

권철심변압기의 등가이방성모델을 이용한 최적설계

임달호, 권병일, 박승찬, 이종호, 김성영⁰
한양대학교 전기공학과

Optimal Design of Wound core type Transformer by Equivalent Anisotropic Block

D.H.Im, B.I.Kwon, S.C.Park, J.H.Lee, S.Y.Kim⁰
Dept. of Electrical Eng. Hanyang University

Abstract - The analysis of the thin lamination model of the amorphous transformer by FEM requires many region divisions and much calculating time, and it has difficulty in calculating for modern computer. A new method which is simulated by a solid but anisotropic block with the magnetic permeabilities in two orthogonal directions selected to account for the presence of the laminations. [1] Based on this equivalent anisotropic block model, we analyzed the iron loss of the amorphous transformer by FEM, and presented an optimal design example of core dimensions for minimizing the iron loss.

1. 서론

변압기의 손실최소화를 위한 코어설계를 위해서는 유한요소법 등의 수치해석이 유용하다. 하지만, 권철심변압기인 아몰퍼스변압기의 코어재료는 대단히 얇아서, 이를 그대로 유한요소법을 이용하여 손실최소화를 위한 코어설계를 하기는 현재의 계산기의 성능으로서는 무리가 따른다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 적층코어를 등가이방성인 한개의 블록코어로 모델링하며, 적층이 대단히 얇으므로 와전류에 의한 자속은 주자속에 거의 영향을 미치지 않는것으로 고려하여 와전류를 계산하는 방법이 제시되었다. [1] 저자는 이러한 모델링 및 가정을 이용하여 철손을 구하는 방법을 발표하였다. [2]

본 논문에서는 등가이방성모델링에 의하여 적층코어의 철손을 유한요소법 해석에 의해 계산하며, 철손 최소화를 위한 코어설계의 한예를 제시한다.

2. 유한요소법에 의한 적층철심의 철손해석 [2]

해석을 위한 권철심 변압기의 구조와 사양을 그림 2.1과 표 1에 나타낸다. 변압기는 양쪽이 대칭이며 그림은 실제모델의 1/2만을 보여주고 있다.

해석모델은 12600V/460-230V, 20KVA의 용량이며, 철심의 코너부분은 원형이지만 편의상 직각으로 나타내었다. 또한, 이후의 철손최소화를 위한 최적설계에 있어서 X_1 과 X_2 의 값은 변화하지만 변압기 내부의 창폭은 154.5(mm) * 354(mm) 로 일정한 값을 취한다.

표 1 철심 및 코일의 사양

Table 1 Dimension of Wound core type Transformer

		재 질	METGLAS 2605 S-2 (Fe-B-Si계)
철 심	비 중 (S_g)		7180 (Kg/m ³)
	비무자율 (μ_r)		25,000
	적층두께 (d)		0.0254(mm)
	적층권수 (n)		1439
	절적율		85%
코 일	고압턴수 (N)		1.1mm(직경), 4560번
	저압턴수		2.5 * 12mm, 152번

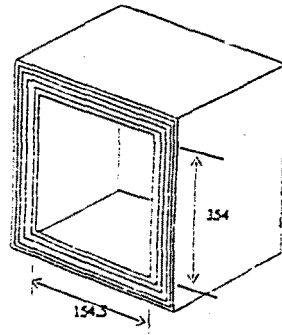


그림 2.1 철심의 크기

Fig 2.1 Structure of Winding Transformer

표 1에서 나타내는 것처럼 아몰퍼스 금속의 적층두께가 매우 얇고, 저항을 또한 대단히 크기때문에 철심내의 와전류손은 무시할 수 있다.

아몰퍼스변압기의 경우처럼 적층두께가 얇은 Model을 유한요소법에 의해 해석하기 위해서는 많은 요소분할 및 계산시간이 필요하며, 현재의 계산기의 능력으로는 구현에 많은 어려움이 따르므로, 본 절에서는 적층 Model을 한개의 Block로 고려할 수 있도록 무자율을 등가적으로 이방화하는 방법을 사용하였다.

