

GIS에서 주요 발열요인으로는 주도체의 줄손, 외부탱크에서 발생하는 순환전류 및 와전류, 전기적 접촉부위의 저항에 의한 손실등이 있다. GIS에서 상기원인 등에 의한 열이 발생함으로써 각 부위의 온도상승이 일어나게 된다. 따라서 전류 통전시 GIS 모선 내부 및 용기의 온도상승을 정확히 예측하는 것이 매우 중요하다. 그러나 온도상승을 예측하기 위해서 열해석을 할 때 모델의 각 경계면에서 열전달 계수를 정확히 적용하는 것은 상당히 어렵다.[3]

경계면에서의 열전달은 복사와 대류에 의해 이루어지며, 복사 열전달 계수는 모델의 표면상태에 따라 결정이 되지만, 대류 열전달 계수는 해석모델, 유동조건, 유체의 종류에 따라 달라지므로 이 열전달 계수를 결정하기란 매우 어렵다. 본 논문에서는 전류통전시 도체부의 줄손과 탱크부의 와류손을 열원으로 하고, 물질상수, 해석 모델의 형상 등을 고려한 Nusselt Number를 이용하여 열전달 계수를 해석적으로 구하고 이를 열해석을 위한 유한요소법에 적용하여 GIS 모선의 온도분포를 예측할 수 있는 기법을 다룬다. 이 방법을 실제 모델에 적용한 결과, 온도 분포 특성이 측정값에 거의 일치하는 것을 확인할 수 있었으며, 전력기기의 온도 상승을 예측하는 새로운 기법으로 제안한다.

2. 초고압 GIS 모선의 온도 분포 해석 이론

초고압 GIS 모선의 열해석 문제는 근본적으로 전자장 문제와 결합되어 있으며, 전력기기의 열해석을 하기 위해서는 전자장 해석이 선행되어야 한다.

* 準 會 員 : 東亞大 電氣工學科 碩士課程
** 正 會 員 : 東亞大 電氣工學科 教授 · 工傳
*** 正 會 員 : 韓國電氣研究所 前任研究員
§ 正 會 員 : 韓國電氣研究所 責任研究員
接受日字 : 1999年 11月 29日
最終完了 : 2000年 3月 29日

2.1 GIS 모선의 온도상승 메카니즘

GIS 모선이 금속용기(혹은 탱크)에 의해서 밀폐된 상태에서 온도 상승의 메카니즘을 그림 2에 표시 하였다. 도체에 전류가 흘러 손실(Q₁)이 발생하면 복사(q_r) 및 대류(q_c)에 의해 금속용기로 열이 전달된다. 다음으로 금속용기에서는 도체에서의 열 전달분(q_r+q_c)과 자신의 발생 손실(Q₂)을 대기 중으로 복사(q_r') 및 대류(q_c')에 의해 열을 전달한다. 연속 통전시는 충분한 시간이 지나면 발생 손실분과 열 전달분이 열 평형상태에 도달하여 일정한 온도를 유지하게 된다.

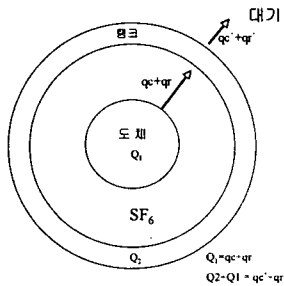


그림 2 초고압 GIS 의 열전달
Fig. 2 Heat transfer of EHV GIS

2.2 기본 이론[4, 5]

온도해석의 경우 열유속(Heat Flux) q는

$$q = -k \nabla T \tag{1}$$

의 관계 있으며, 한편, 에너지 평형방정식은

$$\nabla \cdot q = Q - \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \tag{2}$$

로 주어지며 이것이 온도해석시의 지배방정식이 된다. 한편, 식(2)는 체적 V에 대해 다음 식과 같이 표현하며,

$$\rho CV \frac{dT}{dt} = I^2 R(T) - hA_s(T - T_\infty) - \epsilon \sigma A_s(T^4 - T_\infty^4) \tag{3}$$

따라서 식(3)으로부터 정상상태에서의 통전 전류 I는

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

와 같이 된다.

