

기중차단기의 전자계-열계 연계 해석

배병현, 강한영, 류재섭, 김영근

Electromagnetic-Thermal field coupling analysis of air circuit breaker

Bunghyun Bae, Hanyoung Kang, Jaesub Ryu, Youngkeun Kim

Abstract - 본 논문은 전력기기에서 문제가 되는 온도상승에 대응하여 제품 개발시 선행 해석을 통한 온도 안정성 확보와 제품 신뢰성 향상, 설계 기간 단축을 위한 방안에 대하여 서술하고 있다.

전력기기의 온도 상승을 예측하기 위한 방법으로 전자계 해석과 열유동 해석을 동시에 수행하는 연계 해석법을 제안하며, 이 해석법의 검증을 위해 기중 차단기의 통전시 온도 상승에 대한 해석을 수행하였고, 실험을 통해 이를 검증하였다.

1. 서 론

전력기기에서 발생하는 손실은 전력기기 온도 상승의 주된 원인이며, 이러한 온도 상승은 전력기기의 효율 저하, 수명 단축, 사고 발생 등의 심각한 원인이 된다. 최근에 들어서는 전력기기의 대용량화, 소형화 및 모듈화로 인하여 발열요인은 더욱 증가하고 있다. 따라서 전력기기 내부의 부분 과열을 피하기 위해 정확한 온도 상승과 방열을 위한 열설계는 필수적이다.

기존의 전력기기 개발은 열설계가 설계 단계에서 완벽하게 이루어지지 않고, 제품 개발의 보조적 역할을 함으로써 설계기간이 장기화되는 단점을 안고 있었다.

최근 동향은 전자계와 열유동을 함께 고려한 연계해석으로 정확한 온도상승 예측이 일반화되어 가고 있으며, 선진사의 경우 이미 이러한 기술이 보편화 되어 있다.

유한요소법을 이용한 전자계 해석을 통하여 도체 전류 분포, 와전류 해석, 표피효과 근접효과에 의한 자계분포, 재질에 따른 기기의 특성 등이 예측 가능하며, 이것은 이미 많은 논문을 통해 소개된 바 있다. 이렇게 계산된 손실은 열원의 역할을 하고, 줄(Joule) 손실 텀을 가진 열유동 방정식에 도입되며 온도 분포와 방열 구조 해석을 통하여 온도 상승에 의한 전기 전도도의 변화를 예측할 수 있게 된다.

본 논문에서는 이러한 전자계와 열유동을 함께 고려한 연계 해석을 통하여 전력기기의 정확한 온도 예측을 하고자 한다.

2. 본 론

2.1 전자계 해석 이론

전자계의 와전류 해석을 위한 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times H = J_s + J_e \tag{1}$$

$$J_s, J_e = \sigma E = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \nabla \Phi \tag{2}$$

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t} - \nabla \Phi \tag{3}$$

$$B = \nabla \times A = \mu H \tag{4}$$

where H [A/m], J_s [A/m²], J_e [A/m²],
 E [V/m], σ [mho m], A [wb/m],

$$\Phi$$
 [V], B [wb/m²], μ [H/m]

위의 지배방정식에 대한 가정은 다음과 같다.

i) 2차원 문제 : $J_s = J_s \hat{z}, J_e = J_e \hat{z}, A = A \hat{z}$

ii) 도체 (전류 Source) 내의 $J_c=0, \sigma=0$

iii) 변위전류 무시 $\frac{\partial D}{\partial t} = 0$

iv) 시간에 대한 정현적 변화

$$J_s \equiv J \cdot e^{j\omega t}, A_z \equiv A \cdot e^{j\omega t}$$

v) $\nabla \Phi \rightarrow 0$

위의 가정에 따라 다음과 같은 정식화의 과정을 거치게 된다.

