

GIS모선의 온도상승 예측을 위한 해석적 방법과 Flux2D의 결합

김 현훈, 김 정철, 한 성진
 동아대학교 전기공학과

Coupling of Flux2D and Analytic Method for Temperature Rise Prediction of Busbar Part of EHV GIS

H.H.Kim, J.C.Kim, S.C.Hahn
 Dept. of Elec. Eng. Dong-A Univ.
 schahn@daunet.donga.ac.kr

Abstract - In order to design the current carrying conductor for GIS, it is important to predict temperature-rise when rated current flows. This paper deals with the coupling of Flux2D and analytic method to calculate the heat transfer coefficient. Heat transfer by conduction and convection is considered between the current carrying conductor and SF₆ gas. The result shows reasonable temperature distribution.

1. 서 론

일반적으로 6000 [A]이상의 대전류를 통전시키는 GIS의 경우에는 주도체의 지름, 탱크의 지름, 탱크의 두께등의 GIS 설계 치수를 결정할 때 열적 제한 요소가 절연설계에 따른 제한조건보다 더 크게 영향을 주는 것으로 보고되고 있다. 따라서 전류 통전시 GIS 내부 및 용기의 온도상승을 정확히 예측하는 것은 GIS 모선 설계에 매우 중요하다. 그러나 온도상승을 예측하기위해서 열해석을 할 때 모델의 각 경계면에서 열전달계수를 적용하는 것은 상당히 어렵다. 특히 경계면에서의 열전달은 복사와 대류로 나눌 수 있으며, 복사 열전달계수는 모델의 표면상태에 따라 결정이 되지만, 대류 열전달계수는 해석모델, 유동조건, 유체의 종류에 따라 달라지므로 이 열전달계수를 결정하기란 매우 어렵다. 본 논문에서는 물질상수, 해석모델의 형상 등을 고려한 Nusselt Number를 이용하여 열전달계수를 해석적으로 구하고 이를 상용유한요소 코드인 Flux2D와 결합한 GIS 모선의 온도분포 예측 기법을 다룬다. 이 방법을 실제 모델에 적용한결과, 온도 분포 특성이 측정값에 거의 일치하는 것을 확인할 수 있었으며, 향후 전력기기의 온도 상승을 예측하는 새로운 기법으로 제안한다.

2. 초고압 GIS 모선의 온도 분포 해석이론

2.1 기본 이론 [1]

열평형 방정식은 다음과 같다.

$$\rho C_p V \frac{dT}{dt} = I^2 R(T) - hA_s(T - T_\infty) - \epsilon \sigma A_s(T^4 - T_\infty^4) \quad (1)$$

한편, 정상 상태에서 통전 전류는

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

와 같이 된다.

한편, 식(2)에서 저항은 온도의 함수로

$$R(T) = \rho_e L \left[\frac{1 + \alpha_e(T-20)}{Ax} \right] \quad (3)$$

과 같다.

2.2 용기속의 대류 열 전달

대류 열전달은 탱크와 도체 표면에서 다음과 같이 표현할 수 있다. [2]

$$W_\infty = 2\pi \frac{K_{eff}}{\ln(D_o/D_i)} (T_c - T_\infty) H \quad (4)$$

2.3 용기속의 복사 열 전달

용기 내부에서의 복사 열전달은 Stefan - Boltzmann 법칙에 의해 다음과 같이 표현할 수 있다. [3]

$$W_r = \alpha(T_1^4 - T_2^4) A_1 \left[\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right) \right]^{-1} \quad (5)$$

2.4 열전달 계수

물질상수, 해석모델의 형상 등을 고려한 Nusselt Number를 이용하여 초고압 GIS 모선을 원통으로 단순화할 때, 수평원통에 대해 자유대류의 식은 다음과 같다.

$$\overline{N_D} = \left\{ 0.60 + \frac{0.387 Ra_D^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$$

($10^{-5} < Ra_D < 10^{12}$) (6)

이식에서 Rayleigh수는 다음과 같이 정의된다.

$$Ra_D = Gr_D Pr = g\beta(T_s - T_\infty) \frac{D^3}{\nu} Pr$$
 (7)

따라서 대류 열전달계수는

$$\overline{h_s} = \frac{k}{D} \overline{N_D}$$
 (8)

이다. 이식을 이용하여 외기온도 20[°C]일 때 공기내에서 도체의외경과 열원에 의한 도체의 온도 변화에 따른 열전달 계수를 그려보면 그림 2.1과 같다.

