

전자계 결합특성 및 대류 경계조건을 적용한 수치 해석적 열전달 해석

Numerical Heat Transfer Analysis applying Coupled Electromagnetic Characteristics and Convection Boundary Condition

김 창 기*, 김 상 훈*, 정 상 용**
Changki Kim*, Shanghoon Kim*, Sang-Yong Jung**

Abstract

The heat transfer analysis applying finite element method has been carried out. Particularly, the convection boundary condition associated with the mixed boundary condition is numerically formulated by the Galerkin method analogous to the magnetic field problem. Also, the coupled electromagnet-thermal field analysis by the proposed heat transfer coefficient computation algorithm is executed to enhance the accuracy of solutions. Finally, the validity of the proposed results is verified by comparison with the measured ones.

요 약

본 논문에서는 정열계 해석을 위해 유한요소법(F.E.M)을 이용한 열전달 해석 기법에 대하여 다루고 있다. 특히, 열전달의 주요 쟁점인 혼합 경계조건을 띄는 대류 경계조건을 자체 문제와 비교하여 갤러킨법(Galerkin Method)으로 정식화하였다. 그리고 해의 신뢰성을 확보하기 위해 자체 해석을 통해 열원이 되는 손실을 구한 후, 반복적 알고리즘을 통해 에너지 평형 방정식을 만족하는 열전달 계수를 산정하여 열전달 문제를 고려하는 자체-열계 결합 해석을 하였다. 마지막으로, 측정치와 비교하여 제안된 방법의 효용성을 증명하였다.

Key words : heat transfer coefficient, F.E.M, mixed boundary condition, GIS, heat source

1. 서론

산업사회가 급속히 발전함에 따라 전력수요가 급증

* 동아대학교 전기공학과
(Dept. of Electrical Engineering, Dong-A University)

★ 교신저자 (동아대학교 교수)

E-mail:syjung@dau.ac.kr

※ 감사의 글 (Acknowledgment)

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신 인력양성사업과 산업 자원부의 지원에 의하여 기초전력 연구원 (R-2007-2-060)주관으로 수행된 연구임.

接受日:2009年 9月 3日, 修正完了日: 2009年 9月 25日

하고 전력기기에 대한 수요와 용량이 급격히 증대되고 있다. 이에 편승하여, 우리 나라의 전력 수요 또한 경제 성장과 더불어 매년 증가하고 있으며, 전력기기의 대용량화, 고효율화, 친환경화 등으로 기술 발전이 진행되고 있다. 한편, 다양한 분야에 활용되는 전력기기들은 열적 요소에 의해 큰 영향을 받고 있다. 전력기기들의 각 부분에 사용된 재질은 온도의 한계성을 지니고 있으므로 각 부분에 대한 온도 분포의 예측은 매우 중요하다.

열적 요소에 의해 많은 제한을 가지는 전력기기의 열해석 방법에는 유체역학적으로 해석하는 열유동 방법 및 한 영역에서 다른 영역으로 열에너지의 이동을

해석하는 열전달 해석 방법이 있다. 열유동 해석은 유동현상 및 온도분포를 파악하기 위한 방법으로 유체역학 지배방정식인 연속 방정식과 운동량 방정식을 동시에 고려해야 한다[1]-[2]. 그리고 열전달 해석은 전도, 대류, 복사의 요소를 고려한 지배 방정식을 풀어야 한다[3]. 열유동 해석의 경우, 지배 방정식인 연속 방정식 및 운동량 방정식이 많은 요소를 고려하여 복잡하므로, 해석 시간이 열전달에 비해 매우 길지만, 열전달 해석 보다 해의 신뢰성이 높다는 장점을 지닌다. 반면, 열전달 해석은 해의 신뢰성은 떨어지지만, 지배 방정식이 간단하여 열유동 해석 보다 해석 시간이 빠르며, 전력기기 등에 쉽게 적용할 수 있는 이점 때문에 널리 사용된다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0, \quad \rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (1)$$

