

유한요소법에 의한 권철심변압기의 철손해석

권병일, 김성영^o
한양대학교 전기공학과

Analysis of Iron Loss in a Wound Core Type Transformer by FEM

B.I.Kwon, S.Y.Kim^o

Dept. of Electrical Engineering of College of Engineering Science Hanyang University

Abstract : The analysis of the thin lamination model of the wound core type transformer by FEM requires many region division and much calculation time, and it has difficulty in calculation by modern computer. A new method, which is simulated by a solid but anisotropic block with the magnetic permeabilities in the orthogonal dimension, is selected to account for the presence of the lamination.[1] Based on this equivalent anisotropic block model, we analyze the iron loss of the wound core type transformer by FEM, and compare the simulation results with the experimental results.

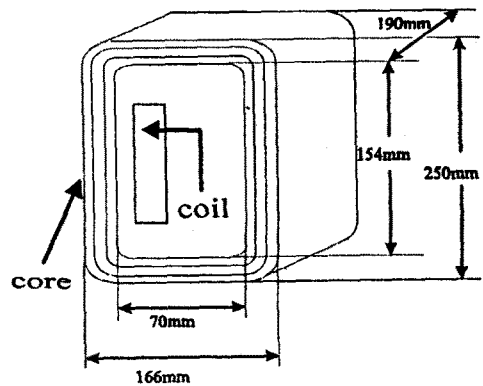


그림 2.1 권철심 변압기의 1/2 해석모델

1. 서론

변압기의 손실을 해석하는데에는 유한요소법 등의 수치해석이 유용하다. 하지만, 권철심변압기는 코어재료가 매우 얇기 때문에 이를 그대로 모델링하여 해석하기에는 현재의 계산기의 성능으로 무리가 따른다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 적층코어를 등가이방성인 한개의 블록으로 모델링하며, 적층두께가 대단히 얇으므로 와전류에 의한 자속은 주자속에 거의 영향을 미치지 않는것으로 고려하여 와전류를 계산하는 방법이 제시되었다.[1]

본 논문에서는 등가이방성 모델링에 의하여 적층코어의 철손을 유한요소법에 의해 계산하며, 철손해석의 정확성을 검증하기 위하여 실험데이터와 비교검토 한다.

표.1 해석모델 철심 및 코일의 사양

철	재질	23RGH100
	비중	7.65 g/cm ³
심	두께	0.23 mm
	침적율	96%
코	1차측(원형도선)	지름 1.6mm
	2차측(각형도선)	2.4(mm)*10(mm)
일	1차측권수	1270
	2차측권수	48

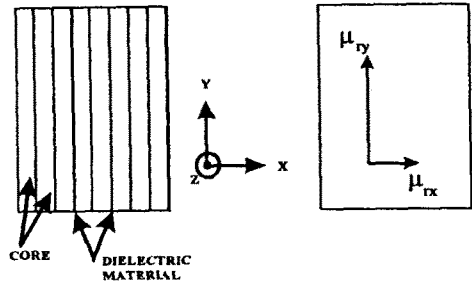
2. 유한요소법에 의한 철손해석

2.1 모델링 및 해석이론

해석을 위한 권철심 변압기의 1/2인 해석모델을 그림2.1에 나타낸다. 또한, 철심 및 코일의 사양을 표.1에 나타낸다. 해석모델로 사용한 변압기는 양쪽이 대칭이며, 1-2차전압 11000V-240V 인 25KVA급 권철심변압기이다.

권철심변압기의 경우처럼 적층두께가 얇은 모델을 유한요소법에 의해 해석하기 위해서는 많은 요소분할과 계산시간이 필요하며, 이를 실제와 동일하게 모델링하여 계산하기에는 많은 어려움이 따른다. 따라서, 본 논문에서는 적층모델을 한개의 블록으로 고려할 수 있도록 부자속을 등가적으로 이방화하는 방법을 사용하였다.

