

**유한요소법을 이용한 컨버터 변압기 록플레이트 설계**

김지현, 김영만  
(주)효성 증공업 연구소

**Design of a lock plate for a converter transformer by finite element method**

Kim Ji-hyun, Kim Young-man  
Power & Industrial Systems R&D Center, Hyosung Corporation

**Abstract** - For transformer designers, eddy current loss calculation of steel structure is required to consider temperature rise on transformers. This study describes design of a lock plate for converter transformers by finite element method. The lock plate may be locally heated by fringing flux due to air-gap. 3D finite element analysis is performed and compared so as to minimize eddy loss on the lock plate with different materials and structures

표 1. 록플레이트 재질 특성(75°C)

재질명	전도도[S/m]	비투자율
SS(Mild Steel)	5E6	300
STS(Stainless)	1.1E6	1

**1. 서 론**

록플레이트는 변압기 철심 적층 외측부에 위치하여 철심을 기계적으로 지지한다.

변압기에서 표유손(stray losses)은 용량에 따라 증가를 하는데, 변압기 권선에서의 자속이 변압기 철심 및 철심 위의 록플레이트(lock plate)를 지나게 되어 표유손을 발생 시킬 수 있다. 대용량 전력용 변압기 또는 공극(air-gap)을 가진 정류기형 변압기, 리액터 등에서는 누설자속(leakage flux)의 영향에 의한 와전류가 록플레이트에 생성되어 와전류손(eddy current losses)에 의해 국부적인 가열을 일으킬 수 있으며, 그 결과 변압기 절연물의 열화를 초래할 수 있다.

록플레이트 손실 계산법은 실험식으로 보정된 해석적(analytical)방법과 유한요소법인 수치해석적(numerical)방법이 있는데, 전자는 일반적인 변압기에 국한되어, 록플레이트 재질을 혼합하거나, 슬롯(slot)을 낼 경우 해석하기가 곤란하고, 정밀도가 낮아 적용하기에 곤란하다. 따라서, 본 연구에서는 3차원 유한요소법을 이용하여 록플레이트에 SS(mild steel) 및 STS(stainless steel)의 재질을 사용할 경우와 STS 재질에 슬롯을 1개 및 3개로 낼 경우에 대해 각각 손실 해석을 통해 공극이 있는 컨버터형 변압기 록플레이트 설계에 반영했다.

**2. 본 론**

**2.1 해석모델**

해석대상이 되는 모델은 그림1과 같이 3상 3각 구조로 철심 중앙에 공극이 존재하는 40MVA 용량의 컨버터 변압기이며 공극의 프링징 현상(fringing effect)을 고려해 그림2와 같이 록플레이트를 접합하여 다른 재질을 혼용하는 구조(이하 접합구조로 칭함) 및 록플레이트 중앙에 슬롯을 내는 구조(이하 슬롯구조로 칭함)에 대해 각각 해석을 실시했다. 해석에 사용되는 록플레이트 재질의 특성은 표1과 같다.

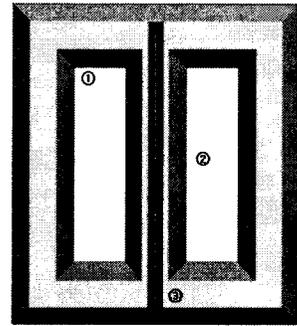


그림 1. 해석모델 변압기 외형도 (①:철심, ②:공극, ③:록플레이트)

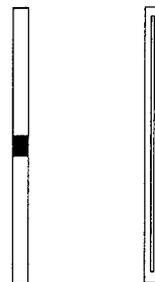


그림 2. 록플레이트 외형도 (좌:접합구조, 우:슬롯구조)

**2.2 지배방정식**

맥스웰 방정식에서 교류자장의 와전류 문제를 풀기위해 식 (1) 및 식(2)를 이용한다.

$$\nabla \times H = J \tag{1}$$

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \tag{2}$$

여기서,

$H$ : 자계  
 $J$ : 전류밀도.  $J = \sigma E$ 에 의한  
 $\sigma$ : 전기전도도  
 $E$ : 전계  
 $B$ : 자속밀도.  $B = \mu_0 \mu_r H$ 에서 계산됨  
 $\mu_0, \mu_r$ : 공기중의 투자율, 비투자율

와전류가 발생하는 도체 영역에서는  $H(t)$ 는 입력 전류 및 인가자계로부터 식(3)에 의해 구해지고, 그 외의 영역에서는 자기 스칼라 포텐셜  $\Phi$ 로부터 식(4)에 의해 계산된다.