$$\nabla \times H = \nabla \times \nu B = \nu \nabla \times \nabla A \tag{5}$$

$$\nu(\nabla(\nabla \cdot A_z) - \nabla^2 A_z) = -\nu \nabla^2 A_z \tag{6}$$

$$-\nu \nabla^2 A_z = -\sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} - \sigma \nabla \Phi + J_s = -\sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} + J_s \tag{7}$$

$$-\nu \nabla^2 A \cdot e^{j\omega t} = -\sigma \frac{\partial(A \cdot e^{j\omega t})}{\partial t} + J \cdot e^{j\omega t} = -j\omega \sigma A \cdot e^{j\omega t} + J \cdot e^{j\omega t} \tag{8}$$

$$-\nu \nabla^2 A = -j\omega \sigma A + J \tag{9}$$

2.2 열계 해석 이론

열 전도도 λ 에 의한 영역 Ω_r 에서의 온도분포는 다음과 같은 지배방정식이 적용된다.

$$-\nabla \cdot (\lambda \nabla T) = p \tag{10}$$

여기서 $p = \frac{1}{2\sigma(T) |J|^2}$ 로써 전력손실 밀도에 해당한다.

도전 영역인 경계면 Γ 에 적절한 경계조건을 취하면 다음과 같다[1], [2], [3].

$$\omega = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = a(\omega, T)(T - T_0) \tag{11}$$

where ω = heat flux

T_0 = ambient temperature

$a(\omega, T)$ = heat transfer coefficient depending both on heat flux and temperature

Galerkin method에 의하여 지배방정식(10)과 경계조건(8)을 적용하면 다음과 같다.

$$\int_{\Omega_i} \nabla N_i \cdot \lambda \nabla T_h d\Omega + \int_{\Gamma} N_i T_h d\Gamma = \int_{\Omega_i} N_i p d\Omega + \int_{\Gamma} a N_i T_0$$

$i = 1, 2, \dots, n$ (12)

where T_h = Finite element approximation
 n = number of node
 N_i = nodal basis function

a 는 온도에 영향을 받는 인자이므로 식 (12)는 비선형성을 띠게 된다. 따라서 각 iteration 마다 열전달계수는 업데이트 되어 식 (12)에 적용될 것이다.

2.3 전자계-열유동 연계 해석

전자계와 열유동의 연계 해석 방법은 <Fig.1>과 같다. FEM Code를 사용한 전자계 해석과 CFD Code를 이용한 열유동 해석을 Mesh-based Parallel Code Coupling Interface(MPCCCI)를 이용하여 coupling한다. 이것은 coupling 해석 영역에서 두 개 또는 그 이상의 해석 코드에 대해서 mesh 사이의 데이터를 보간 함으로써 데이터 상호 교환이 가능하게 된다.

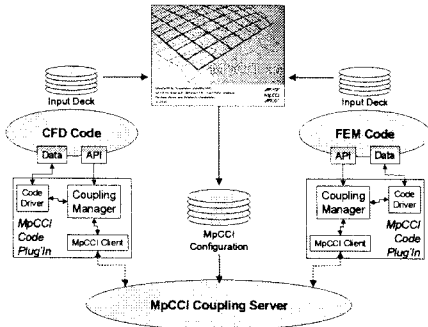


Fig.1 연계 해석법

2.4 해석 결과 및 실험 결과

본 논문에서는 기중차단기의 차단부 투입시 온도 상승에 대하여 연계해석을 진행하였고, 실험으로 이를 검증하였다. 해석 모델은 다음과 같다.

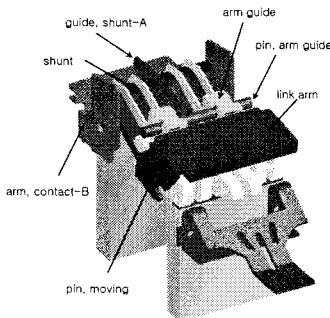


Fig.2 해석 모델

해석 조건은 다음과 같다.

- i) 3상 중 1상만 해석
- ii) 접점은 완전 접촉 상태
- iii) 인가전류 : 800A

전자계 해석 결과는 다음과 같다. 자성체 재질을 사용한 부분에서 자속집중 현상이 나타났으며, 자속의 집중은 와전류의 영

향으로 나타나고, 와전류에 의한 영향으로 주도체부에 흐르는 전류에도 영향을 미친다. Fig.4에서 나타난 것처럼 교류전류에서 발생하는 표피효과 및 근접효과와 영향으로 중심부 도체보다는 외측 도체에 전류밀도가 증가하였다. 따라서 전류밀도의 증가는 Joule 손실의 원인이 되므로 Fig.4에서 보는 바와 같이 외측 도체부에 손실이 집중됨을 알 수 있다.