그림2.2는 간단한 적층모델(a)과 이것과 등가적인 성질의 블록(b)을 나타낸다.



(a) 적층모델 (b) 등가이방성블록

그림 2.2 적층모델의 등가이방성블록화

등가이방화 모델을 사용할 경우 X방향과 Y방향의 투자율은 식2.1과 식2.2로 표현된다. 여기서, P는 코어의 점적율을 나타낸다.

$$\mu_{xx} = \frac{1}{1 - P} \quad (2.1)$$

$$\mu_{yy} = P \mu_r \quad (2.2)$$

표1에서 나타내는 것처럼 적층두께가 얇기 때문에 철심내의 와전류손은 무시할 수 있다. 해석모델은 와전류를 무시한 2차원 장이므로 다음과 같은 경자계의 기본방정식으로 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_{yy}} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_{xx}} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -J_0 \quad (2.3)$$

여기서, A는 \vec{A} 의 z축 방향성분이며, J_0 는 \vec{J}_0 의 z축 방향 성분이다. 유한요소법을 적용하기 위하여 Galerkin법을 적용하여 요소의 잔차를 구한후, 전영역의 모든 요소에 대하여 조합하여 계행렬을 얻으면, 벡터포텐셜 및 전류가 미지수로 되어 기지식은 절점수 n인 반면에 미지변수는 n+1개이므로, 자기벡터포텐셜, 전류, 단자전압사이의 새로운 관계식을 추가하여 전압을 구동함수로 하는 유한요소해석을 하여야 한다. 누설자속을 무시할 경우 회로방정식은 다음과 같다.

$$V_1 = R_1 I_1 + N_1 \frac{d\Phi_{12}}{dt} \quad (2.4)$$

여기서, V_1 는 1차측 인가전압, R_1 과 R_0 는 1차측 권선저항 및 권선부의 저항, I_1 은 1차권선에 흐르는 전류, N_1 은 1차측 코일턴수, Φ_{12} 은 코일 1번에 쇄교하는 자속이다.

유한요소해석 영역과 외부회로를 그림 2.3에 나타낸다.

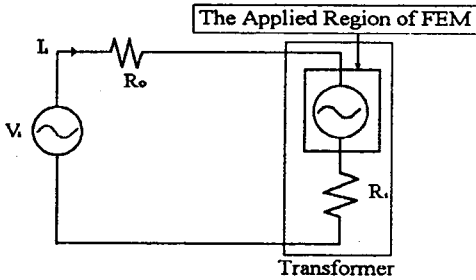


그림 2.3 유한요소법 적용영역과 외부회로도

계행렬과 회로 방정식으로부터 유도된 전압방정식을 이용하여 각 절점의 벡터포텐셜과 무부하전류를 미지값으로 하는 다음의 계방정식이 얻어진다.

$$[H] [A] + [M] [I] = [0] \quad (2.5)$$

$$[T] \frac{d}{dt} [A] + [R] [I] = [V]$$

여기서, 각 계수행렬값들은 다음과 같다. [2]

$$H_{ij}^e = \frac{1}{4 \Delta^{(e)}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\mu_y} c_{1e} c_{1e} + \frac{1}{\mu_x} d_{1e} d_{1e} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$A_i^e = \begin{bmatrix} A_1^e \\ A_2^e \\ A_3^e \end{bmatrix} \quad (2.7) \quad M_i^e = -\frac{N}{S} \int_{\Delta} N_i dx dy = \mp \frac{NA_i^e}{3S} [1 \ 1 \ 1] \quad (2.8)$$

$$I_i^e = \begin{bmatrix} I \\ I \\ I \end{bmatrix} \quad (2.9) \quad T = \pm \frac{NI_i^e}{3S} \quad (2.10)$$

