

아몰퍼스 변압기의 철손해석

임 달 호, 권 병 일, 윤 상 백, 박 승 찬*, 이 중 호
한양대학교 전기공학과

Analysis of Iron Loss in a Amorphous Transformer

D.H.Im, B.I.Kwon, S.B.Yun, S.C.Park*, J.H.Lee
Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University

Abstract - In this paper, the iron loss of a amorphous transformer is calculated by the specific iron loss curve, after calculating flux densities in core using magnetic equivalent circuit method and FEM.

In iron loss analysis using FEM, lamination model of amorphous transformer is transformed into anisotropy model, and it is known that the result is almost equal compared with the result of analysis using magnetic equivalent circuit method.

표1. 철심 및 코일의 사양

		METGLAS 2605 S-2 (Fe-B-Si계)	
철심	비 중(S_w)	7180(Kg/m ³)	
	비투자율(μ_r)	200,000	
	적층두께(d)	0.0254(mm)	
	적층권수(n)	1439	
		절적율	85%
코일	고압권수(N)	1.1mm(직경), 4560턴	
	저압권수	2.5 × 12 mm, 152턴	

1. 서론[1]

꿈의 재료로서 주목을 끌었던 아몰퍼스 금속(Amorphous metal)이 등장한지 이미 20여년이 경과하면서, 일부의 응용 분야에서는 실용화하기에 이르르게 되었다. 그중에서도 전력용 변압기 철심에의 응용은 가장 기대되는 응용분야로서, 각종 변압기의 試作 검토, 실용규모의 수명시험에 의한 신뢰성의 확인등 실용화를 위한 개발노력이 행해져, 선진국에서는 이미 실용화 단계에 들어가 있으며, 국내에서도 기초연구가 진행되어 실용화를 위한 상품화 노력이 보고되고 있다.

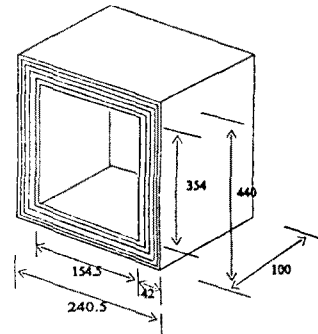


그림 2.1 철심의 크기

아몰퍼스 변압기에 대한 연구는, 제작상의 문제점 연구 및 실험논문이 대부분이며, 국내에서도 산업체가 이의 시험 제작 및 실용화에 대하여 많은 관심을 갖고 있는 것으로 알려져 있다. 하지만 아몰퍼스 코어로 이루어진 변압기의 특성을 정량적으로 파악하는 연구에 대한 성과 및 연구의 움직임이 거의 없는 실정이다. 실용화에 앞서 이들 기초적인 연구는 필수적이며, 이에 대한 연구의 필요성이 절실하다.

그림 2.1의 모델에 관하여 자기동가회로를 구성하여 나타내면 그림 2.2와 같으며, 철손을 구하기 위하여 다음과 같은 가정을 둔다.

- 1) 와전류는 미소하여, 주자속에 영향을 미치지 않는다.
- 2) 각 적층내에서의 자속의 분포는 일정하다.
- 3) 적층의 절적율은 작고, 투자율은 대단히 크므로, 각적층내의 자속은 누설이 없는 것으로 생각한다.

따라서, 본 연구에서는 적층두께가 얇은 아몰퍼스 변압기의 철손을 자기동가회로법과 유한요소법으로 계산하는 방법을 제시한다. 유한요소법에 의한 방법에서는 적층모델을 등가이방성 모델로 변환하여 철손을 계산하였고, 자기동가회로법으로부터 구한 결과와 비교함으로써 해석방법의 유용성을 입증한다.