해석모델은 와전류를 무시한 2차원장이므로 다음과 같은 장자계의 기본 방정식으로 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(\frac{1}{\mu_y} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_x} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -\frac{NI}{S} \quad (2.1)$$

여기서, I는 권선의 전류, N은 권수, S는 전체권선의 단면적을 나타낸다.

유한요소법을 정식화하기 위하여 Galerkin법을 적용하여 요소의 잔차를 구한후, 전영역의 모든 요소에 대하여 조합하여 계 Matrix를 얻으면, 벡터포텐셜 및 전류가 미지수로 되어있어서 既知式은 절점수 n개인 반면에 미지변수는 n+1개이므로, 자기벡터포텐셜, 전류, 단자전압사이의 새로운 관계식을 추가하여 전압을 구동함수로 하는 유한요소 해석을 하여야 한다. 이때의 최로방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$V = \frac{d\phi}{dt} + L_0 \frac{dI}{dt} + RI \quad (2.2)$$

여기서, 우변의 제 1항은 권선에 유기되는 역기전력, L_0 는 유한요소해석 외부영역의 인덕턴스, R은 권선 및 권선층의 저항 R_w, R_0 의 합이다. 유한요소해석 영역과 외부회로를 그림 2.2에 나타낸다.

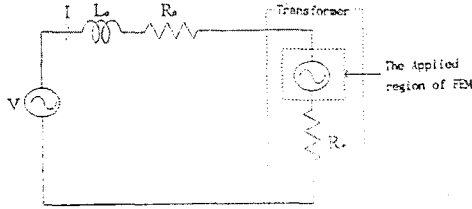


그림 2.2 유한요소법 적용영역과 외부회로
Fig. 2.2 Analysis circuit

계 Matrix와 회로방정식으로부터 유도된 전압방정식을 이용하면 각 절결의 벡터포텐셜과 무부하전류를 미지값으로 하는 다음의 界方程式이 구하여 진다.

$$\begin{bmatrix} (H) & (M) \\ (Q) & (Z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (A) \\ (I) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (0) \\ (V) \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

철손은 시간에 따라 거의 정현적으로 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 증량당 철손을 나타낸 것이다. 실제로 비철손 곡선으로부터 철손을 계산할 때는, 자속밀도를 0.05[T]씩 구간을 나누어 구간에서는 비철손을 일정하게 두었다.

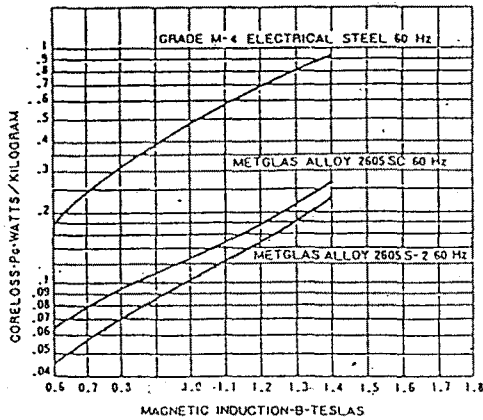


그림 2.3 비철손곡선 [2]
Fig. 2.3 Specific iron loss curvature

전체철손은 식 (2.4)와 같이, 각 요소에서의 철손을 모두 합치면 계산된다.

$$P_i = \sum P_{\Delta}^{(e)} W S_w \quad (2.4)$$

여기서, P_{Δ} : 비철손 (specific iron loss) [W/kg]
 $\Delta^{(e)}$: 요소면적 [m²]
 w : 알루미늄 철심 폭 [m]
 S_w : 철심의 비중 (kg/m³)

3. 철손최소화를 위한 철심의 최적설계

3.1 자속밀도의 결정

자속밀도는 그림 2.4에 나타난 포화자속밀도를 고려하여 결정하였다. 포화자속밀도와 온도에 따라 철손이 급격히 증가하는 임계자속밀도는 1.4[T]보다 약간 크지만, 온도에 따른 여자 VA는 1.3[T] 이상이 되면 크게 증가하므로, 본 연구에서는 철심 내부의 자속밀도를 1.3[T]로 선정하였다.

