

유한요소법을 이용한 전력용 변압기의 2차원 온도분포 예측

이정근, 김종경, 주수원, 한성진  
 동아대학교 전기공학과

Prediction of 2-Dimensional Temperature Distribution in Power Transformer Using F.E.M.

Jeong-geun Lee, Joong-kyoung Kim, Soo-won Joo, Sung-chin Hahn  
 Dept. of Elec. Eng. Dong-A Univ.

**Abstract** - 최근 전력용 변압기의 고효율, 소형화 추세에 따라 권선의 단위면적당 열발생률이 증가하고 있으며 이는 변압기의 수명과 단락사고에 직결되는 중요한 문제로 대두되고 있다. 본 논문에서는 단순화한 2차원 전력용 변압기 모델의 계산 시간을 줄이기 위해 복합격자(Hybrid mesh) 생성 기법을 적용하여 모델링하고 유한요소법을 이용한 자체해석으로 권선과 철심의 Joule's loss를 계산하였다. 계산된 열원으로 전력용 변압기의 최고점의 온도와 열적 특성을 파악하고자 CFD algorithm을 이용하여 변압기 내부의 온도분포를 예측하였다.

1. 서 론

변압기는 크게 전류가 흐르는 도체, 절연체, 철심과 각종 지지물로 구성되어 있다. 변압기 운전 시 도체에는 전류가 흐르게 되고 Joule's loss에 의한 열이 발생하게 된다. 이 때 발생된 열은 권선부위와 절연물의 온도를 높게 되며, 온도가 높아질수록 절연물의 열화는 가속화되어 변압기의 수명은 감소한다. 일반적으로 변압기의 수명은 내부의 전반적인 열적 특성보다는 특정 부위의 온도 값에 의해 결정되며, 특히 최고점의 온도(hot spot temperature) 값이 허용치 이상으로 상승할 경우 절연내력의 저하로 인해 변압기의 수명은 급격히 감소한다.

최근의 전력용 변압기는 효율의 증가와 동시에 크기와 무게가 감소하고 있는 추세이다. 치수와 중량의 감소는 대용량 기기를 밀폐한 채 출하할 수 있고, 이동용 변압기로 사용할 수 있으며, 원가의 절감효과를 얻을 수 있는 것을 의미한다. 그러나 동일한 용량에서 크기가 작아지므로 전류밀도의 증가로 인해 많은 열이 발생하여 온도가 높아지게 되어 절연물의 열화가 증가하며 최고점 온도에서 빠르게 변압기의 수명이 감소한다. 그렇기 때문에 설계단계에서부터 변압기의 온도특성을 정확하게 예측하고 평가하는 것이 중요하다. 이전까지는 변압기의 온도분포 특성 파악을 위해서는 하나의 수식에 의한 대수적 방법을 이용하여 간단하게 파악할 수 있어 일반적으로 사용되고 있다. 그러나 기존의 방법은 변압기의 수명에 영향을 미치는 최고점 온도를 계산할 수 없는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 수치해석적인 방법을 적용한다. 상용 CFD 프로그램을 이용하여 정확한 온도분포 특성을 파악할 수 있으며, 복합격자 생성기법을 변압기 모델에 적용하여 복잡한 변압기 모델링의 문제점을 극복하였고 오직 단일 삼각격자 생성기법을 사용할 때보다 격자의 크기를 줄여 계산 시간을 단축시킬 수 있다.

본 논문에서는 단순화한 2차원 전력용 변압기 모델에 복합격자 생성기법을 적용하여 모델링하고 유한요소법을 이용한 자체해석으로 권선과 철심의 Joule's loss를 계산하였다. 계산된 열원으로 전력용 변압기의 최고점의 온도와 열적 특성을 파악하고자 CFD algorithm을 이용하여 변압기 내부의 온도분포를 예측하였다.

2. 본 론

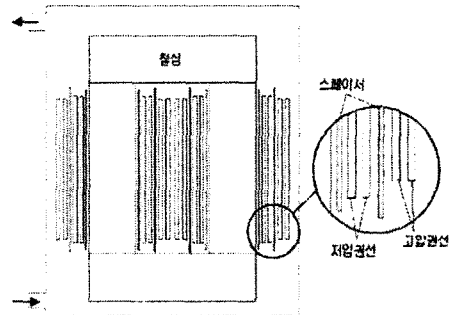
2.1 변압기모델

전력용 변압기의 사양과 모델은 표 1과 그림 1에서 보여준다. 변압기의 구조는 단상 내철형이며, 냉각방식은 유입자방식, 절연체는 아라미드지를 이용하였다. 변압기 내부에 있는 냉각오일은 권선에서 발생하는 열로 인해 가열되어 위로 상승한 후 유출구를 통해 방열판으로 유입된다. 유입된 오일의 열량은 방열판을 통해 대기로 방출되고 다시 변압기 하단의 유입구로 흘러 들어와 순환하면서 변압기 내부 온도를 감소시킨다. 열계 해석에 있어 변압기를 구성하고 있는 주요 재질은 절연 및 냉각매체인 광유, 철심의 재료인 규소강판, 절연재료로 이용된 아라미드지, 그리고 권선을 구성하고 있는 구리이다. 해석에 있어 주요재질의 정확한 물질값은 표 2에서 보여준다.