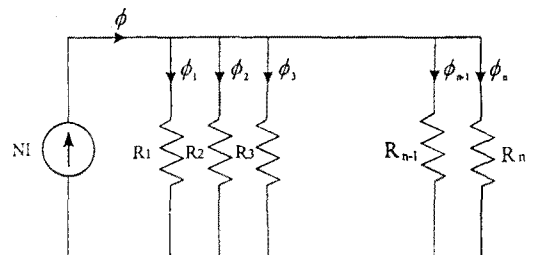


그림 2.2 자기동가회로

2. 자기동가회로법에 의한 철손 해석

2.1 해석모델[1] 및 가정

본 연구에서의 해석모델은 12600V/460-230V, 20KVA의 용량이며, 철심 및 코일의 사양은 표1과 같다. 또한, 해석 모델 철심의 1/2 크기를 그림2.1에 나타내었으며, 철심의 코너 부분은 원형이지만, 편의상 직각으로 나타내었다.

n번째의 층을 통과하는 자속 ϕ_n 은 식 (2.1)과 같이 계산할 수 있으며, 이로부터 식 (2.2) 와 같이 자속밀도 B_n 이 구해진다.

$$\phi_n = \frac{\mu S_n N I}{l_n} \quad (2.1)$$

$$B_n = \frac{\mu N I}{l_n} \quad (2.2)$$

여기서, l_n 은 각 적층의 자로 길이, S_n 는 각 적층의 단면적이며, I 는 무부하전류로서 0.001 [A] 이다.

2.2. 철손 해석

철손은 시간에 따라 거의 정형적으로 변화하는 자속밀도에 의해 발생하는 와류손과 히스테리시스손이며, 철심내의 철손은 최대자속밀도 B_m 으로부터 계산될 수 있다.

변압기의 철손은 그림 2.3에 나타난 비철손(specific iron loss)곡선으로부터 구할 수 있다. 이 곡선은 자속밀도에 대한 중앙당 철손을 나타낸 것이다. 실제로 비철손 곡선으로부터 철손을 계산할 때는, 자속밀도를 0.05 [T] 씩 구간을 나누어 이 구간에서는 비철손을 일정하게 두었다.

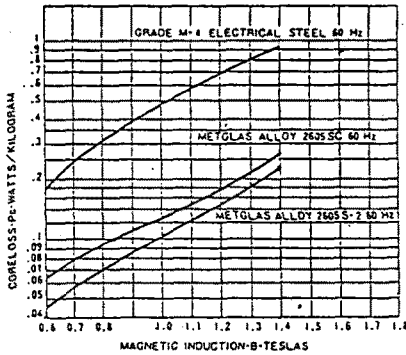


그림 2.3 비철손 곡선 [1]

전체 철손은 식(2.3)과 같이, 각 적층에서의 철손을 모두 합하면 된다.

$$P_i = \sum_{i=1}^n S_w S_n I_n P_s \quad (2.3)$$

여기서, P_s : 비철손 (specific iron loss) [W/kg]

또한 와류손은 식 (2.4)로 표현된다[2]. 해석모델의 와류손은 식 (2.4)에 의해 계산한 결과, 0.06 [W] 를 얻었다. 따라서, 와류손은 철손에 비하여 무시할 수 있을 정도로 적으므로 유한요소해석에서는 이를 무시하기로 한다.

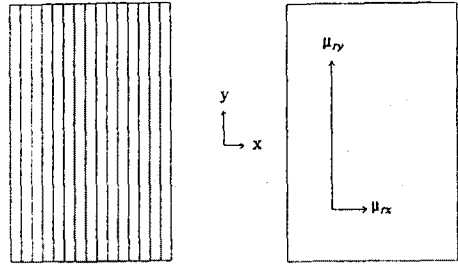
$$P_e = \frac{c K_f f^2 B_m^2 t^4}{\rho} \quad (\text{적층두께 } d=t, \text{ 철심폭 } w=ct) \quad (2.4)$$

여기서, K_f 는 파형을 f 는 전원주파수, ρ 는 철심의 저항률이다.

3. 유한요소법에 의한 철손 해석

3.1 적층모델의 등가 이방성모델로의 변환[3]

아돌퍼스변압기처럼 적층두께가 얇은 Model을 유한요소법에 의해 해석하기 위해서는 많은 요소분할 및 계산시간이 필요하며, 이것은 실제적으로, 현재의 계산기의 능력으로부터는 많은 어려움이 있다. 따라서, 본 절에서는 적층 Model을 한개의 Block으로 고려할 수 있도록 부자율을 등가적으로 이방화하는 방법을 제시한다. 그림 3.1은 간단한 적층모델(a)과, 이것과 등가적인 성질의 불럭(b)을 나타낸다.