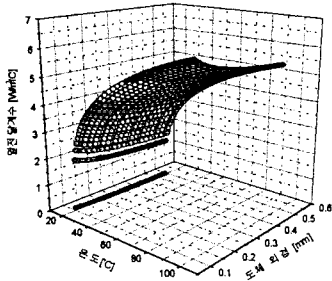


그림 2.1 도체의외경과 온도에 대한 대류 열전달계수(공기) 열전달계수의 계산과정은 다음과 같다.

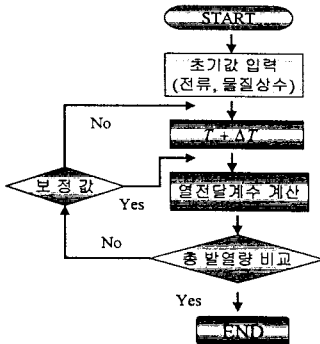


그림 2.2 열전달계수의 계산과정

열전달계수의 계산과정을 보면 입력된 파라미터를 가지고 온도를 Δt 만큼 증가시켜 계산한 후, 탱크부에서의 열 전달은 식(1)에 대입하여 실제의 입력된값과 비교하여 결정하였고, 도체부에서의 열전달은 식(4)과 식(5)에 대입하여 결정하였다. 그리고 보정값은 도체부에서 탱크 부까지의 열전달량의 변화량에 따라서 결정하였다.

2.5 프로그램 검증

위의 방법으로 구한 열전달계수 변화를 보면 그림 2.3

과 같다. 최종 열전달계수는 10.317 [W/m²°C] 이고 온도는 40.7[°C]이다.

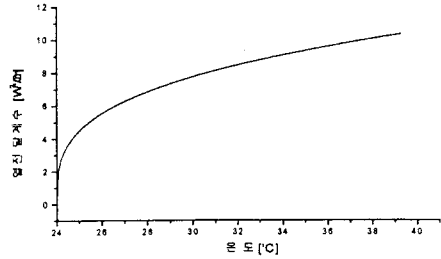


그림 2.3 온도에 대한 열전달계수

이때 해석 모델의 사양은 표2.1과 같다.

표 2.1 모델 A

도체 내경	도체 외경	도체 재질	외기 온도	전 류	복사 계수
40.6[mm]	48.3[mm]	Cu	20[°C]	1000[A]	0.1

3. 해석 결과 및 검토

3.1 단상모선의 열 해석

본 논문에서 다른 단상 모선 모델의 사양을 표 3.1과 표 3.2 에 나타내었다.

표 3.1 단상 모선

(단위: mm)

사양	도체			TANK			전 류	가 스
	종류	내반경	외반경	종류	내반경	외반경		
Model B	Al	42.5	60	STS	248	254	4000	SF ₆

표 3.2 냉각매체의 특성치(60 °C)

항 목	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

자제해석에 의한 손실을 보면 도체부의 전체손실은 124.35 [W/m]이고, 탱크부의 전체손실은 39.4429[W/m]을 얻었다. 따라서 2.4절에서 제시한 방법으로 근사화하여 열전달계수 h 값을 구하였으며, 이때 도체와 탱크 사이의 열전달계수 h = 7.8141[W/m²°C]이고, 탱크와 공기 사이의 열전달계수는 h = 3.1347 [W/m²°C] 이다. 복사 계수는 탱크 = 0.2, 도체 = 0.2, 외부온도 T_∞는 상온인 11.3[°C]를 주고 계산하였다.

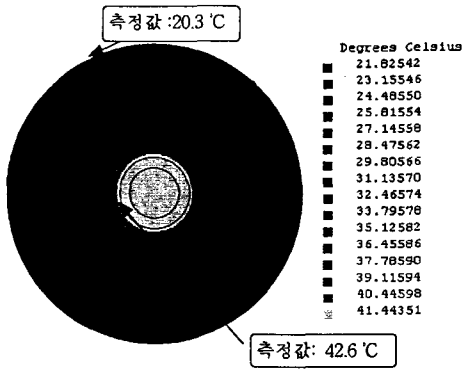


그림 3.1 단상모선의 온도분포도

그림 3.1은 위의 해석조건하에서 Flux2D를 이용하여 구한 GIS내부의 온도분포도이다. 해석결과를 보면 탱크부의 온도가 약 21 [°C]이고, 도체부의 온도가 약 41 [°C]이다. 이 결과는 실제의 단상모선의 온도와 거의 유사하여 열전달계수가 정확히 산정됨을 알 수 있다.