위에 전개한 계방정식중 시간미분항을 처리하기 위해서 해석하고자 하는 현상의 미분방정식을 시간에 대해 이산화하여 계산하는 시간차분법을 사용하는 방법을 사용하였다. 시간 t에 있어서 자기벡터포텐셜 A_i 의 값을 알고 있을때, Δt 시간 이후의 근사치 $A_{i+\Delta t}$ 를 구하는 방법인 시간차분법을 사용하게 되면, 초기의 전원 인가시점부터의 과도양상까지도 구할 수 있게 된다. 시간차분법을 식 2.5에 적용시키면 최종적으로 다음의 계방정식이 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} H & M \\ T \Delta t \cdot R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{i+\Delta t} \\ I_{i+\Delta t} \end{bmatrix} = \quad (2.11)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_i \\ I_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta t \cdot V_{i+\Delta t} \end{bmatrix}$$

유한요소법을 적용함에 있어서 철심의 비선형성을 고려하기 위하여 실제코어의 B-H 곡선을 이용한 비선형해석을 행하였다.

철손은 시간에 따라 변화하는 자속밀도에 의해 발생되는 와류손과 히스테리시스손이며, 철심내의 철손은 최대자속밀도 B_m 으로부터 계산될 수 있다. 변압기의 철손을 얻기 위하여 실제변압기 재료의 B-철손 그래프를 이용하였으며, 자속밀도를 0.05T씩 구간을 나누어 이 구간에서는 비철손을 일정하게 두었다.

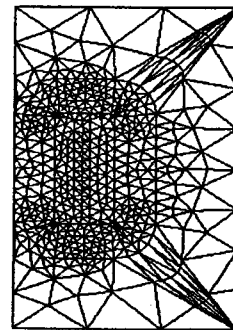
전체철손은 식 2.7과 같이 각 요소에서의 철손을 모두 합하면 된다.[3]

$$P = \sum P_i \Delta^{(e)} WS \quad (2.12)$$

여기서, P_i 는 비철손(Specific Iron Loss), $\Delta^{(e)}$ 는 요소면적, W 는 철심폭, S 는 철심의 비중(Kg/m^3)이다.

2.2 해석결과 및 고찰

해석시간을 줄이기 위하여 1/2모델로 유한요소해석을 행하였으며, 본 논문에서 이용한 이등방성모델의 정확성을 검증하기 위하여 실험과 이등방성모델, 등방성모델의 해석결과를 비교검토하였다. 요소분할도 그림 2.4에 보인다. 그림 2.4의 요소분할도에서 최악의 직사각형부분은 고정경계조건을 주어 해석하였다.



Node : 762개 Element : 1423개

그림 2.4 요소분할도

그림2.5와 그림2.6에서는 자속밀도의 10주기까지의 변화양상과 안정화된 시점인 10주기에서의 양상을 보인다. 마찬가지로 그림 2.7과 그림 2.8에서는 여자전류의 변화양상을 보인다.

해석에 있어서는 50Hz, 6350V의 정현파전원을 인가하여 전압원해석을 행한결과, 초기전원인가 시점부터 정현파전압이 약 4주기정도 지날때까지는 여자전류및 자속밀도가 변화하는 과도적인 양상을 지니지만, 4주기가 지난 이후에는 거의 변화가 없는 양상을 보임을 알 수 있다.

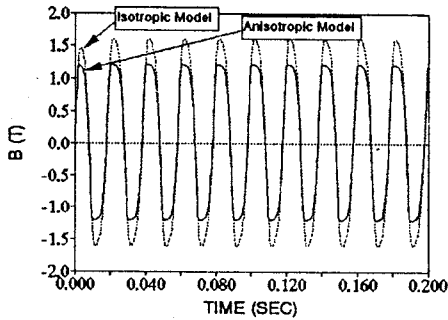


그림 2.5 시간변화에 따른 자속밀도파형

그림 2.6에 의해, 등방성모델의 경우 적층을 고려해 줄 수 없기 때문에 전반적으로 루자율이 높게 산정되어, 자속밀도가 이등방성모델의 경우보다 높게 계산되었음을 알 수 있다.