한편, 식(4)에서 저항은 온도의 함수로

$$R(T) = \rho_e L \left[\frac{1 + \alpha_e(T - 20)}{Ax} \right] \tag{5}$$

과 같다.

2.3 용기내의 대류 열 전달

초고압 GIS 모선의 고체면과 기체의 냉매가 접하는 경계면에서 대류에 의한 열전달이 발생한다. 실제 초고압 GIS 모선의 내부 손실에 의한 열에너지는 주로 대류 열전달에 의하여 방출된다. 대류에 의해 냉각되는 표면온도를 산출하기 위해 에너지 평형식을 사용하면, 탱크와 도체 표면에서의 대류 열전달은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$W_\infty = 2\pi \frac{K_{eff}}{\ln(D_o/D_i)} (T_c - T_s)H \tag{6a}$$

여기서 K_{eff}는 유효 열전달 계수로서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$K_{eff} = 0.386 \left(\frac{Pr}{0.861 + Pr} \right)^{1/4} (Ra_{cyl}^*)^{1/4} \tag{6b}$$

그리고 수평원통에 대한 레이리수 (Rayleigh Number)

Ra_{cyl}^{*}는

$$Ra_{cyl}^* = \frac{\ln(D_o/D_i)}{\delta^{3/4} (D_i^{-3/5} + D_o^{-3/5})^{5/4}} Ra_\delta^{1/4} \tag{6c}$$

$$Ra_\delta = \frac{g\beta(T_i - T_o)\delta^3}{\nu^2} Pr \tag{6d}$$

$$\delta = \frac{1}{2}(D_o - D_i) \tag{6e}$$

여기서 10² < Ra_{cyl}^{*} < 10⁷의 관계를 가진다.

2.4 용기내의 복사 열전달

열복사는 유한한 온도의 물질에 의하여 에너지가 복사될 때 일어난다. 초고압 GIS 모선의 온도상승 조건하에서는 고체부분으로부터의 복사만 고려하지만 실제 복사에 의한 초고압 GIS 모선 표면에서 열에너지 방출은 미약하다. 전도나 대류에 의한 에너지전달은 매질이 필요한 반면 복사는 그렇지 않다. 사실상 복사 열전달은 진공 중에서 가장 잘 이루어진다. 실제의 열해석에서 정량적으로 해석하기 위하여 용기 내부에서의 복사 열전달은 Stefan - Boltzmann 법칙에서 복사율(emissivity) ε와 주위온도를 고려해 다음과 같이 표현할 수 있다.[6]

$$W_r = \sigma(T_1^4 - T_2^4)A_1 \left[\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right) \right]^{-1} \tag{7}$$

2.5 열전달 계수

열전달 계수는 열해석 정수(parameter)중에서 접근하기가 가장 어려운 부분인데, 그 이유는 이 계수가 매우 다양한 변수를 가진 실험상수이기 때문이다. 유체가 흐르는 관을 예로 들면, 관내의 한 표면에서의 열전달 계수는 유체의 속도, 유체의 물성치, 관표면의 거칠기, 관의 형상과 치수 등에 의해 결정되기 때문에 이 값을 정하기가 무척 어렵다. 본 논문에서는 물질상수, 해석모델의 형상 등을 고려한 Nusselt Number를 이용하여 초고압 GIS 모선을 원통으로 모델링 하였으며, 이 때 수평원통에 대해 자연대류를 표현하기 위한 Nusselt Number는 다음과 같다.

$$\overline{N_D} = \left\{ 0.60 + 0.387 \frac{Ra_D^{1/6}(T)}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/21}} \right\}^2$$

단, ($10^{-5} < Ra_D < 10^{12}$) (8)

이식에서 Rayleigh수는 다음과 같이 정의된다.

$$Ra_D(T) = Gr_D Pr = g\beta(T - T_\infty) \frac{D^3}{\nu} Pr$$

(9)

따라서 대류 열전달 계수는 다음과 같다

$$\overline{h_s}(T) = \frac{k}{D} \overline{N_D}(T)$$

(10)