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\sigma + j\omega\epsilon} \nabla \times H \right) = j\omega\mu H \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\mu \nabla \Phi) = 0 \quad (4)$$

도체의 와전류에 의한 손실은 식(5)와 같다.

$$P = RI^2 = \frac{1}{\sigma} \int_V J \cdot J \cdot dV \quad (5)$$

참고로, 도체의 침투 깊이는 식(6)과 같다.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu_0 \mu_r}} \quad (6)$$

### 2.3 해석조건 및 방법

록플레이트 손실을 계산하기 위해 다음과 같은 사항을 가정한다.

- 철심의 포화특성 고려 및 와전류 계산을 위해 3차원 비선형 해석을 실시한다.
- 철심의 철손 및 권선의 와전류 손실은 고려하지 않는다.
- 해석대상은 해석영역 외부로부터 자계의 영향을 받지 않는다. (Neumann 경계조건)
- 부하전류는 고조파 성분이 없는 완전한 정현파이다.

주자속에 의한 손실 및 누설자속에 의한 손실을 고려하여 무부하해석 및 부하해석을 실시한다. 무부하해석은 편의상 저압권선은 모델링 하지 않고 고압권선에 여자전류 암페어턴(AT)을 인가하였으며, 부하해석시에 고압 및 저압권선에 정격전류 암페어턴(AT)을 인가한다.

해석의 용이성 및 계산속도를 고려하여 권선 1상 및 록플레이트 1개에 대해서 해석을 실시하였다.

록플레이트 사례별 해석 조건은 표2와 같다.

표 2. 록플레이트 해석 조건

번호	재질	구조	해석조건
1	SS	집합	무부하
2	SS+STS	집합	무부하
3	STS	집합	무부하
4	SS	집합	부하
5	SS+STS	집합	부하
6	STS	집합	부하
7	STS	1슬롯	부하
8	STS	3슬롯	부하

여기서, SS+STS의 경우 철심의 중앙부에 있는 공극과 접촉하는 부위에만 STS를 사용하였다.

3차원 전자기장 해석을 위해 Maxwell3D ver10을 이용하였고, 비선형 오차를 0.01로 하여 transient 해석을 실시하였다.

### 2.4 해석 결과

조건별 록플레이트 손실 파형은 각각 그림 3-10과 같다.