a) 적층모델 (b) 등가이방성블록
그림 3.1 적층모델의 등가이방성블록화

적층 중에서 철심이 차지하는 비율을 나타내는 Packing factor를 p 라 하면 그림 (b)에서의 μ_x, μ_y 는 각각 다음과 같이 계산된다.

$$\mu_x \approx \frac{1}{1-p} \quad (3.1)$$

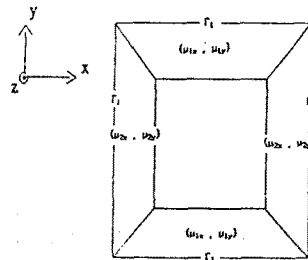
$$\mu_y \approx p \mu_r \quad (3.2)$$

따라서, 해석하고자 하는 아돌퍼스 변압기의 비투자율이 $\mu_r = 200,000$ 의 선형이라고 가정하면, Packing factor는 0.85이므로 $\mu_x = 6.7$, $\mu_y = 170,000$ 이 된다.

3.2 유한 요소 해석[4]

변압기는 1차 단자전압이 주어지므로, 전압을 구동함수로 하는 유한요소법으로 해석하면 철심의 설계치수가 변할때마다 무부하 전류뿐만 아니라 철손도 쉽게 계산할 수 있다. 이와같은 유한요소해석을 하기 위한 변압기의 모델을 그림 3.2에 나타내었으며, 다음과 같은 가정을 두기로 한다.

- 1) 적층 두께는 대단히 작아서 와전류에 의한 반향자계는 대단히 적을 것이므로 이는 무시한다.
- 2) 전류는 z방향만 존재한다.
- 3) 철심의 적층을 고려하기 위하여 투자율은 등가이방성을 갖는다고 가정한다.



Γ_1 : Dirichlet boundary condition
(μ_x, μ_y) = (170,000 μ_0 , 6.7 μ_0)
(μ_x, μ_y) = (6.7 μ_0 , 170,000 μ_0)

그림 3.2 유한요소법에 의한 해석모델

그림 3.2의 해석모델은 와전류를 무시한 2차원장이므로, 정자계의 기본 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_y} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_x} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = - \frac{NI}{S} \quad (3.3)$$

여기서, I 는 권선의 전류, N 은 권수, S 는 전체권선의 단면적을 나타낸다. 유한요소법의 정식화를 위하여 Galerkin법을 적용하여 요소의 잔차를 구한후, 전영역의 모든 요소에 대하여 조합하면, 다음과 같은 계 Matrix를 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} H_{1,1} & \dots & H_{1,n} \\ \vdots & & \vdots \\ H_{n,1} & \dots & H_{n,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ \vdots \\ A_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{1,1} \\ \vdots \\ M_{n,1} \end{bmatrix} [I] = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

식(3.4)는 벡터포텐셜 및 전류가 미지수로 되어있어서 已知式은 절점수 n개인 반면에 미지변수는 n+1개이므로, 자기 벡터포텐셜, 전류, 단자전압사이의 새로운 관계식을 추가하여 전압을 구동함수로 하는 유한요소해석을 하여야한다. 그림3.3에 유한요소법 적용영역과 외부회로를 나타내었으며, 이 때의 회로방정식은 다음과 같다.

$$V = \frac{d\phi}{dt} + L_0 \frac{dI}{dt} + RI \quad (3.5)$$

여기서, 우변의 제1항은 권선에 유기되는 역기전력, L_0 는 권선축의 인덕턴스, R은 권선 및 권선축의 저항 R_w, R_0 의 합이다.

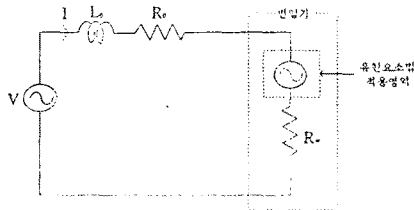


그림 3.3 유한요소법 적용영역과 외부회로

식(3.5)에서 권선에 유기되는 역기전력은, 여자 전류의 외형을 무시하면, 다음과 같이된다.

$$\frac{d\phi}{dt} = j\omega \frac{N_h}{3S} \sum_{e=1}^{N_s} \sum_{i=1}^3 \Delta^{(e)} A_{ie} \quad (3.6)$$

여기서, N_s 는 권선영역을 구성하는 요소수이며, w 는 철심 폭이다. 따라서, 식(3.5)의 전압방정식은 다음과 같이 된다.