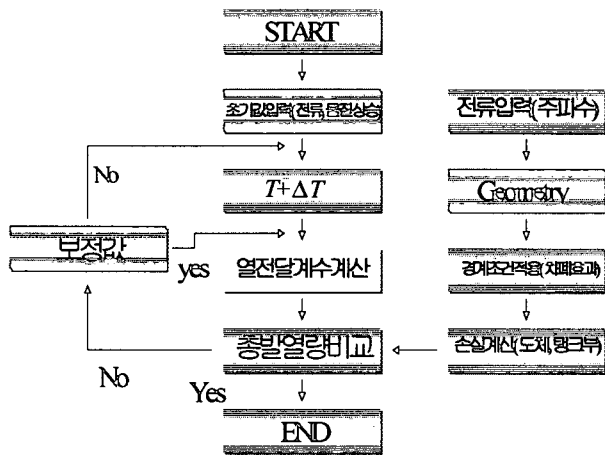


그림 3 열전달 계수의 계산과정
Fig. 3 Calculation process of heat transfer coefficient

열전달 계수의 계산과정은 그림 3과 같다. 그림 3을 보면 우선 우측의 자계해석[7]을 통해 도체와 탱크부의 손실을 구한 다음 좌측의 열전달 계수 계산을 위한 초기값인 발열량으로 입력된다. 이 입력된 값으로 부터 온도를 Δt 만큼 증가시켜 정상상태 에너지 평형방정식인 식(4)가 만족될 때까지 반복 계산한다. 그리고 보정값은 용기속의 대류 열전달 및 복사 열전달에 의한 식(6a)와 식(7)을 이용하여 도체부에서 탱크부까지의 열 전달량의 변화량에 따라서 결정한다. 이 과정에서 탱크부와 도체부에서의 열전달 계수가 결정된다.

2.6 프로그램 검증

본 연구에서 제안한 방법의 타당성을 검증하기 위하여 해석해가 있는 모델[8]에 도체 재질이 Al 일 때와 Cu 일 때의 두 가지 경우를 고려하였으며 이때 모델의 치수와 물질 상수 값은 표 1에 나타내었다.

표 1 모델 A의 정수
Table 1 Parameters of model A

도체재질	도체내경 [mm]	도체외경 [mm]	복사율
Al	40.6	48.3	0.75
Cu	40.6	48.3	0.75
도체 재질	저항률 [$\Omega \cdot m$]	밀도 [kg/m^3]	비열 [J/kgK]
Al	3.253×10^{-8}	2703	935.8
Cu	1.777×10^{-8}	8890	422.5

그림 4는 본 연구에서 개발한 열전달 계수를 구하기 위한 프로그램의 물질정수 입력화면이다. 초기 화면은 식(8)과 식(9)의 Nusselt Number 와 레이리수(Rayleigh Number)를 구하기 위한 물질정수를 입력할 수 있도록 구성하였다. 즉, 식(10)의 열전달 계수를 온도의 함수로 놓고 필요한 물질정수를 입력하도록 구성하였다. 이렇게 열전달 계수를 온도의 함수로 놓고 온도를 Δt 만큼 증가시켜 정상상태의 에너지 평형 방정식인 식(4)을 만족할 때까지 반복 계산한다. 이 과정에서 열전달 계수 값을 구할 수 있고, 이렇게 산정된 열전달 계수 값을 식(3)에 대입하여 시간에 대한 온도변화를 구한다. 온도의 변화에 따른 열전달 계수의 변화를 나타낸 출력 화면을 그림 5에 나타내었다.

