고효율 변압기용 레이저자구 전기강판 개발

권오열, 차상윤, 김지현, 하경호, 김재관
포스코 기술연구소 전기강판연그룹

Development of Electrical Steel by Laser Magnetic Domain Refinement for Applying to Transformers of High Energy Efficiency

Oh-Yeoul Kwon, Sang-Yun Cha, Kyung-Ho Ha, Ji-Hyun Kim, and Jae-Kwan Kim
Electrical Steel Research Group, Technical Laboratory, POSCO

Abstract - The magnetic domain-refining techniques such as ball scratching, laser irradiation and plasma have been developed to reduce the domain wall spacing and thus iron losses in Fe-3%Si grain-oriented silicon steels. In view point of magnetic properties, it was supposed that the locally residual stresses change the magnetoelastic energy of the material and thus the spacing between 180° domain walls decreases in order to reduce the magnetostatic energy.

The effect of laser irradiation on iron loss and magnetostriction reduction for Fe-3%Si grain-oriented steel were investigated. Since the local tensile stresses were induced at the surface of Fe-3%Si steel by the laser irradiation, the minimum iron loss caused by reducing eddy current loss was obtained in spiete of the decrease of permeability by hindering eddy current loss was obtained in spite of the decrease of permeability by hindering the domain wall movement around the induced stress field. Furthermore, the laser treated 3%Si steel has lower magnetostriction as compared to non laser-treated steel and is less sensitive to applying pre-stresses due to the volume reduction of 90° domain in materials.

1. 서 론

지구 온난화 및 고유가 지속 등 에너지 저감에 대한 사회적 요구가 증대됨에 따라 에너지 효율 향상에 대한 필요성이 점차 증대되고 있다. 특히, 전력부문의 CO_2 배출량이 전체 온실가스의 24%을 점유하기 때문에 변압기, 인버터, 전동기 등의 전기이용효율을 향상시킴으로써 전체 전력에너지 손실을 최소화 하려는 시스템적 에너지 효율향상에 연구가 진행되고 있다.

전력기기 중 대표적인 변압기는 철심소재를 고효율화 함으로써 변압기 자체부하로 인한 배전 손실을 감소시킴으로써 에너지 효율을 향상시킬 수 있다. 변압기의 철심소재로 사용하기 위해서는 보자력 (coercivity)이 낮고, 투자율 (permeability)을 높여 히스테리시스손실 (Hysteresis loss)을 감소시키고, 소재의 두께와 자벽의 이동거리를 감소시켜 와전류 손실 (Eddy current loss)을 감소시키는 것이 필요하다 [1]. 현재 변압기의 철심소재로 사용되고 있는 방향성전기강판은 1930년대 미국 Armco사의 N.P. Goss [2]에 의해 최초 개발 되었으며, 1968년 기존의 방향성전기강판 (CGO)에 비해 자속밀도가 높고 철손이 낮은 고배향성 방향성전기강판 (HGO)을 상업적으로 생산할 수 있게 되었다.

변압기의 사용 주파수 범위인 50~60 Hz 범위에서 전체 철손 중 와전류 손실이 차지하는 비중이 70 %에 이르기 때문에 방향성전기강판의 철손을 감소시키기 위해서는 와전류 손실을 감소시키는 것이 효과적이다. 본고에서는 일시자구미세화 기술의 기구와 POSCO 방향성전기강판의 와전류 손실 감소를 위한 일시자구미세화기술의 기술개발 현황 및 자성특성에 대해서 소개하고자 한다.

2. 본 론

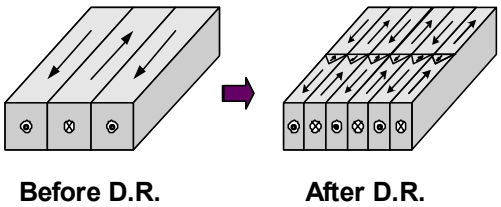
2.1 방향성전기강판의 일시자구미세화 기술

방향성전기강판의 자구미세화기술은 자구미세화 처리 시 열처리 후 철손감소 효과의 유지 유·무에 따라 영구 (Permanent Magnetic Domain Refinement) 및 일시자구미세화로 대별 할 수 있다. 열처리 후 철손감소 효과가 사라지는 일시자구미세화 기술은 1924년 Hayes Wolford [3]에 의해 전기강판 표면에 압연직각방향으로 스크렛치를 형성시킴으로써 철손이 향상된다는 연구결과를 보고한 후 1970년대 이후 활발히 연구가 진행되어 왔다.