$$-k \nabla^2 T = q \quad (2)$$

식 (1)은 열유동 지배 방정식 중 연속 방정식 및 운동 방정식을 표현하며, ρ 는 유체의 밀도, \vec{v} 는 유체의 속도, \vec{g} 는 중력 가속도, 그리고 μ 는 점성계수이다. 우변의 운동 방정식은 일정한 밀도와 일정한 점성계수를 가지는 Newton 유체를 나타내는 Navier-Stokes 방정식이다. 식 (2)는 열전달 지배 방정식인 2차원 푸리에(Fourier) 열전도 방정식을 나타낸다. k 는 열전도율, T 는 온도, q 는 열유속을 표현한다. 열유동 현상에 해당하는 식 (1)은 앞에서 표현한 바와 같이 다양한 요소를 고려해야 하므로 지배 방정식이 복잡한 반면, 열전달 방정식인 식 (2)는 지배 방정식이 간단하게 정의됨을 알 수 있다.

한편, 열전달 해석에는 등가회로방법과 수치해석 기법인 유한요소해석(Finite Element Analysis)이 있다. 등가회로방법은 옴의 법칙과 푸리에 법칙 사이의 수학적 유사성을 이용하여 전도, 대류, 복사의 요소를 각각 열저항으로 대체하여 등가모델화한 후, 해석하는 기법이다. 그리고 유한요소해석은 자체 지배 방정식과 유사한 열계 지배 방정식의 정식화를 통해 해석하는 기법이며, 다음 식을 따른다.

$$I = \frac{\Delta V}{R} \Leftrightarrow Q = kA \frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{\Delta T}{\frac{\Delta x}{kA}} = \frac{\Delta T}{R_{th}} \quad (3)$$

$$-\nu \nabla^2 A = J \Leftrightarrow -k \nabla^2 T = q$$

$$A = 0, \quad \frac{\partial A}{\partial n} = 0 \Leftrightarrow -k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_{\infty}) \quad (4)$$

식 (3)은 등가회로방법의 옴의 법칙과 푸리에 열전도 법칙의 유사성을 나타내며, 식 (4)는 자체와 열계 해석 사이의 유사성을 보여준다. 식 (3)에서 전류 I 가 열원 Q 로, 전위차 ΔV 가 온도차 ΔT , 그리고 저항 R 이 열저항 R_{th} 로 모델화되었으며, 식 (4)에서는 자체와 열계의 지배 방정식의 형태는 같지만, 경계조건이 자체 해석에서는 고정 및 자연 경계조건이 적용되는 반면, 열계에서는 대류 요소를 가진 혼합 경계조건을 띄기 때문에 이 경계조건을 추가적으로 정식화해야 한다. 그림 1은 등가회로방법 및 유한요소해석의 기본 구조를 나타낸다.

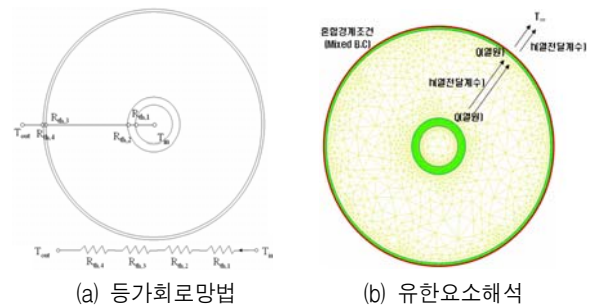


Fig. 1. Structure of equivalent circuit method & FEM

그림 1. 등가회로방법 및 유한요소해석의 구조

그림과 같이, 등가회로방법은 각 물질 경계에서의 온도를 구할 수 있지만, 유한요소해석은 해석 모델의 온도 분포를 산정할 수 있다.

본 논문에서는 열유동 해석에 비해 짧은 연산 시간을 가지는 열전달 해석을 해의 신뢰성을 향상시키는 방향으로 해석을 수행하고자 하며, 이 중 대류 경계조건을 정식화를 통한 유한요소해석 기법을 다루고자 한다. 또한, 이를 구조가 단순하여 모델링 및 해석이 용이한 단상 GIS(Gas Insulated Switchgear : 절연 및 소호 특성이 탁월한 SF6 가스를 이용하여 모선, 차단기, 단로기, 접지개폐기, 변류기 등을 금속 탱크 내에 내장한 장치) 모선에 적용하고자 한다. 특히, 자체 해석을 수행하여 열원이 되는 전력손실을 구하고, 에너지 평형방정식을 통한 반복적 알고리즘을 이용하여 열전달 계수를 산정한 후 이를 적용한 유한요소해석 기법을 다루고자 한다[4].