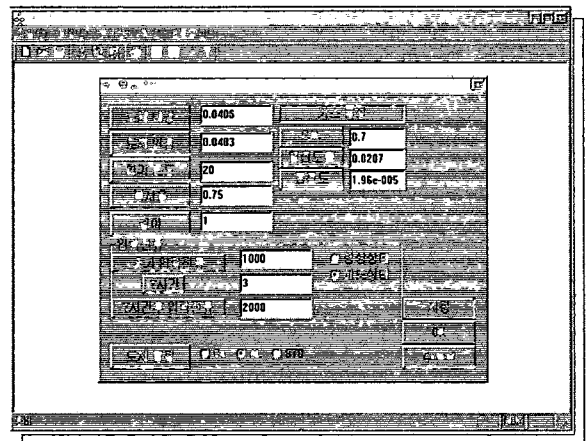


그림 4 물질 입력창
Fig. 4 Material input window

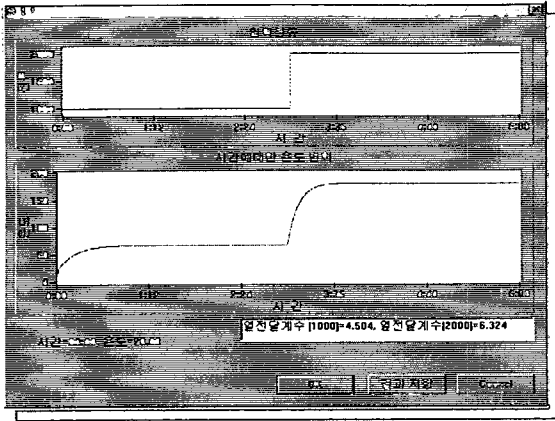


그림 5 계산 결과창
Fig. 5 Calculation result window

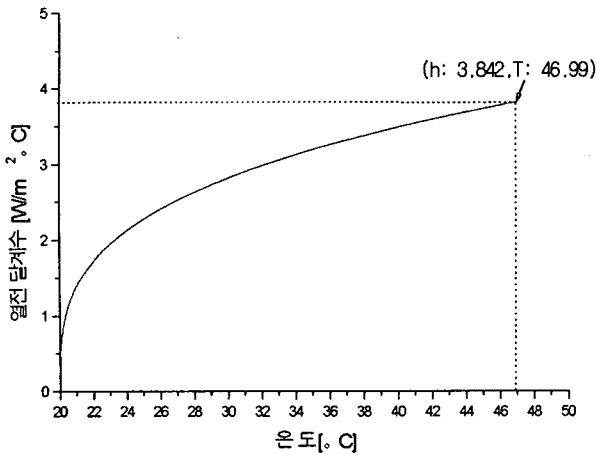


그림 6 온도에 대한 열전달 계수 변화 특성
Fig. 6 Temperature - heat transfer coefficient curve

모델 A의 해석조건을 보면 외기 온도는 20[°C]이고, 초기에 실효값이 1000[A]인 교류전류가 흐르다가 3시간후 2000[A]로 변화한 경우이다. 도체 재질이 Cu 이고, 교류 전류의 실효값이 1000[A]일 때 열전달 계수의 온도에 따른 변화를 보면 그림 6와 같고, 그래프를 보면 온도 값에 따라 열전달 계수 값이 보정되면서 에너지 평형이 된 지점에서 일정한 온도를 유지하게 된다. 대기로 열전달이 되는 경계면의 열전달 계수의 변화를 본 연구에서 제시한 방법으로 개발한 프로그램을 이용하여 계산하였으며, 열 평형 상태에 도달했을 때의 각 도체에 대한 열전달 계수를 표 2에 나타내었다. 교류 전류의 실효값이 1000[A]일 때 에너지 평형이 된 지점의 온도와 모델A의 해석해를 비교하면 표 3과 같다. 이렇게 산정된 열전달 계수 값을 입력으로 하여 시간에 대한 온도 변화로 나타내면 그림 7과 같고, 계산된 결과를 보면 저항율이 작은 Cu가 Al보다 낮은 온도를 나타내는 것을 알 수가 있다. 이상의 결과는 해석해가 있는 상기 모델의 해석결과와 일치하여 본 연구에서 제안한 방법이 타당함을 알 수가 있다.