$$j\omega \frac{N_h}{3S} \sum_{e=1}^{N_s} \sum_{i=1}^3 \Delta^{(e)} A_{ie} + j\omega L_0 I + RI = V \quad (3.7)$$

식(3.7)을 정리하여 행렬로 표현하면, 식(3.8)이 된다.

$$\begin{bmatrix} Q_{11} & \dots & Q_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ Q_{n1} & \dots & Q_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ \vdots \\ A_n \end{bmatrix} + [R + j\omega L_0] [I] = [V] \quad (3.8)$$

따라서, 식(3.4)와 식(3.8)로부터, 각 절점의 벡터 포텐셜과 무부하전류를 미지값으로 하는, 식(3.9)과 같은 界 方 程 式이 구하여 진다. 또한 식(3.9)의 해를 구한 결과, 무부하전류 I는 0.001 [A] 이었으며, 그림 3.4에는 등자기벡터포텐셜도를 나타내었다.

$$\begin{bmatrix} (I) & (M) \\ (Q) & (Z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (A) \\ (J) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (0) \\ (V) \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

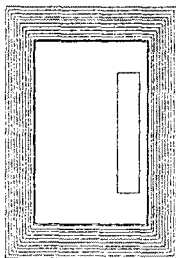


그림 3.4 등자기벡터포텐셜도

3.3 철손 해석 및 고찰 [5]

1차삼각형 요소내에서의 자속밀도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} |B| &= \sqrt{|B_x|^2 + |B_y|^2} \\ B_x &= \frac{\partial A}{\partial y} = \frac{1}{2\Delta^{(e)}} \sum_{i=1}^k d_i A_i \\ B_y &= -\frac{\partial A}{\partial x} = -\frac{1}{2\Delta^{(e)}} \sum_{i=1}^k c_i A_i \end{aligned} \quad (3.10)$$

$(c_i = y_j - y_k, \quad d_i = x_j - x_k)$

여기서, i, j, k 는 반시계방향의 삼각요소 절점들이다. 전체 철손은 식(3.11)과 같이, 각 요소에서의 철손을 모두 합하면 계산된다.

$$P_i = \sum P_s \Delta^{(e)} W S_w \quad (3.11)$$

여기서, P_s : 비철손 (specific iron loss) [W/kg]
 $\Delta^{(e)}$: 요소면적 [m^2], w : 아몰퍼스 철심 폭 [m]

표 3.1은 자기동가회로법과 유한요소법에 의하여 구한 철손을 비교한 것이며, 두방법에 의한 결과가 거의 일치함을 알 수 있다.

표 3.1 철손 계산 결과

철손계산방법	철 손 [W]
자기동가회로법	7.8
유한요소법	7.4

4. 결 론

본 연구에서는 적층두께가 얇은 아몰퍼스 변압기의 철손을 계산하는 방법을 제시하였다.

철심내의 자속밀도를 구하기 위하여, 자기동가회로법에서는 병렬의 자기회로를 구성하였으며, 유한요소법에 의한 해석에서는 적층 모델을 등가이방성 모델로 변환하였다. 철손은 계산된 자속밀도를 이용하여 비철손 곡선으로부터 구하였으며, 이들 두 방법에 의한 결과가 거의 일치함을 확인하였다.

따라서, 본 연구에서 제시한 아몰퍼스 변압기의 철손계산법을 이용하면, 손실 최소화를 위한 아몰퍼스 변압기의 설계에 큰 도움이 되리라 생각된다.

참고 문헌

- [1] 김운동 외, "아몰퍼스 코어를 이용한 저손실형 변압기 개발유도에 관한 연구(최종보고서)", 한국전력공사 기술연구원(보고서), 1986.4.
- [2] 박민호, "유도기기"(book)
- [3] M.L.Barton, "Loss Calculation in Laminated Steel Utilizing Anisotropic Magnetic Permeability", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-99, No.3, May/June, 1980
- [4] 임달호, "전기계의 유한요소법", 동명사
- [5] C.G.Hong, S.C.HO, G.J.Hwang, "Characteristics of a squirrel Cage Induction Motor", IEE proceeding-B, Vol.138, NO.3, pp.115-124, May, 1991