II. 본론

1. 열전달 지배 방정식의 정식화

유한요소해석을 통하여 열전달 해석을 하려면, 먼저 열전달 방법인 전도, 대류, 복사 요소를 고려한 지

배 방정식 정식화가 선행되어야 한다. 열전달 지배 방정식으로는 2차원 푸리에 열전도 법칙에 의한 열전도 방정식이 쓰이며, 경계조건으로는 대류 표면에서 전도에 의한 열유속과 대류의 열유속이 같다는 혼합 경계조건이 적용된다. 일반적으로 전기기기에서 복사는 기기에 직접적인 영향이 작으므로 고려하지 않는다.

식 (4)에서 정의된 열계 지배 방정식 및 경계조건을 자계에서의 정식화 과정과 동일하게 갤러킨법 (Galerkin method)을 통해 풀면, 식 (5)와 같은 초기 형태가 되며, 노드별로 나타내면 식 (6), 행렬로 나타내면 최종적으로 식 (7)과 같은 꼴로 표현할 수 있다. 이 행렬식을 계산하여 각 노드의 온도 T를 구하게 된다[5].

$$\int_R (-k\nabla^2 T - q) N_i dR + \int_l \left(k \frac{\partial T}{\partial n} + hT - hT_\infty \right) N_i dl = 0 \quad (5)$$

$$k \int_R \sum_{j=1}^3 (\nabla N_i \cdot \nabla N_j T_j) dR + h \int_l \sum_{j=1}^3 N_i (N_j T_j) dl = \int_R q N_i dR + h T_\infty \int_l N_i dl \quad (6)$$

$$\frac{k}{4\Delta} \begin{bmatrix} b_i^2 + c_i^2 & b_i b_j + c_i c_j & b_i b_j + c_i c_j \\ b_i b_j + c_i c_j & b_j^2 + c_j^2 & b_i b_j + c_i c_j \\ b_i b_j + c_i c_j & b_i b_j + c_i c_j & b_k^2 + c_k^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_k \end{bmatrix} + \frac{h L_{i-j}}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_k \end{bmatrix} = \frac{QV}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + h T_\infty L_{i-j} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

식 (7)의 L_{i-j} 는 대류가 적용되는 $i-j$ 면에서의 요소의 측면 길이이다. 이와 같이, 열전달 해석에서는 대류 경계조건을 적용하며, 해석하는 요소가 대류면이 아니라면, 식 (7)의 좌변의 두 번째 항과 우변의 두 번째 항은 0이 되어 일반적인 자계해석과 같은 형태를 가진다. 따라서 열전달 해석은 대류가 적용되는 대류면에서 두 번째 항인 대류 경계조건이 추가된 항을 추가적으로 고려하여 유한요소해석을 해야 한다.

2. GIS 모선의 열전달 해석

본 논문에서는 수많은 전기기기 분야 중 초고압 송변전 설비에 대표적으로 사용되는 전기기기인 GIS의 모선에 대하여 열전달 해석을 수행하였는데, 이는 단순한 모델에 먼저 적용 및 검증한 후 복잡한 전기기기에 적용하기 위함이다. 한편, GIS 모선은 가스절연개폐장치의 주요 부품 중 하나로서, 가스절연개폐장

치의 정격용량에 따라 모선의 정격용량이 결정된다 [6]. GIS 모선의 열전달 해석을 위해 먼저 자계 해석을 통해 열원이 되는 손실을 계산하고, 그 열원을 이용하여 열전달 계수를 산정한 다음, 끝으로 산정된 파라미터를 대입하여 최종적인 단상 GIS 모선의 온도 분포를 계산하였다. 표 1은 해석한 단상 GIS 모선 모델의 사양(362kV 63kA 4000A)이고 표 2는 냉각매체의 특성값(80℃)을 나타낸다. 참고로 입력 주파수는 60Hz이다.