방향성전기강판에서 일시자구미세화 기술에 의해 자구폭을 감소시키는 방법은 사용 에너지원에 따라 볼 스크렛치법 [4], 레이저조사법[5-7], 플라즈마법 [8] 등이 있다. 상기 자구미세화 방법은 자구미세화를 위한 사용 에너지원의 종류만 변경되었을 뿐 180° 자구를 미세화하여 자벽간격 ($2L$)을 감소시켜 자구의 이동거리를 감소시켜 와전류 손실을 감소시키는 기구는 1)과 2)식의 관계에서와 같이 동일하다 [5].

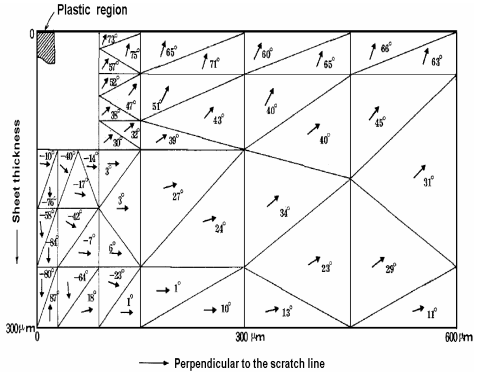
$$W_e = \frac{8.4t^2 2L}{\pi\rho}\left(\frac{B_m f}{C}\right)^2 \qquad \text{-------1)}$$

1)식에서 t, ρ와 $2L$은 각각 판의 두께, 시료의 저항과 자벽의 간격을 나타낸다. 그림 1은 자구미세화 전·후의 자구 형상의 변화를 도식적으로 나타내고 있다. 전기강판 표면에 스크렛치에 의한 홈이 형성되면 180° 자구 폭은 좁아지나 환류자구 (closure domain)가 생성되기 때문에 철손 개선 효과가 상쇄된다. 그러나 홈 형성시 압연방향으로의 인장응력이 부여되어 환류자구의 체적을 최소화 할 수 있기 때문에 180° 자구폭의 미세화에 의한 철손 개선 효과를 극대화 할 수 있다.



〈그림 1〉 자구미세화 전·후의 자구구조의 모식도

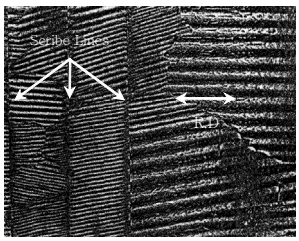
자구미세화 시 강판에 부여되는 인장응력 변화를 조사하기 위해 그림 2와 같이 직경 0.6 mm의 강구를 이용하여 깊이 0.9 μm 압흔을 강판 표면에 형성시킨 후 잔류응력의 분포를 유한요소법으로 계산하였다. 그림에서 홈 부위에서 거리가 멀어질수록 감소함을 알 수 있다. 표면 홈에서 판재 폭 방향으로는 인장응력이 인가되며 두께방향으로는 약한 압축응력이 나타나지만, 판의 내부 ($-45° < \alpha < 45°$)에서는 주로 인장응력이 작용함을 알 수 있다. 따라서 강판 표면에서 형성된 스크렛치에 의한 홈은 강판 내부에서 압연방향으로의 인장응력을 유기하기 때문에 180° 자구를 미세화 시키게 된다.