표 2 열전달 계수

Table 2 Heat transfer coefficient

도체 재질	열전달 계수[W/m ² ·°C]	
	1000[A]	2000[A]
Al	4.504	6.324
Cu	3.842	5.527

표 3 모선 온도 (모델 A : 1000[A])

Table 3 Bus bar temperature (Model A : 1000[A])

도체 재질	이론값[°C] ref.[8]	계산값 [°C]
Al	65	66.50
Cu	45	46.99

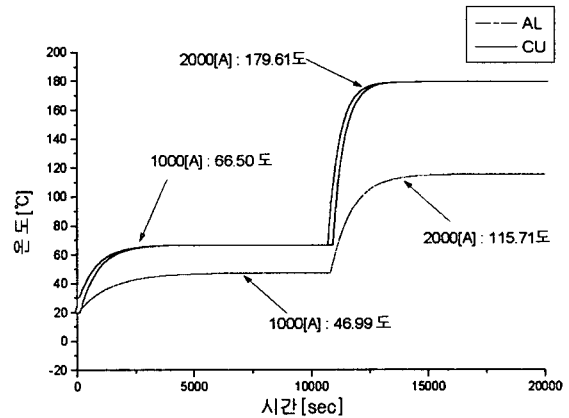


그림 7 시간에 대한 온도 특성
Fig. 7 Temperature - time characteristics

3. 해석 결과 및 검토

본 논문에서 제안한 방법(열전달 계수를 구하기 위한 해석적 방법과 유한요소법의 결합기법)을 단상 모선과 삼상 모선에 적용하여 GIS 모선의 온도 분포를 예측하고 측정값과 비교하였다.

3.1 단상모선의 열해석

본 연구에서 다룬 단상 모선 모델은 도체가 중공(中空)도체이며 SF₆ 가스로 채워져 있다. 모델의 사양과 냉각매체의 특성값을 표 4와 표 5에 각각 나타내었다. 표 4에서 보는바와 같이 도체 Al재질을 사용하였으며 탱크의 재질은 STS를 사용하였다. 단상모선의 교류전류는 실효치 4000[A]이며, 입력 주파수는 60[Hz]이다.

단상 모선의 열해석시 열원이 되는 도체부의 줄손과 탱크부의 와류손은 자체해석에서 구하였으며, 대기로 열전달이 되는 경계면의 열전달 계수 값은 2.5절에서 제시한 방법으로 구하였다. 이를 표로 나타내면 표 6과 같다.

표 4 단상모선 (모델 B)

Table 4 Single phase bus bar (Model B)

모델명	도체			전류 [A]	가스
	종류	내반경	외반경		
model B	Al	42.5	60	4000	SF ₆
	탱크				
	종류	내반경	외반경		
	STS	248	254		

표 5 냉각매체의 특성치(60 °C)[9]

Table 5 Some parameters of cooling materials (60 °C)

항목	SF ₆	공기
밀도[Kg/m ³]	13.5	1.026
동점성계수[m ² /s]	1.31e-6	19.6e-6
열전도율[W/m°C]	0.0153	0.0287

표 6 손실 및 열전달 계수

Table 6 Power loss and Heat transfer coefficient

도체 재질	손실 [W/m]	열전달 계수 [W/m ² °C]	탱크 재질	손실 [W/m]	열전달 계수 [W/m ² °C]	외부 온도
Al	119.836	7.4817	STS	37.1259	3.1795	11.3