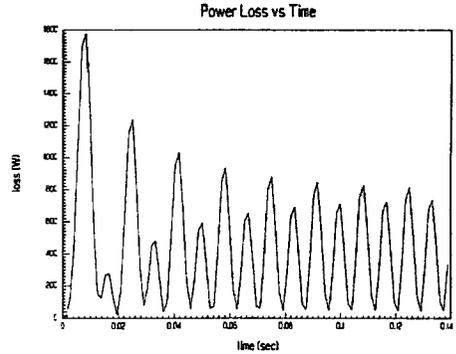


그림3. SS재질, 무부하시 손실

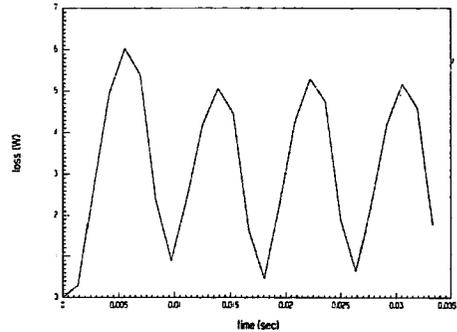


그림4. SS+STS재질, 무부하시 록플레이트 손실

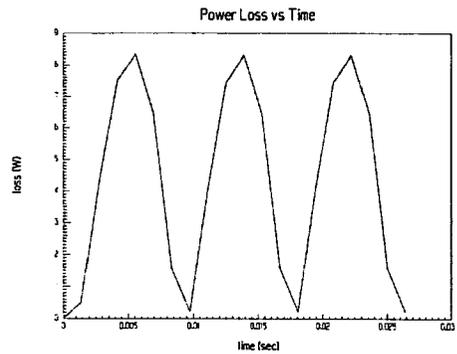


그림5. STS재질, 부하시 손실

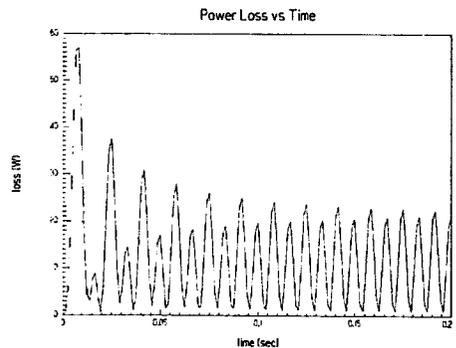


그림6. SS재질, 부하시 손실

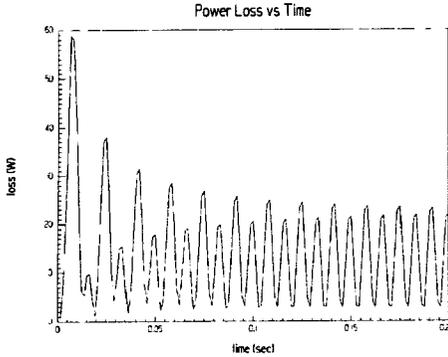


그림7. SS+STS재질, 부하시 손실

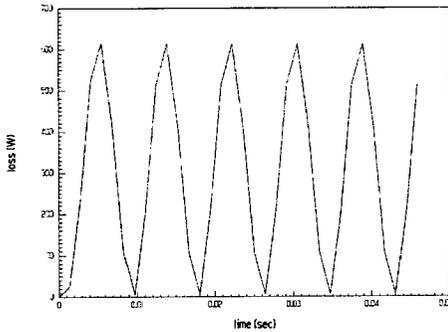


그림8. STS재질, 부하시 손실

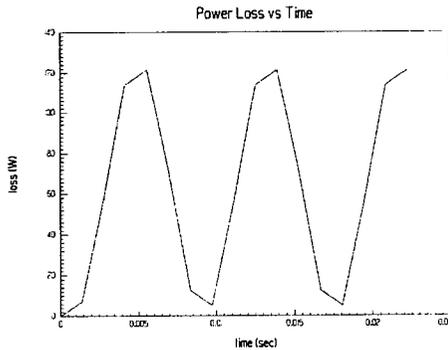


그림9. STS재질, 1슬롯, 부하시 손실

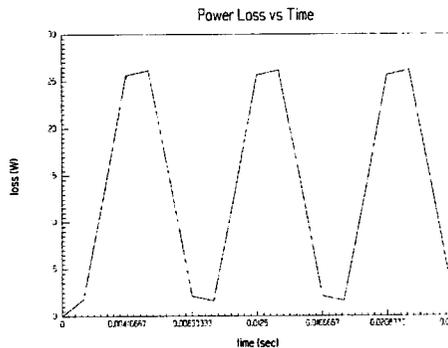


그림10. STS재질, 3슬롯, 부하시 손실

STS재질에 슬롯을 주지 않은 경우와 1개 및 3개를 준 경우에 따른 록플레이트 전류 밀도 벡터도는 그림 10 과 같다.



그림10. 슬롯수에 따른 록플레이트 전류밀도 벡터도  
(상: 슬롯수:0, 중:슬롯수:1, 하:슬롯수:3)

그림 10에서 록플레이트의 전류밀도는 권선의 끝단부가 위치한 부분에 집중이 되는데, 이는 권선의 끝에서부터 누설자속이 록플레이트에 수직으로 입사하는 성분이 지배적이기 때문이다.

식 6에 의해 결정되는 STS의 침투깊이는 65mm이므로 슬롯을 주어 침투깊이 보다 작게 두면 손실을 최소화 할 수 있으나, 기계적인 강도를 고려해 적절한 수의 슬롯을 내야 한다.

해석결과를 이용 조건별, 재질별로 록플레이트 손실치(침투치)를 정리하면 표 3과 같다.

표3. 조건별 록플레이트 손실(단위:W)

	SS	SS+STS	STS	1슬롯	3슬롯
무부하	800	5	3	-	-
부하	24	23	600	120	27

표 3에서 가장 낮은 록플레이트 손실을 가지는 조건은 SS 및 STS를 혼용한 접합구조 및 STS 재질의 3슬롯 구조이다. 시뮬레이션 결과 무부하시 손실은 재질의 투자율과 관계가 있으며 부하시 손실은 전기전도도 및 표피깊이(skin depth)와 상관관계가 있음을 추론할 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 3차원 유한요소법을 이용하여 공극이 있는 컨버터 변압기 록플레이트에 대한 사례별 해석을 통해 손실이 가장 낮은 구조 및 재질을 선정하였다. 실제로 SS+STS 및 3슬롯 구조가 손실이 낮은 사례로 선정할 수 있는데, 실제 제작시는 제작의 용이성 및 비용을 고려하여 SS+STS구조를 채택하였으며 이를 제작에 반영하도록 하였다. 향후 록플레이트 손실을 최소화 할 수 있는 최적화 연구, 계산된 손실에 대한 검증 및 변압기 온도상승에 대한 연구를 수행할 예정이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Ansoft Co., "Maxwell3D Technical Notes"
- [2] D.A.Koppikar et al., "Evaluation of flich plate losses in power transformers", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, July 1999