Table 1. Specification of single phase GIS bus
표 1. 단상 GIS 모선 사양

Spec.	Material	Inner Diameter [mm]	outer Diameter [mm]
Conductor	Aluminum	85	120
Tank	Stainless Steel	496	508

Table 2. Parameter of cooling material
표 2. 냉각 매체의 특성값

Parameter	SF6 가스	공기
Density [Kg/m ³]	13.5	1.026
Dynamic Viscosity [m ² /s]	1.31e-6	19.6e-6
Thermal Conductivity [W/m℃]	0.0153	0.0287

가. 열전달 메카니즘

열전달 해석을 수행하기 앞서, 단상 GIS 모선의 열전달 메카니즘을 살펴보면, GIS 모선의 주도체에 정격 통전전류가 흐를 때 발생하는 전력손실 Q_1 이 복사 Q_{1rad} 및 자연대류 Q_{1conv} 에 의해 외부탱크로 열전달이 이루어지며, 이 성분은 다시 주도체에 흐르는 통전전류가 만든 자속이 외부탱크에 쇄교함으로써 발생하는 와류손 Q_2 와 함께 대기 중의 복사 Q_{2rad} 및 자연대류 Q_{2conv} 에 의해 열전달된다. 단상 GIS 모선에서는 이와 같은 열전달 메카니즘을 가지며, 이 과정을 수학적으로 표현한 것이 식 (8)이다.

$$Q_1 = Q_{1rad} + Q_{1conv}, \quad Q_1 + Q_2 = Q_{2rad} + Q_{2conv} \quad (8)$$

여기서, Q_1 은 주도체의 줄손실, Q_2 는 외부탱크에 쇄

교하는 와류손을 나타낸다. 이 메카니즘을 바탕으로 GIS 모선의 열전달 해석을 수행하였다. 그림 2는 단상 GIS 모선의 열전달 메카니즘을 나타낸다.

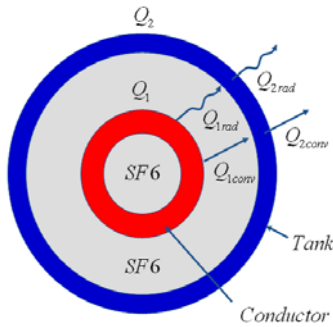


Fig. 2. Heat transfer mechnism of single phase GIS bus
그림 2. 단상 GIS 모선의 열전달 메카니즘

나. 자계 해석

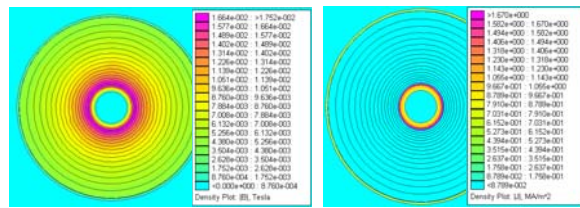
열전달 해석을 하기 앞서 모선의 온도상승을 일으키는 열원인 Q는 유체의 열유속 q와 단면적 A의 곱으로 나타낼 수 있으며, GIS 모선의 경우 모선이 축방향으로 충분히 길다고 가정했을 시, 2차원 자계 해석에서 구할 수 있는 전력손실과 같다. 따라서 GIS 모선의 열해석을 위해선 먼저 자계 해석을 하여 손실을 산정해야 한다. 모선에 정상 교류전류가 흐를 때, 전자기적 현상의 지배 방정식은 다음과 같다[7].

$$-\nu \nabla^2 \vec{A} = \vec{J} (= \vec{J}_s + \vec{J}_e) \tag{9}$$

$$P = \int \frac{J^2}{\sigma} dS \tag{10}$$

여기서, ν 는 물질의 자기 저항율, \vec{J} 는 전류밀도이다. 그리고 \vec{J}_s 는 전원전류밀도, \vec{J}_e 는 와전류밀도, σ 는 도전율이다.