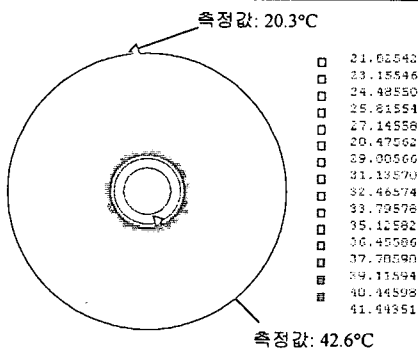


그림 8 온도 분포

Fig. 8 Temperature distribution

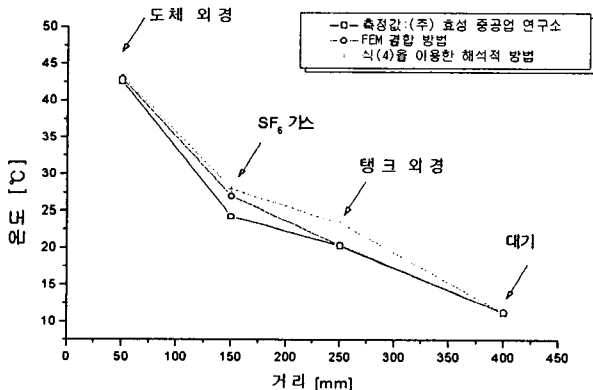


그림 9 거리에 대한 온도 변화

Fig. 9 Temperature - distance characteristics

그림 8은 본 연구에서 제안한 방법(열전달 계수를 구하기 위한 해석적 방법과 유한요소법의 결합기법)을 이용하여 구한 GIS 모선의 온도분포도이다. 그림 9는 열 평형상태에 도달하였을 때 측정 및 해석에 의한 각부의 온도이다. 그림을 보면 탱크부의 온도가 약 21 [°C]이고, 도체부의 온도가 약 42 [°C]인데, 이 결과는 열전달 계수를 구한후 식 (4)만을 이용하여 해석적으로 구한 값보다 측정값에 거의 일치함을 알 수가 있어 본 연구에서 제시한 온도상승 예측 기법이 보다 타당함을 알 수 있다.

3.2 삼상모선의 열해석

본 논문에서 다룬 삼상 모선 모델의 사양은 표 7에 나타내었다. 삼상 모선의 모델의 형태는 역정삼각형의 도체배열을 하고 있으며, 도체는 중공(中空)도체이다. 삼상 모선의 내부는 SF₆ 가스로 채워져 있다. 표 7에서 보는바와 같이 도체는 Cu재질을 사용하였으며 탱크의 재질은 Al이다. 삼상 모선의 교류 전류의 실효값을 4000[A]이며 입력 주파수는 60[Hz]이다.

표 7 삼상모선 (모델 C)

Table 7 Three phase bus bar (Model C)

모델명	도체			전류 [A]	가스
	종류	내반경	외반경		
model C	Cu	46	60	A상:4000 B상:4160 C상:4000	SF ₆
	탱크				
	종류	내반경	외반경		
	Al	450	460		

삼상 모선의 열해석시 열원이 되는 도체부의 줄손과 탱크부의 와류손은 자체해석에서 구하였으며, 대기로 열전달이 되는 경계면의 열전달 계수 값은 2.5절에서 제시한 방법으로 구하였다. 그러나 이 값은 원통의 원주 방향으로의 평균치이다. 실제로는 삼상 모선의 경우 열원이 위쪽에 두 개 있고 아래쪽에 하나 있기 때문에 바닥에서 대류가 가장 잘 일어나고 위쪽이 가장 대류가 덜 일어나는 부분이다. 즉 모선내의 각 상의 온도차에 의한 자연대류의 영향으로 도체 경계면에서 열전달 계수를 다르게 산정하여 구하여야 한다. 이렇게 산정한 열전달 계수의 값과 열원이 되는 손실 값을 표 8에 나타내었다.

표 8 손실 및 열전달 계수

Table 8 Power loss and heat transfer coefficient

탱크 재질	손실 [W/m]	열전달 계수 [W/m ² °C]	외기온도 [°C]	
Al	75.0705	2.8	13	
도체 재질	손실 [W/m]	열전달 계수 [W/m ² °C]		
Cu	A 상	92.221		5.1503
	B 상	99.734		6.5273
	C 상	92.2041	5.1503	