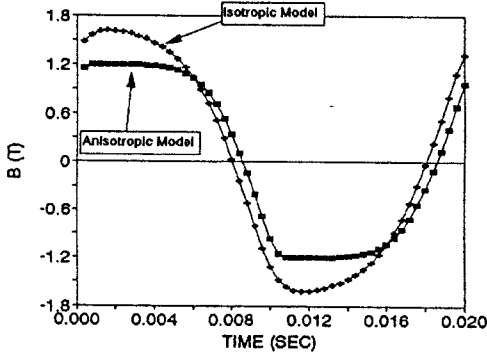


그림 2.6 10주기에서의 자속밀도파형

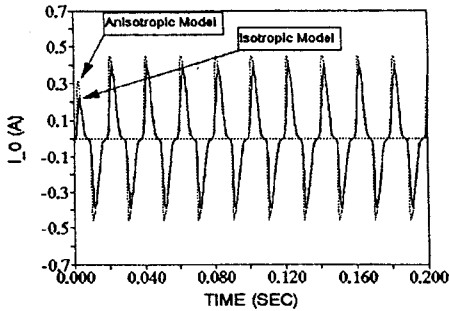


그림 2.7 시간변화에 따른 여자전류파형

그림 2.8에 의해 등방성모델의 경우 자속밀도가 높게 계산되어 나왔으므로, 이로인한 여기전력성분의 증가에 의해 상대적으로 여자전류는 낮게 계산되어지고, 이등방성모델의 경우는 이와 반대의 양상을 지니게 된다.

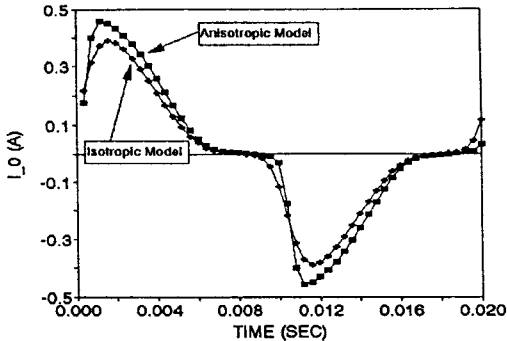


그림 2.8 10주기에서의 여자전류파형

이상의 해석을 결과를 요약해서 표.2에 나타낸다.

표.2 해석결과표

	Lrms (A)	Bm (T)	철손 (W)
실험	0.24	1.286	41.8
이방성모델	0.263	1.201	40.03
오차	9.6%	6.6%	4.2%
등방성모델	0.211	1.615	53.78
오차	12.1%	25.6%	28.7%

이상의 과정을 통해 권철심형 변압기를 해석함에 있어 등방성 모델을 사용하게 되면 철심의 적층을 고려해 줄 수 없기 때문에 루자율이 전반적으로 높게 계산되고, 따라서 자속밀도도 높게 산정됨으로써 결과적으로 여자전류 및 철손이 실험치보다 높게 나옴을 알 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 권철심 변압기를 등가이방화 모델링기법을 사용하여 철손 및 여자전류를 해석하고 이를 실험과 비교검토하였다.

이방성모델을 사용함으로써 실제모델을 원형대로 모델링한 경우보다 계산시간을 대폭감소시킬 수 있으며, 실험결과와의 비교에서도 큰 오차가 발생하지 않음을 알 수 있었다. 등방성모델로 해석할 경우는 코어의 적층을 고려해 줄 수 없으므로 상대적으로 오차가 크게 나타남을 알 수 있었다. 따라서, 권철심변압기의 해석에는 이방성모델을 사용함이 타당함을 알 수 있었다.

4. 참고자료

- [1] M.L.Barton, "Loss Calculation in Lamination Steel Utilizing Anisotropic Magnetic Permeability," IEEE Trans. PAS, Vol.PAS-99, No.3, pp. 1280-1287, May/June, 1980
- [2] 임달호저, 전기계의 유한요소법, 동명사, 1992
- [3] 山本行雄監수, 電磁界解析のための有限要素法, トリケツプス, 1983