식 (9)와 같이, 전류밀도 \vec{J} 를 전원전류밀도 \vec{J}_s 와 도체에 유기되는 와전류밀도 \vec{J}_e 로 나누어 다시 쓸 수 있는데, 이는 GIS 모선의 발열원으로 주도체부의 줄손실과 모선이 만드는 자속이 외부탱크에 쇄교함으로써 발생하는 와류손을 고려하고자 하는 것이다. 이를 이용하여 단위길이당 도체의 전력손실을 식 (10)을 통해 구할 수 있다. 유한요소해석시 외부탱크에 유기되는 와전류에 의한 탱크의 차폐효과를 알고자 탱크 외반경의 약 3배가 되는 곳에 고정 경계조건을 주었으며, 그림 3은 자계 해석결과 자속밀도 및 전류밀도 분포를 나타낸다.



(a) 자속밀도 분포 (b) 전류밀도 분포
Fig. 3. Flux density and current density distribution of single phase GIS bus

그림 3. 단상 GIS 모선의 자속밀도 분포 및 전류밀도 분포

분포된 전류밀도를 이용하여 손실, 즉, 열원을 산정하게 되는데, 정상상태 해석이므로 도체부와 탱크부에 주로 전류밀도가 분포함을 확인할 수 있다[8]-[9].

다. 열전달 계수의 산정

열전달 계수는 물리적으로 단위 표면적당 단위 온도차에 대한 열전달율을 뜻하며, 이는 유체의 종류, 유동조건, 유량 및 표면형상, 온도 등 여러 요소에 의한 함수이므로 산정하기가 난해하다. 즉, 유체가 흐르는 관을 고려해보면, 관내의 한 표면에서의 대류 열전달 계수는 유체의 속도, 유체의 물성값, 관 표면의 거칠기, 관의 형상과 치수 등에 의해 결정되기 때문에 이 값을 구하는 것은 쉽지 않다. 본 논문에서 해석하고자 하는 단상 GIS 모선의 경우, 구조를 수평 원통형으로 단순 모델링한 후, 수평 원통에 관한 실험식, 유체에 작용하는 점성력에 대한 부력의 비인 그라소프수(Grashof number), 유체에 열대류의 발생 여부 결정을 위해 도입한 무차원의 수인 레이리수(Rayleigh number), 수평원통에 자연대류를 고려한 누셀트수(Nusselt Number)를 적용하여 GIS 모선에서 자연대류를 고려한 평균 대류 열전달 계수를 구하게 된다. 이 과정을 식 (11)을 통해 나타내었다[10].

$$Gr_D = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2}, Ra_D = Gr_D Pr$$

$$Nu = \left\{ 0.60 + \frac{0.387 Ra_D^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2, h = \frac{Nu k}{D} \tag{11}$$

여기서, g는 중력 가속도, β 는 체적 팽창계수, T_s 는 표면온도, L은 기하학적 특성길이, ν 는 유체의 동점성계수, Pr은 열확산에 대한 점성확산의 비인 프란틀수(Prandtl number), D는 직경을 나타낸다. 한편, 열전달 메카니즘에 따르면, 자계해석시 손실과 열원이 같다고 할 수 있다. 열계 해석시 열적 스트레스를 일으키는 열원을 구하려면, 복사 및 자연대류의 영향을

고려해야 하는데, 이는 식 (12)의 대류에 의한 열원 (Q_{conv})과 복사에 의한 열원(Q_{rad})을 더하여 GIS 모선의 총 열원에 대한 에너지 평형 방정식 식 (13)으로 나타낼 수 있다.

$$Q_{conv} = hA(T_i - T_o), \quad Q_{rad} = \epsilon\sigma A(T_i^4 - T_o^4) \quad (12)$$

$$P = Q = I^2R = hA(T_i - T_o) + \epsilon\sigma A(T_i^4 - T_o^4) \quad (13)$$

여기서, ϵ 은 표면의 방사율, σ 는 스테판-볼츠만 상수로 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} [W/m^2K^4]$ 이다. 자계해석을 통해 구한 전력손실과 열전달 계수 산정 과정을 통해 구한 열원을 에너지 평형 방정식에 적용하여 비교함으로써 온도에 따른 열전달 계수의 변화를 고려한 열전달 계수 산정 알고리즘이 제안되는데, 그림 4와 같은 알고리즘으로 표현할 수 있다.