참고 문헌

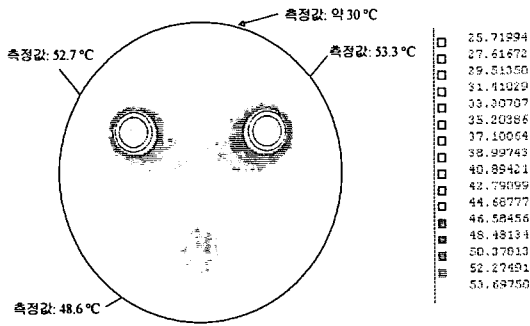


그림 10 삼상모선의 온도분포도
Fig. 10 Temperature distribution of three - phase bus bar

그림 10은 본 연구에서 제안한 방법(열전달 계수를 구하기 위한 해석적 방법과 유한요소법의 결합기법)을 이용하여 구한 삼상 GIS 모선 내부의 온도분포도이다. 여기서 각 상의 도체부 온도는 A상 온도가 약 55.1[°C], B상이 48.8[°C], C상이 54.4[°C] 이고, 탱크부의 온도가 약 25[°C]이다. 해석 결과를 보면 도체부에서는 도체와 가스사이의 경계면에서 열전달 계수를 2.5절의 방법으로 산정하여 측정값과 거의 일치하는 온도를 예측할 수 있었다. 한편, 탱크부에서는 탱크내에 3개의 서로 다른 열원(즉 3상도체)이 존재하기 때문에 탱크와 대기 사이의 경계면에서 단일한 값을 갖는 열전달 계수를 적용할 수가 없다. 본 연구에서는 이들의 평균값을 적용하여 구하였기 때문에 탱크부에서 실제 측정값과 해석값이 차이가 나는 것으로 생각된다

4. 결 론

본 논문에서는 열해석시 중요한 입력 변수인 열전달 계수를 2.5절에서 제시한 방법을 이용하여 산정하였고, 이를 유한요소법과 결합한 새로운 열해석 기법을 제안하였다. 본 논문에서 제시한 방법의 타당성을 해석해가 있는 모델에 적용하여 검증하였으며, 초고압 GIS 모선에 적용하여 온도분포를 예측한 결과 실제 측정값과 일치하는 것을 볼 수 있었다. 단상 모선인 경우 실제 측정된 온도와 비슷한 값을 얻었으며, 삼상 모선의 경우 도체부에서는 측정값과 거의 일치함을 알 수 있었으나 탱크부에서 측정값과 차이가 있음을 확인하였다. 이는 삼상의 경우 위쪽에 두개의 열원을 가지고 있기 때문에 위로 상승하는 경계층의 발달에 의해 원통바닥에서 대류가 잘 일어나고 위쪽이 덜 일어나기 때문이다. 따라서 탱크부의 경우 열전달 계수를 국부적으로 다른 값을 취해야 하나 본 연구에서는 이들의 평균값으로 열전달 계수를 산정하여 해석하였기 때문이다. 향후 삼상 모선의 경우 탱크내 대류에 의한 SF6 가스의 유동 및 도체 배열등을 고려한 보다 정확한 탱크와 대기사이의 경계면에서의 국부적으로 다른 열전달계수를 고려한 해석이 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 지원 중기거점 기술개발과제인 초고압 전력기기 기초설계 기술개발로 수행한 연구 결과임. 아울러 본 연구에 사용된 자료를 제공하여 주신 (주) 효성 중공업 연구소에 감사 드립니다.

- [1] 이병운 외6인, “초고압 전력기기 기초 설계 기술 개발 동향”, 전기기기 연구회 춘계 학술 발표회, 제38회, pp. 123 - 130, 5월, 1998
- [2] H.Sadakuni, K.Sasamori, H.Hama, K.Inami, “Insulation and current carrying design for GIS”, JIEE, pp. 33-42 SP-96-12, 1996.
- [3] 효성중공업(주) 기술 연구소, “362kv 63kA GIS 설계 및 제조 기술 개발에 관한 연구”, 한국전력공사, 1996.
- [4] M.Necati özisik, “Heat Transfer A Basic Approach”, McGraw - Hill Publishing Company, 1990
- [5] Frank P.Incropera, David P.DeWitt, “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, John Wiley & Sons, Inc. 1996, New York
- [6] Koshi Itaka, Tomoo Araki, Takushi Hara, “Heat Transfer Characteristics of Gas Spacer Cables”, IEEE Trans. P.A., Vol. PAS -97, No. 5, pp 1579-1585, Sept/Oct 1978.
- [7] 김현훈, 한성진 외4인, “초고압 GIS 모선의 통전설계를 위한 교류자계 해석”, 전기학회 논문집 48권 5호, pp 233-240, 5월. 1999
- [8] W.Z Black, B.A.Bush, Robert T.Coneybeer, “Steady-state and transient ampacity of busbar”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 9, No. 4. pp1822-1829, October 1994.
- [9] 노철웅, 하영식, 오원근, 허우행, “SF6 가스절연 변압기의 절연 및 냉각 에 관한 연구”, 춘계 전기기기 연구회, 제 38회, pp157-160, 5월, 1998.
- [10] JIEE, “GIS의 절연설계와 통전설계”, 일본 전기학회 기술 보고, 제 208호, 2월, 1986.
- [11] M.Khalifaed, “High Voltage Engineering”, Chap.10, Marcel Dekker, Inc., 1990, New York
- [12] D. Labridis and V. Hatzianthassiou, “Finite Element Computation of Field, Forces and Inductances in Underground SF6 Insulated Cables Using a Coupled Magneto - Thermal Formulation”, IEEE Trans. Mag, Vol. 30, No. 4, pp 1407-1415, July 1994.