〈그림 2〉 볼 스크렛치에 의한 강판 단면방향에서의 주응력 변화 [9]

레이저조사법은 수십~수백 μm 크기의 집적된 레이저 빔을 강판에 조사함으로써 표면 조사부의 순간적인 증발과 산란과정에서 수천 기압의 충격파가 형성됨으로써 조사부에 국부적인 탄소성영역이 형성되게 된다. 방향성전기강판에 레이저 조사 시 탄소성영역의 조사부에서

{112}<111>과 {123}<111> 슬립계에서 변형이 발생하나 전위밀도가 낮고 탄소성영역이 좁기 때문에 열처리 시 재결정 (recrystallization)이 형성되지 않는다. 이러한 특성으로 가공 후 응력제거소둔 (stress relief annealing)을 하지 않는 적철심 변압기 소재에 주로 사용한다. 그림 3은 레이저 조사에 의한 전기강판의 자구변화를 나타내고 있다. 레이저 조사에 의해 압연방향으로 압축응력을 받기 때문에 [110]rhk [010] 방향으로 배열된 자구에 90° 환류자구를 형성시킴으로써 180° 자구를 미세화시킬 수 있다.



<그림 3> 레이저조사 후 전기강판의 자구구조[7]

2.2 레이저 자구미세화 효과

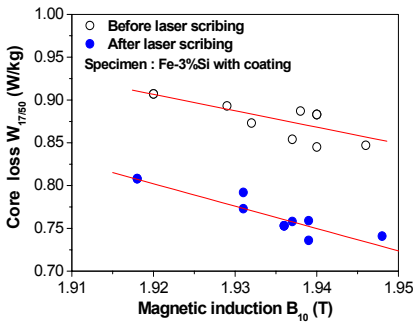
레이저 자구미세화법은 자기적에너지 관점에서 2)과 3)식의 관계에서 자구미세화처리 시 레이저 조사선에서 나타나는 90° 자구의 자기탄성에너지 (magnetoelastic energy, E_o)을 최소화 시키기 위해 180° 자구폭을 감소시켜 180° 자구미세화가 일어나게 된다.

$$E_{ms} + E_o + E_{dw} \leq 0 \qquad \text{-------2)}$$

$$KI^2 d - \frac{3}{2}\lambda_s \sigma(\cos^2\theta) + \frac{rl}{d} \leq 0 \qquad \text{-------3)}$$

E_{ms}, E_o와 E_{dw}는 각각 정자기 (magnetostatic energy), 자기탄성 및 자벽에너지 (domain wall energy)를 나타내며, I, d와 γ는 반자장 세기 (demagnetizing intensity), 자구폭 및 자벽의 표면에너지 (surface energy)을 나타낸다. 3)식에서 $\cos\theta$는 응력 방향과 자화용이축과의 방향코사인을 의미한다.

그림 4는 0.23 mm 방향성전기강판의 레이저조사 전·후의 철손과 자속밀도의 변화를 나타내고 있다. 철손은 레이저조사에 의해 13%의 철손 개선 효과를 나타내며, 레이저조사 전 강판의 자속밀도가 높을 때 자구미세화 효과를 극대화 할 수 있음을 알 수 있다.

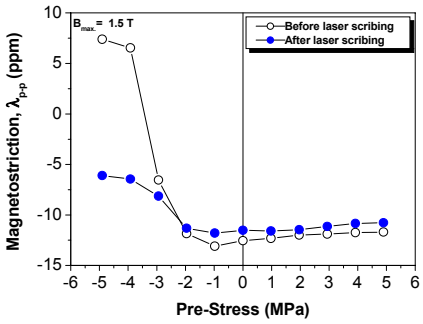


<그림 4> Fe-3%Si 방향성전기강판의 레이저조사 전·후의 철손과 자속밀도 변화

그림 4는 0.23 mm 방향성전기강판의 레이저조사 전·후의 자속밀도에 따른 철손의 변화를 나타내고 있다. 레이저조사 유·무에 관계없이 철손은 자속밀도에 비례해서 증가하기 때문에 자속밀도 증가에 따라 증가함을 알 수 있다. 레이저조사에 의한 자구미세화에 의해 철손은 동일 자속밀도에서 레이저처리 전의 철손보다 감소하며 자속밀도 증가에 따라 철손감소 효과가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

레이저조사에 의한 철손개선 이외의 개선효과로는 자기변형율 (magnetostriction)을 감소시킬 수 있다는 것이다. 자기변형율은 외부자장 인가 시 자구의 자발 자화벡테의 회전에 의한 시료의 치수변화율을 의미하는 것으로, 방향성전기강판의 변압기 적용 시 소음의 주요 요인으로 작용하게 된다. 소재측면에서 변압기의 소음특성을 이해하기 위해서는 자기변형율에 대한 이해가 필수적이다. 체심입방구조 철의 자화용이축은 <001>이고, 180°와 비 180° (90°) 자구로 구성되어 있기 때문에 180° 자벽의 이동은 자화의 방향만 반대일 뿐 시료의 치수에는 변화를 주지 못한다. 따라서 시료의 치수변화는 비 180° 자벽의 이동에 기인하게 된다.