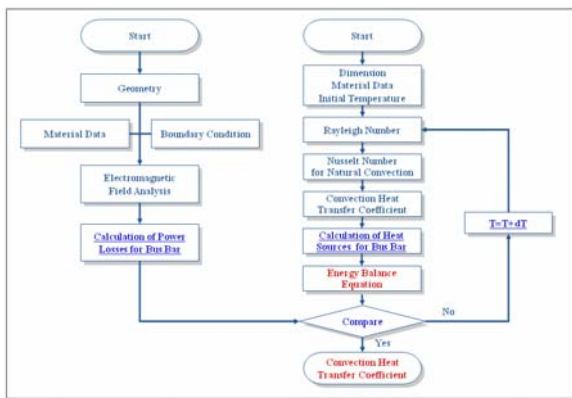


Fig. 4. Heat transfer coefficient computation algorithm
 그림 4. 열전달 계수 산정 알고리즘

그림 4의 알고리즘 과정은 다음과 같다. 좌측에서는 자계해석을 통해 도체부와 외부탱크의 손실을 구하며, 우측에서는 임의의 초기 온도 T로 초기 레이리수를 계산하고, 그에 따른 초기 누셀트수를 이용하여 초기 열전달 계수에 의한 GIS 모선의 초기 열원을 계산한다. 그리고 에너지 평형 방정식에 의해 열원과 손실을 비교하여 일정 오차 이내로 같아질 때까지 ΔT 만큼 온도를 증가시켜 반복 계산하여 최종 열전달 계수를 산정한다. 이 과정에서 외부탱크와 도체에서의 자연대류 열전달 계수를 산정할 수 있다.

라. 수치해석적 열전달 해석

단상 GIS 모선 모델의 온도상승을 야기하는 열원인 전력손실을 열원으로 적용하였으며, 제안된 알고리즘을 이용하여 각 경계면에서 자연대류를 고려한 열전달 계수를 산정하였다. 표 3은 단상 GIS 모선 모

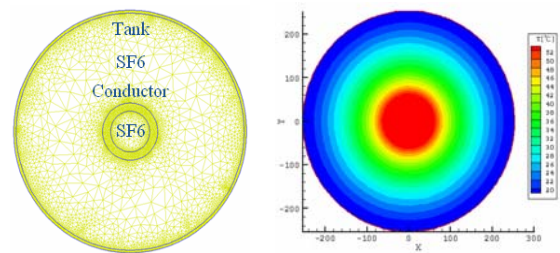
델의 산정된 전력손실 및 열전달 계수를 나타낸다.

Table 3. Power loss and heat transfer coefficient of single GIS bus

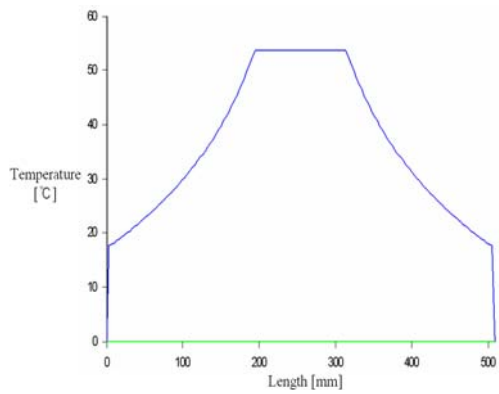
표 3. 단상 GIS 모선의 산정된 전력손실 및 열전달 계수

Spec.	Conductor	Tank
Loss[W/m]	122.5	29.95
Heat Transfer Coefficient[W/m ² °C]	7.5219	3.1166
Ambient Temperature[°C]	11.3	

표 3의 파라미터를 적용하여 열전달 해석을 수행하였다. 또한, 정밀도를 높이고자 대류 경계조건이 적용되는 부분에서 더 많은 요소를 분할하였다. 그림 5는 단상 GIS 모선의 요소분할도 및 온도분포를 나타낸다.



(a) 요소분할도 (b) 온도 분포



(c) 온도 분포(단면)

Fig. 5. Mesh and temperature distribution of single phase GIS bus

그림 5. 단상 GIS 모선의 요소분할도 및 온도분포

표 4는 실제 측정값과 본 논문을 통하여 예측된 온도를 나타낸다.

