

## 복합격자 생성기법을 이용한 전력용 변압기의 2차원 온도분포 해석

민경조, 김중경, 한성진, 주수원

동아대학교 전기공학과

### Analysis of Temperature Distribution in 2-D Power Transformer Using Hybrid Mesh Model

Min Kyung Jo, Kim Joong Kyoung, Hahn Sung Chin, Joo Soo Won

Dept. of Elec. Eng. Dong-A Univ.

**Abstract** - Recently, the efficiency of power transformer is improved as well as the size is becoming smaller. So, it is very important that temperature characteristics of the transformer should be estimated and predicted precisely. This paper deals with the temperature distribution of power transformer by simplified 2-D hybrid mesh model. The temperature distribution of model transformer was obtained by CFD algorithm considering natural convection. Heat sources are calculated first by magnetic field analysis based on F.E.M. and are used as the input data for thermal field problem based on computational fluid dynamics (CFD) algorithm. The calculated temperature distribution of the simplified 2-D power transformer model shows good results in accuracy as well as in computing time.

### 1. 서 론

최근의 전력용 변압기는 효율의 증가와 동시에 크기와 무게가 감소하고 있는 추세이다. 치수와 중량의 감소는 대용량 기기를 밀폐한 채 출하할 수 있으며, 이동용 변압기로 사용할 수 있으며, 원가의 저감효과를 얻을 수 있다는 것을 의미한다. 전력용 변압기의 구조는 크게 전류가 흐르는 도체와 절연지와 철심과 각종 지지물로 구성되어 있다. 변압기가 동작할 때 도체에 흐르는 전류는 열을 발생시킨다. 이때 발생된 열은 도체와 권선을 포함하고 있는 변압기 탱크 내부의 온도 상승에 원인이 되고 있으며, 온도가 높아지면서 절연물의 열화가 증가하여 최고점 온도지점에서 빠르게 변압기의 수명이 감소한다. 그래서 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 최고점온도지점을 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 때 보다 격자의 수를 줄여 계산 시간을 단축시킬 수 있다.

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

### 2. 자계 해석

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

$$P = I^2 R \quad (1)$$

이며, 철심에서의 Joule's loss는

$$W = k \times G \times w \quad (2)$$

이다. 여기서,

$k$  : 적층 시 발생하는 철심 간 공극에 관련된 계수

$G$  : 철심 중량[kg]

$w$  : 단위무게 당 손실[W/kg]

### 3. 열계 해석

#### 3.1 지배방정식

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

#### 연속 방정식

$$\frac{\operatorname{round}(\rho v_x)}{\operatorname{round}x} + \frac{\operatorname{round}(\rho v_y)}{\operatorname{round}y} = 0 \quad (3)$$

#### 운동 방정식

$$\frac{\partial(\rho v_x v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y v_x)}{\partial y} = \nabla^2(\mu v_x) - \frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + S_x \quad (4)$$

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

#### 에너지 방정식

$$\operatorname{round}(\rho c v_x T) \operatorname{over} \operatorname{round}x + \operatorname{round}(\rho c v_y T) \operatorname{over} \operatorname{round}y = \nabla^2(kT) + Q \quad (6)$$

#### 3.2 열계 해석

자계 해석으로 계산된 권선과 철심에서의 손실은 전력

용 변압기 내부의 온도상승을 일으키는 열원으로 변압기의 손실에 따라 각 부분의 온도가 결정된다. 변압기 내부에서 발생한 열원은 대기와 접해있는 본체 및 방열판을 통하여 외부 대기로 방출된다. 열계 해석시 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. 변압기의 온도분포는 자연대류를 고려한 CFD algorithm에 의해 구한다. 자체해석과 마찬가지로 열계 해석에서도 삼각격자와 사각격자를 혼합한 복합격자 생성기법을 적용한다. 열계 해석에서 대류 열전달 계수  $h$ 는 자연대류에서 수직평판에 대한 실험식을 이용한다. 변압기의 바닥은 단열조건을 취하였고, 외부의 대기온도는 23[°C]로 설정한다.

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

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

여기서,

$Nu_m$ : Nusselt number,

$P_r$ : Prandtl number

L : 방열판의 길이,

$Pr$ : Rayleigh number

$k$  : thermal conductivity at atmospheric

#### 4. 변압기 모델

전력용 변압기의 사양과 모델은 표 1과 그림 1에서 나타내고 있다. 변압기의 구조는 단상 내철형이며, 냉각방식은 유입자냉식, 절연지는 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 2에 나타내고 있다.

변압기 모델의 해석시 변압기 내부의 복잡한 권선과 지지물 등에 의해 모델링을 하기가 매우 어렵다. 그림 2는 복잡한 구조를 가지고 있는 각종 지지물과 절연물 그리고 권선을 나타내고 있다. 복잡한 형상 때문에 모델링 구조와 격자생성에 있어 어려움이 발생한다. 계산시간을 줄이고 해의 수렴성을 구하기 위해 각종 지지물과 절연물을 생략하여 권선 부위의 형상을 단순화 하고 격자생성에서는 복합격자 생성기법을 사용한다.