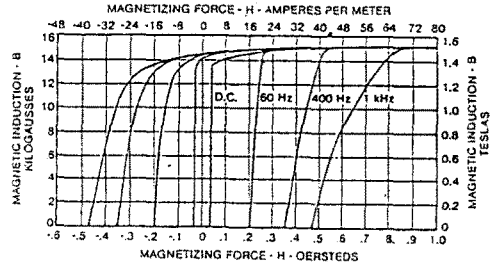


그림 2.4 B-H 곡선
Fig. 2.4 B-H Curvature

3.2 철심의 최적설계

철손이 최소가 되는 철심을 설계하기 위하여 목적함수, $F(x)$ 및 제약조건 B_m 을 다음과 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned} & \text{minimize } \{ F(x) = P_i(x) \} \\ & \text{subject to } B_m = 1.3 \text{ [T]} \end{aligned} \quad (3.1)$$

여기서, $x = \{ X_1, X_2 \}$ 로서 X_1 과 X_2 는 그림 2.5에서 나타난 것과 같이 철심 두께와 철심폭이며, 그림 2.1에서 나타난 것처럼 창폭이 일정한 크기로 하였다.

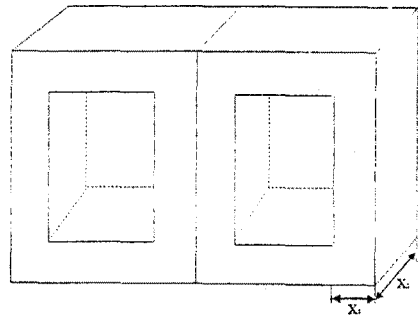


그림 2.5 설계변수
Fig. 2.5 Design parameter

식(3.1)로 표현된 문제를 풀기위하여, X_1 은 40mm 에서 46mm 까지, X_2 는 80mm에서 100mm까지 변화시키면서 유한요소해석을 하였다. 이때의 X_1 과 X_2 에 따른 철손(P_i)과 최대자속밀도(B_m), 여자전류(I_0)를 표 2에 나타내었고, 또한 $X_1=40$ mm, $X_2=100$ mm 일때의 요소분할도와 등벡터포텐셜도를 그림 2.6, 그림 2.7에 나타내었다.

표 2 설계변수에 따른 특성
Table 2 Characteristics to Design Parameters

X_1 [mm]	X_2 [mm]	P_i [W]	B_m [T]	I_0 [A]
40	80	11.4932	1.6259	0.1107×10^{-1}
40	90	12.9298	1.4452	0.9842×10^{-2}
40	100	10.1118	1.3007	0.8857×10^{-2}
42	80	12.9291	1.5473	0.1128×10^{-1}
42	90	12.7998	1.3753	0.1002×10^{-1}
42	100	10.2139	1.2379	0.9023×10^{-2}
44	80	12.8143	1.4869	0.1019×10^{-1}
44	90	10.7326	1.3222	0.9065×10^{-2}
44	100	9.6108	1.1899	0.8158×10^{-2}
46	80	12.9233	1.4220	0.9824×10^{-2}
46	90	10.1769	1.2646	0.8733×10^{-2}
46	100	9.2384	1.1382	0.7859×10^{-2}

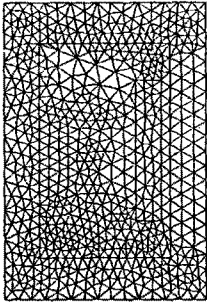


그림 2.6 요소분할도
Fig 2.6 Elements for FEM

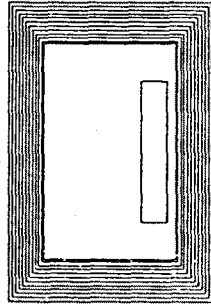


그림 2.7 등포텐셜도
Fig 2.7 Equivalent Potential Lines Diagram

그림 2.8은 X_1 과 X_2 에 대한 등자속밀도선이며, 그림에서 $B_m = 1.3$ [T] 인 자속밀도선을 빗금친 굵은 선으로 표시하였다.