Table 4. Temperature of each part
표 4. 모선 각 부분의 온도

측정부분	측정치 [°C]	해석치 [°C]	오차율 [%]
Conductor	49.1	53.65	8.5
Tank	20.3	17.74	-14.4

해석결과, 온도는 도체부에서 53.65°C, 탱크부에서 17.74°C가 계산되었다. 측정치와 해석치의 도체부 온도차는 -4.55°C, 탱크부 온도차는 2.56°C이다. 정열계 열전달 해석은 대개 해석 시간이 짧다는 장점이 있지만, 열전달 계수 등 계수의 정확한 산정이 힘들기 때문에 해석시 오차율이 크다는 단점이 있다. 하지만, 본 논문의 자체-열계 결합을 통한 열전달 계수 산정 기법을 통해 해석온도의 정확도를 높여 기존 방법보다 해의 신뢰도를 높일 수 있었다.

III 결론

본 논문에서는 해석 시간이 열유동 해석에 비해 짧고 온도 분포를 알 수 있다는 특징을 지니는 유한요소 해석을 이용한 열전달 해석을 해석의 신뢰성을 높이는 방향으로 수행하였다. 특히, 자체 해석을 통해 열원이 되는 손실을 구한 후, 반복적 알고리즘을 통해 에너지 평형 방정식을 만족하는 열전달 계수를 산정하여 이를 적용한 수치해석적 열전달 해석을 하였으며, 해석치와 측정치 비교를 통해 제시된 방법의 신뢰성을 검증하였다. 마지막으로 본 논문에서 제안된 열전달 해석 기법을 통해 초기에 빠른 전력기기의 온도분포 해석으로 다양한 모델 선택 및 검토에 도움이 되고자 한다.

참고문헌

- [1] Ghazanfarian, J, Nobari, M.R.H, "A numerical study of convective heat transfer from a rotating cylinder with cross-flow oscillation", International journal of heat and mass transfer, vol.52, No.23-24, pp.5402-5411, Jun. 2009
- [2] Andreas Alexandrou, *Principles of Fluid Mechanics*, Prentice Hall, 2001
- [3] Ait-taleb, T, Abdelbaki, A, Zrikem, Z, "Numerical

simulation of coupled heat transfers by conduction, natural convection and radiation in hollow structures heated from below or above", International journal of thermal sciences, vol.47, No.4, pp.378-387, Apr. 2008

[4] 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.

[5] Gosz, Michael R, *Finite Element Method (Applications in Solids, Structures, And Heat Transfer)*, CRC Pr, 2005

[6] 이경행, "초고압 전력기기의 기술 동향", 전기학회지, 제46권 제8호, pp.23-30, 10월 1997

[7] Daryl L. Logan, *A First Course in the Finite Element Method*, Thomson Learning, 2007

[8] H. Sadakuni, K. Sasamori, H. Hama, K. Inami, "Insulation and Current Carrying Design for GIS", JIEE, pp.33-42, SP-96-12, 1996

[9] W. Z Black, B. A. Bush, R. T. Coneybeer, "Steady-state and Transient Ampacity of Bus bar", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 9, No. 4, pp1822-1829, October 1994

[10] Gregory Nellis, Sandy Klein, Sanford Klein, *Heat Transfer*, Cambridge University Press, 2008

저 자 소 개

김 창 기 (학생회원)



2008년 : 동아대학교 전기공학과 졸업 (공학사)

2008년 3월~현재: 동아대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)

<주관심분야>

수치해석, 전기기기 설계

김 상 훈 (학생회원)



2009년 : 동의대학교 전기공학과
졸업 (공학사)
2009년 3월~현재: 동아대학교
대학원 전기공학과 (공학석사)
<주관심분야>
전기기기 최적설계 및 제어

정 상 용 (정회원)



1997년 : 서울대학교 전기공학과
졸업 (공학사)
1999년 : 서울대학교 대학원
전기공학과 졸업 (공학석사)
2003년 : 서울대학교 대학원
전기공학과 졸업 (공학박사)

2006년 : 현대자동차 연구개발본부 선임연구원
2006년~현재 : 동아대학교 조교수
<주관심분야>
수치해석 기반 전기기기 설계 및 해석