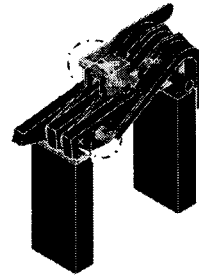


Fig.3 자속밀도 분포

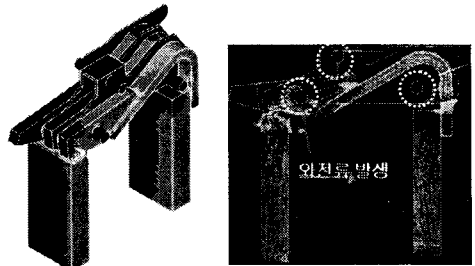


Fig.4 전류밀도 분포

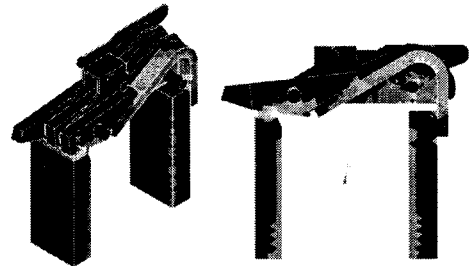


Fig.5 줄(Joule)손실 분포

연계 해석 후 최종 온도 분포는 다음과 같다.

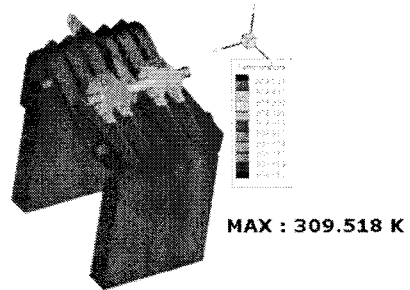


Fig.6 온도 분포-1

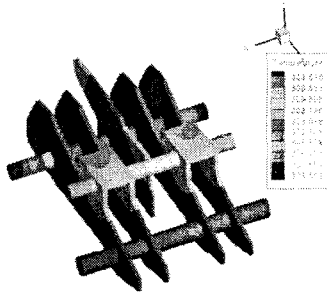


Fig.7 온도 분포-2

Fig.8은 부하전류 800A 통전시의 해석결과와 실험결과를 비교 하였으며, 실험결과는 해석의 타당성을 입증하고 있다.

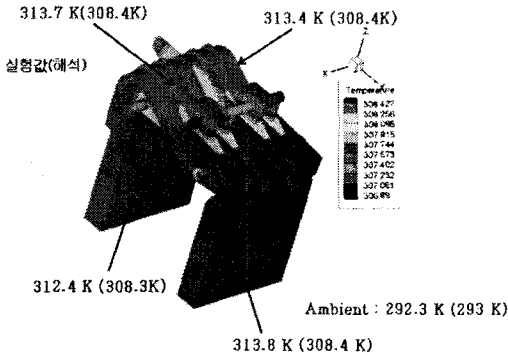


Fig.8 실험 결과

3. 결 론

본 논문에서는 기중차단기의 전자계 해석 및 열유동 해석을 수행하고 실험을 통하여 이를 검증하였다. 본 논문을 통하여 전력기기에서 전자계와 열유동의 연계를 고려한 해석은 모델의 전 영역에 대하여 실제 온도 상승에 대한 예측이 가능함을 알 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] A. Lefevre, L. Miegerville, J. Foulagdar, and G. Olivier, "3-D computation of transformers overheating under nonlinear loads," in *Proc. 11th Biennial IEEE Conf. Electromagnetic Field Computation*, Seoul, Korea, Jun. 6-9, 2004, p. 334.
- [2] M. N. Özisik, *Heat Transfer: A Basic Approach*: McGraw-Hill International, 1985.
- [3] R. Pascal, P. Conraux, and J. M. Bergheau, "Coupling between finite elements and boundary elements for the numerical simulation of induction heating processes using a harmonic balance method," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 39, pp. 1535-1538, May 2003.
- [4] Kurt Preis, Oszkár Bíró, Gerhard Buchgraber, and Igor Tićar3 "Thermal-Electromagnetic Coupling in the Finite-Element Simulation of Power Transformers" *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, pp. 999-1001, APRIL 2006