그림 5는 0.23 mm 방향성전기강판의 레이저조사 전·후 외부 인가 응력 변화에 따른 자기변형율의 변화를 나타내고 있다. 레이저조사 유·무에 관계없이 자기변형율은 압축응력 증가에 따라 증가함을 알 수 있다. 이는 압축응력 인가 시 압축응력의 수직방향인 <001>로 90° 자구가 배열되기 때문에 임계 압축응력 값 이하에서는 압축응력값의 증가에 따라 자기변형율이 증가하게 된다. 압축응력구간에서 레이저조사 후 자기변형율이 레이저조사 전의 자기변형율보다 낮게 나타나는 것은 레이저에 의해 180° 자구미세화로 90° 자구의 부피가 감소하였기 때문이다.



<그림 5> Fe-3%Si 방향성전기강판의 레이저조사 전·후의 자기변형율 변화

3. 결 론

방향성전기강판의 자구미세화기구, 일시자구미세화방법 및 레이저자구미세화에 의한 철손 및 자기변형율 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 방향성전기강판의 일시자구미세화기술에 의한 180° 자구미세화는 외부의 기계적 및 열적 응력에 의해 형성된 국부적인 탄소성영역에서 자기탄성에너지를 최소화 시키기 위해 일어나게 된다.
(2) 방향성전기강판의 레이저조사에 의한 일시자구미세화기술은 180o자구미세화에 의해 와전류 손실을 감소시킴으로써 전체 철손을 감소시키며, 레이저조사 전 강판의 자속밀도가 증가 시 철손개선 효과를 극대화 할 수 있다.
(3) 방향성전기강판의 레이저에 의한 일시자구미세화는 180° 자구미세화에 의한 90° 자구의 전체 체적감소로 자기변형율을 감소시키며, 외부응력에 대한 자기변형율 민감도를 감소시킨다.

[참 고 문 헌]

[1] K. Foster and M. F. Littmann, "Factors affecting core losses in oriented electrical steels at moderate inductions", J. Appl. Phys., 57, 4203, 1985
[2] N. P. Goss, US Patent No. 1965559, 1934
[3] D. M. Hayes and D. S. Wolford, US Patent 2234968, 1924.
[4] T. Nozawa, T. Yamamoto, Y. Matsuo, and Y. Ohyo, "Relationship Between Total losses Under Tensile Stress in 3 Percent Si-Fe Single crystals and Their Orientations Near (110) [001]", IEEE Trans. Mag., 15, 252, 1978
[5] M. Imafuku, H. Suzuki, K. Akita, K. Iwata, and M. Fujikura, "Effects of laser irradiatiion on iron loss reductiion for Fe-3%Si grain-oriented silicon steel", Act. Mater., 29, 532, 1958
[6] T. Luchi, S. Yamaguchi, and T. Ichiyama, M. Nakamura, T. Ishimoto, and K. Kuroki, "Laser processing for reducing core loss of grain oriented silicon steel", J. Appl. Phys., 53, 2410, 1982
[7] R. F. Krause, G. C. Rauch, W. H. Kasner, and R. A. Miller, "Effect of laser scribing on the magnetic properties and domain structure of high-permeability 3%Si-Fe", J. Appl. Phys., 55, 2121, 1984
[8] K. Sato, M. Kurosawa, B. Fukuda, and T. Kan, "Investigation on the domain refining effect in grain-oriented silicon steel", J. Mag. Mag. Mater., 112, 183, 1992
[9] K. Fukawa and T. Yamamoto, "Domain Sturctures and Stress Distributions due to Ball-Point Scratching in 3% Si-Fe Single Crystals with Orientation near (110) [001]", IEEE Trans. Mag., MAG-18, 963, 1982