3.2 삼상모선의 열 해석

본 논문에서 다룬 삼상 모선 모델의 사양은 표 3.3에 나타내었다.

표 3.3 단상 모선

(단위 : mm)

사양 모델명	도체			TANK			전류	가스
	종류	내반경	외반경	종류	내반경	외반경		
Model C	Cu	46	60	Al	450	460	A상: 4000 B상: 4160 C상: 4000	SF ₆

자계해석에 의한 손실을 보면 도체부의 전체손실이 A상 92.221 [W/m], B상 99.734 [W/m], C상 92.2041 [W/m]이고, 탱크부에는 75.0705 [W/m]의 손실이 발생한다. 2.4절에서 제시한 방법으로 근사화하여 열전달계수 h 값을 구하면 도체와 탱크 사이의 열전달계수는 A상 $h = 9.523 [W/m^2°C]$, B상 $h = 9.745 [W/m^2°C]$, C상 $h = 9.423 [W/m^2°C]$ 이다. 이 값은 원통의 원주 방향으로의 평균치이다. 그러나 실제로는 원통바닥에서 대류가 가장 잘 일어나고 위쪽이 덜 일어나기 때문에 이 값을 보정하여야 한다. 탱크와 공기사이의 열전달계수는 $h = 2.8 [W/m^2°C]$ 이다. 복사 계수는 탱크 = 0.2, 도체 = 0.2, 외부온도 T_{∞} 는 상온인 13 [°C]를 주고 계산하였다.

그림 3.2은 위의 해석조건하에서 Flux2D를 이용하여 구한 GIS내부의 온도분포도이다. 해석결과를 보면 탱크부

의 온도가 약 25 [°C]이고, 도체부의 A상의 온도는 약 55.1 [°C], B상의 48.802 [°C], C상의 54.4 [°C]이다.

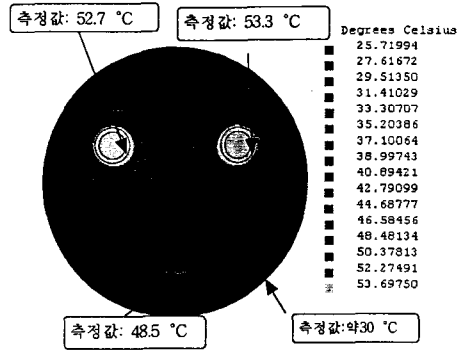


그림 3.2 삼상모선의 온도분포도

이 결과를 보면 도체부의 온도는 경계층을 고려하여 열전달계수를 입력하였기 때문에 실제의 도체부의 온도와 거의 유사하게 나오는 것을 알 수가 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 열 해석에 있어서 중요한 변수인 열전달계수를 2.4절에서 제시한 방법을 이용하여 열전달계수를 산정하였고, 상용 프로그램인 FLUX2D를 이용하여 열 해석을 하였다. 단상모선인 경우 실제 측정된 온도와 비슷한 값을 얻었지만, 삼상 모선의 경우 탱크부에서 실제 온도와 차이가 나는 것을 볼 수가 있다. 이는 탱크부에서의 열전달계수 h가 일정하다고 가정 했지만 실제로는 삼상의 경우 위쪽에 두개의 열원을 가지고있기 때문에 실제로는 위로 상승하는 경계층의 발달에 의해 원통바닥에서 대류가 가장 잘 일어나고 위쪽이 덜 일어나기 때문이다. 따라서 이 경우 열전달계수를 국부적으로 다른 값을 취해야 한다. 삼상 모선의 경우 정확한 열전달계수를 구하기 위해서는 탱크내 대류에 의한 SF₆ 가스의 유동 및 도체 배열등에 대한 고려가 이루어져야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 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.
- [2] M.Necati özisik, "Heat Transfer A Basic Approach", McGraw - Hill Publishing Company, 1990.
- [3] Koshi Itaka, Tomoo Araki, Takushi Hara, "Heat Transfer Characteristics of Gas Spacer Cables", IEEE Trans. P.A., Vol. PAS -97, No. 5, Sept/Oct 1978.
- [4] Frank P.Incropera, David P.DeWitt, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", John Wiley & Sons, Inc. 1996, New York