변압기 모델의 해석 시 변압기 내부의 복잡한 권선과 지지물 등에 의해 모델링을 하기가 매우 어렵다. 복잡한 형상 때문에 모델링구성과 격자생성에 있어 어려움이 발생한다. 계산시간을 줄이고 해의 수렴성을 구하기 위해 각종 지지물과 절연물을 생략하여 권선 부위의 형상을 단순화 하고 격자 생성에서는 복합격자 생성기법을 사용한다.

<표 1> 변압기의 사양

Item	Value
용량	400 [KVA]
정격 전압	6600/220 [V]
정격 전류	60.6/1818 [A]
상수	단상
냉각매질	Mineral oil
저전압권선의 덕트 크기	3mm
고전압권선의 덕트 크기	5mm



<그림 1> 단순화한 2차원 전력용 변압기 모델

<표 2> 주요재질의 물질값

Item	규소강판	아라미드지	구리
밀도 [kg/m <sup>3</sup> ]	7650	720	8978
비열값 [J/kg/K]	452	913	381
열전도도 [W/m/K]	(↑)21.5 (→)3.5	0.24	387.6

2.2 자체해석

전력용 변압기 권선에 전류가 흐르면 열이 발생하고 이는 도체와 권선을 포함하고 있는 변압기 탱크 내부 온도상승의 원인이 된다. 그러므로 권선과 철심의 재질에 따른 손실을 계산하여 온도상승의 원인을 파악한다. 변압기의 손실은 권선과 철심에서의 Joule's loss가 대부분이며, 이는 유한요소법에 의한 자체 해석으로 계산하고 열계 해석을 위한 열원으로 이용한다.

$$P = I^2 R \tag{1}$$

이며, 철심에서의 Joule's loss는

$$W = k \times G \times w \tag{2}$$

이다. 여기서,

k : 적층 시 발생하는 철심 간 공극에 관련된 계수  
 G : 철심중량 [kg] w : 단위무게 당 손실 [W/kg]

2.3 열계해석

2.3.1 지배방정식

열은 일반적으로 전도, 대류, 방사의 세 가지 방식 중 하나이거나 혹은 둘 이상의 방법으로 전달된다. 변압기 내부의 열전달에서 냉각매질의 순환에 의한 대류가 큰 비중을 차지한다. 전력용 변압기 내부의 열전달 특성을 지배하는 Navier-Stoke 방정식은 다음과 같다.

연속 방정식

$$\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

운동 방정식

$$\frac{\partial(\rho v_x v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y v_x)}{\partial y} = \nabla^2(\mu v_x) - \frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + S_x \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho v_x v_y)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y v_y)}{\partial y} = \nabla^2(\mu v_y) - \frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + S_y \quad (6)$$

에너지 방정식

$$\frac{\partial(\rho c_p v_x T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho c_p v_y T)}{\partial y} = \nabla^2(kT) + Q \quad (7)$$

### 3.2.2 열계해석

자계 해석으로 계산된 권선과 철심에서의 손실은 전력용 변압기 내부의 온도상승을 일으키는 열원이 되며 변압기의 손실에 따라 각 부분의 온도가 결정된다. 변압기 내부에서 발생한 열원은 대기와 접해있는 본체 및 방열판을 통하여 외부 대기로 방출된다. 열계 해석 시 본체 내부의 권선부와 오일, 방열판, 외부의 공기장을 동시에 해석하는 것이 바람직하나 요소수의 증가, 계산시간 및 수렴성에 큰 영향을 미쳐 외부의 공기장을 제외한다. 또한 변압기 모델을 실내에 설치하므로 태양열에 의한 복사열의 효과는 무시한다. 그리고 방열판 및 본체에는 열전달 계수를 이용한 경계조건을 적용한다. 권선부의 온도분포는 자연대류를 고려한 CFD algorithm에 의해 구한다. 자계해석과 마찬가지로 열계 해석에서도 삼각격자와 사각격자를 혼합한 복합격자 생성기법을 적용한다. 열계 해석에서 대류 열전달 계수와 Nusselt number는 식 8과 같으며, 대류 열전달 계수 h는 자연대류에서 수직평판에 대한 실험식을 이용한다. 변압기의 바닥은 단열조건을 취하였고, 외부의 대기온도는 23 [°C]로 설정한다.

$$h = \frac{N_m k}{L} \quad (7)$$

$$N_m = 0.68 + \frac{0.67 Ra_L^{1/4}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]} \quad (10^{-1} < Ra_L < 10^9) \quad (8)$$