표 1. 모델 변압기의 사양

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

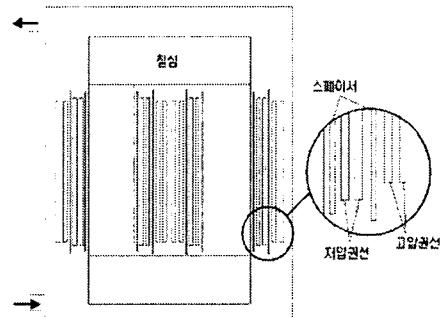


그림 1. 단순화한 2차원 전력용 변압기

표 2. 주요재질의 물질값

Item	규소강판	아라미드지	구리
밀도[kg/m³]	7650	720	8978
비열값[J/kg/K]	452	913	381
열전도도[W/m/K]	(+)21.5 (-)3.5	0.24	387.6

복합격자 생성기법은 기존의 기법인 삼각격자만을 사용하는 기법 대신에 각 형상에 적절하게 삼각격자와 사각격자를 혼합하는 기법으로 모델의 단순화 및 격자의 수를 효과적으로 줄일 수가 있다. 그림 3은 복합격자 생성기법을 적용한 권선 주위의 격자를 나타내고 있다. 이 복합격자 생성기법을 적용함으로서 요소수를 6274개에서 5734개로 줄일 수 있었으며 해석시 계산 시간도 줄일 수 있다.

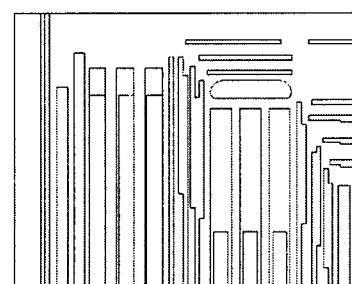


그림 2. 변압기 내부의 권선 주위 영역

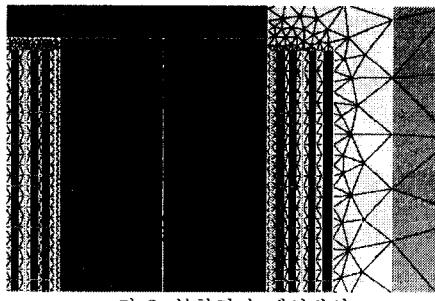


그림 3. 복합격자 생성방식

## 5. 결과 및 토론

그림 4는 유한요소법을 이용한 자계 해석으로 간략화한 전력용 변압기의 자속분포를 나타내었으며, 권선과 철심에서 계산된 손실은 표 3에 나타내었다. 전력용 변압기에서 권선 영역의 온도분포를 계산한 것을 그림 5에 나타내었다. 철심에서의 온도는 약 66[°C]이고 권선에서의 온도분포는 92~111[°C]이다. 그림 5에서 보듯이 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] 가 되지만 규격치에서 정한 온도상승 120[°C] 이내이므로 절연물의 열화에는 영향을 미치지는 않게 되어 변압기의 수명에 큰 영향을 미치지는 않음을 알 수 있다.

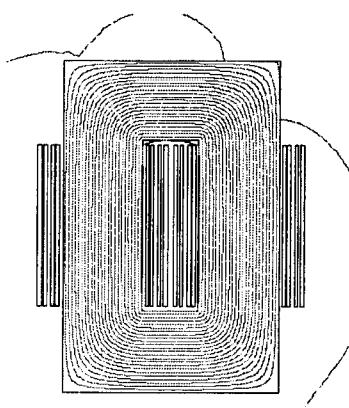


그림 4. 변압기 내부의 자계해석

표 3. 권선과 철심에서의 열량

Item	Heat Source[W/m <sup>3</sup> ]
저전압 권선	626,925
고전압 권선	674,003
철심	18,049

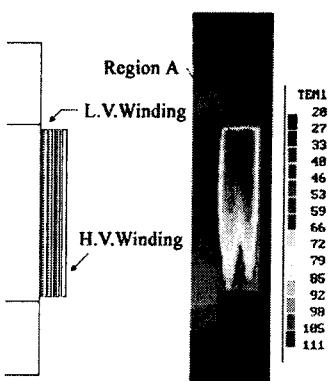


그림 5. 권선영역에서의 온도분포

## 6. 결 론

본 논문에서는 전력용 변압기의 온도분포를 해석하기 위하여 대수적 방법이 아닌 수치해석적인 방법을 적용하였다. 특히, 복잡한 변압기 모델을 단순화시킨 후 복합격자 생성기법을 사용하여 기존의 삼각격자 생성기법보다 격자수를 감소시켜 계산 시간을 줄일 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 이용한 경계 조건을 CFD algorithm에 적용하여 전력용 변압기의 온도 분포 및 최고점 온도를 예측할 수 있었다.

향후에는 2차원 모델링에서 생략한 자지물, 덕트 구조, 경벽 위치 등을 고려한 3차원 모델해석을 통해 전력용 변압기의 더 정확한 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