그림 2.9는 X_1 과 X_2 에 따른 등철손의 분포도이며, 그림 2.8에서 표시한 1.3[T]의 위치를 이 그림에 겹쳐보임으로써 원하는 설계사양인 자속밀도가 1.3[T]인 부분에서의 철손이 최소가 되는 지점을 알기쉽게 표시하였다.

이상의 두개의 그림에서 손실이 최소가 되는 설계변수 X_1, X_2 를 찾아보면 X_1 은 약 40.5[mm], X_2 는 약 100[mm]가 됨을 알 수 있다. 따라서, 이 X_1 과 X_2 의 값으로 최적설계파라미터에 의한 특성치를 유한요소법을 사용하여 계산하면 다음과 같다.

표 3 최적설계 파라미터에 의한 특성
Table 3 Characteristics to Optimal Design

X_1 [mm]	X_2 [mm]	P_i [W]	B_m [T]	I_0 [A]
40.5	100	10.2282	1.2808	0.8765×10^{-2}

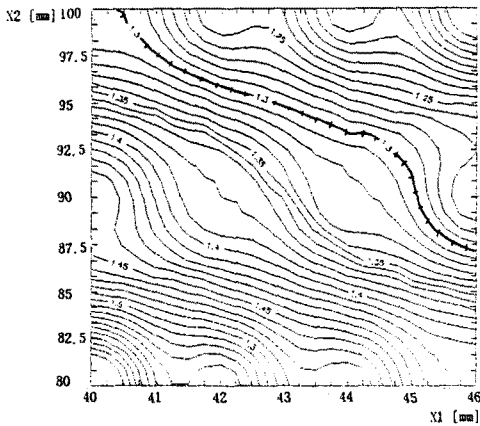


그림 2.7 설계변수에 따른 등자속선
Fig 2.7 Equivalent Flux Density Lines to Design Parameters

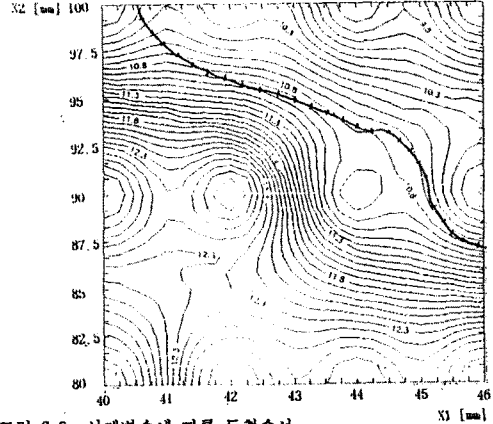


그림 2.8 설계변수에 따른 등철손선
Fig 2.8 Equivalent Iron Loss Lines to Design Parameters

4. 결론

아몰퍼스변압기와 같은 얇은 적층철을 등가이방성의 블록으로 모델화하는 기법을 이용하여 철손을 계산하였으며, 철손최소화를 위한 코어 형상의 최적설계 예를 제시하였다.

본 연구의 결과는, 권철심 변압기의 철손 및 동손을 함께 고려하여, 무부하손 최소화를 위한 형상최적화에 응용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] M.L.Barton, "Loss Calculation in Laminated Steel Utilizing Anisotropic Magnetic Permeability", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-99, No.3, May/June, 1980
- [2] 임달호, 권병일의, "대한전기학회 추계종합학술대회논문집", pp. 79-81, 1993