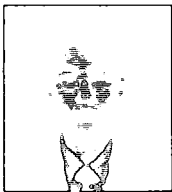
부 록 : 기호 설명

- q : 열유속 [W/m²]
- k : 열 전도율(thermal conductivity) [W/m°C]
- T : 온도(Temperature)[°C]
- Q : 단위 체적당 단위 시간당 발생되는열량 [KJ/m³/sec]
- ρ : 밀도 [kg/m³]
- C : 열용량 [J/kg°C]
- V : 체적 [m³]
- h : 대류 열전달 계수 [W/m²°C]
- ε : 복사계수

σ : Stefan - Boltzmann 상수
 (5.67×10^{-8}) [W/m²K⁴]
 A_s : 표면적 [m²]
 Gr_D : 그라쇼프수(Grashof number)
 Pr : 프란틀수(Prandtl number)

Ra_D : 레이리수(Rayleigh number)
 ν : 동점도(Dynamic viscosity) [m²/sec]
 g : 중력가속도 [m/sec²]
 β : 체적 열팽창계수
 α : 열확산율 [m²/sec]

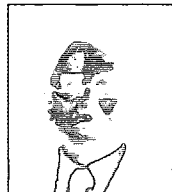
제 자 소 개



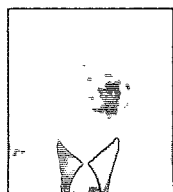
김 현 훈 (金 鉉 勳)
 1975년 1월 7일생. 1997년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업. 현재 (주)에스에이티 연구개발 부문에서 연구원으로 재직중
 Tel : 02-3461-0077
 E-mail :



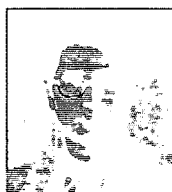
정 진 교 (鄭 鎭 敎)
 1967 10월 18일생. 1991년 강원대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전기연구소 전력기기연구부 스위치 기어 연구팀에서 선임연구원으로 재직중
 Tel : 0551-280-1565
 E-mail : jkkyo@keri.re.kr



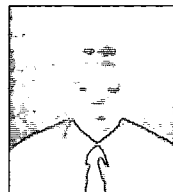
한 성 진 (韓 聲 鎭)
 1955년 6월 27일생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1994년 8월 - 1995년 8월 캐나다 Queen's 대학 방문교수. 1983년 3월 - 현재 동아대 전기공학과 교수
 Tel : 051-200-7737
 E-mail : schahn@daunet.donga.ac.kr



이 병 운 (李 秉 潤)
 1967년 11월 9일생. 1990년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 한국전기연구소 전력기기연구부 스위치기어 연구팀에서 선임연구원으로 재직중
 Tel : 0551-280-1507
 E-mail : bylee@keri.re.kr



주 수 원 (周 秀 元)
 1942년 1월 28일 생. 1968년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1970년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1981년 동 대학원 전기공학과 수료(공학박). 1993년 10월 - 현재 동아대학교 전기공학과 교수
 Tel : 051-200-7735
 E-mail : swjoo@daunet.donga.ac.kr



박 경 엽 (朴 敬 燁)
 1957년 1월 3일생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 영국 Liverpool 대학 졸업(공학박). 1978년부터 1981년 까지 효성중공업 전장설계부에서 사원으로 근무. 1981년부터 한국전기연구소에서 재직중이며 현재 전력기기연구부 스위치기어 연구팀에서 책임연구원으로 재직중
 Tel : 0551-280-1561
 E-mail : kypark@keri.re.kr