여기서,

- $N_m$ : Nusselt number,  $P_r$ : Prandtl number
- $L$ : 방열판의 길이,  $Ra$ : Rayleigh number
- $k$ : thermal conductivity at atmospheric

### 3. 해석 결과

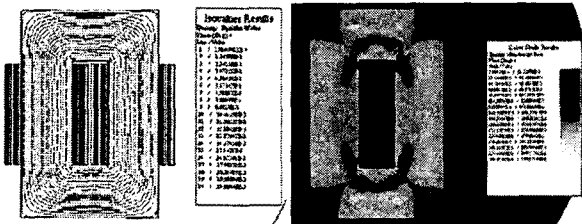
그림 2는 간략화한 전력용 변압기의 자속분포와 자속밀도를 보여준다. 고압권선의 전류는 60.6 [A], 권선의 부피는 0.0060875 [m³]이고 저항은 1.11701 [Ω]이다. 따라서 유한요소법을 이용한 자계 해석 결과를 이용하여 고압권선의 손실은 주열원 법칙에 의해

$$P = I^2 R = 4,103 [W] \quad (9)$$

이며, 단위체적당 손실 [W/m³]은 다음과 같다.

$$\frac{4,103 [W]}{0.0060875 [m^3]} = 674,003 [W/m^3] \quad (10)$$

저압권선의 전류는 1818 [A], 권선의 부피는 0.0051712 [m³], 저항은 0.0009808 [Ω]이다. 따라서, 저압권선의 단위체적당 손실은 위의 계산방법에 의해 626,925 [W/m³]이다. 표 3은 자계해석 결과를 이용한 손실을 보여준다.

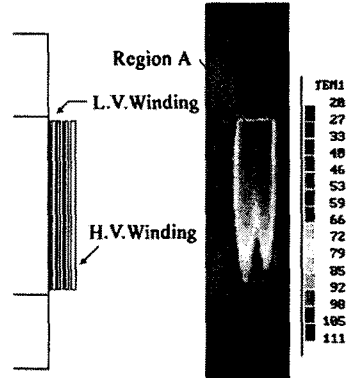


(a) 자속분포 (b) 자속밀도  
 <그림 2> 유한요소법을 이용한 자계 해석 결과

<표 3> 권선과 철심의 열원

구분	Heat Source [W/m³]
L.V. winding	626,925
H.V. winding	674,003
Core	18,049

그림 3은 전력용 변압기에서 권선과 철심 영역의 온도분포를 보여준다. 철심에서의 온도는 약 66 [°C]이고 권선에서의 온도분포는 92~111 [°C]이다. 그림 5에서 알 수 있듯이 고전압권선의 상단부분(영역 A)이 온도가 가장 높은 최고점 온도지점이므로 변압기의 수명과 직결된 영역임을 알 수 있다. 주위온도가 23 [°C] 임을 감안할 때 온도상승이 84 [°C]이다. 그러나 규격으로 정해진 온도상승 120 [°C] 이내이므로 절연물의 열화를 작게 할 수 있어 변압기의 수명에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다.



<그림 3> 온도분포 해석 결과

### 3. 결 론

본 논문에서는 전력용 변압기의 온도분포를 해석하기 위하여 수치해석적인 방법을 적용하였다. 특히, 복잡한 변압기 모델을 단순화시킨 후 복합격자 생성기법을 사용하여 기존의 삼각격자 생성기법보다 격자수를 감소시켜 계산 시간을 줄 일 수가 있었다. 자계 해석을 통해 권선과 철심에서 Joule's loss를 계산하여 열계 해석을 위한 열원을 이용하였다. 열계 해석 시 방열판 및 본체에서의 열전달 계수는 물질 상수와 모델의 형상을 고려한 Nusselt number를 이용하여 해석적으로 구하였다. 자계 해석을 통한 열원과 열전달 계수를 통해 CFD algorithm에 경계조건으로 입력하여 전력용 변압기의 온도 분포 및 최고점 온도를 예측할 수 있었다.

향후에는 2차원 모델링에서 생략한 지지물, 덕트 구조, 격벽 위치 등을 고려한 3차원 모델 열계 해석과 열전달 및 유동을 고려해 전력용 변압기의 온도분포를 해석하고자 한다.

### [참 고 문 헌]

- [1] W. Lampe, Pettersson, "Hot-Spot Measurements in Power Transformers", Cigre 1984 session, pp. 12-02, 1984.
- [2] K. Karsai D et al., "Large Power Transformers", Oxford N.Y., 1987.
- [3] C. C. Hwang, H. H. Hsu, "Finite element analysis of high-power high-frequency transformers coupled with temperature rise method", CEFC2004, pp. 25, June, 2004.
- [4] K.Teklesadik, M. Saravolas, "Calculation of losses in structural parts of transformers by FE method", IEE Colloquium, pp. 4/1-4/3, Jan, 1996.
- [5] Yunus A., "Heat Transfer ; a practical approach", McGraw Hill, USA, 1999.

본 연구는 산업 자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (R-2003-B-271)주관으로 수행된 과제임