

Thema

# 고자속밀도 방향성 전기강판의 철손 향상 방법

## 1. 서론

차상윤 전문연구원  
(포스코 기술연구소)

권오열 책임연구원  
(포스코 기술연구소)

김재관 수석연구원  
(포스코 기술연구소)

전기수요와 에너지 가격 상승에 따른 대책으로 전자기 소자의 에너지 효율을 극대화 하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 전기기기 중 방향성 전기강판을 이용하여 가장 널리 이용되고 있는 변압기는 발전된 전기를 송전 또는 배전에 필요한 크기의 전압으로 변화시킴으로써 가정 및 산업설비에 공급하는 역할을 한다. 변압기에서 발생하는 전기적 손실은 철심을 감싸고 있는 동선에 의한 동손(Copper Loss)과 철심에 의한 철손(Copper Loss)으로 대별 할 수 있다. 동손은 전기적 손실 중 약 70~80%의 비중을 차지하지만 동선의 특성향상을 통해 개선시키기에는 어려운 점이 있다. 반면 철손은 철심을 구성하는 전기강판의 에너지 손실분으로 철심의 자성특성을 향상시킴으로써 철손 및 동선의 사용량 저감에 따른 동손 감소에 효과적인 방법으로 알려져 있다. 변압기의 철심재료로 주로 사용되는 방향성 전기강판은 1930년대 미국 Armco사의 N. P. Goss[1]에 의해 처음 개발되었으며, Armco社로부터 방향성 전기강판의 제조기술을 도입

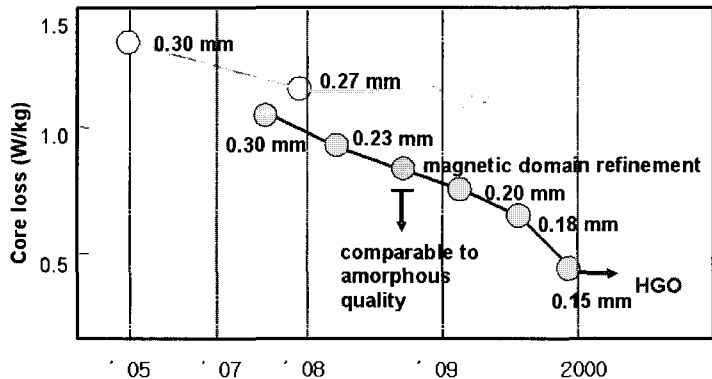


그림 1. The change of development for grain-oriented electrical steel products.

한 신일본제철(NSC)은 기존의 방향성 전기강판(CGO)에 비하여 자속밀도도 높고 철손도 매우 낮은 고투자율 방향성 전기강판(HGO)의 개발에 성공하였으며[2-3], 1968년부터 'Hi-B'라는 상품명으로 생산하기 시작하였다.

그림 1은 방향성 전기강판의 세계적 철손추이를 나타내고 있다. 방향성 전기강판은 (110)[001]방위 즉, 결정립들의 자화용이축인 [001]방향이 압연방향에, (110)면이 압연면에 평행한 이상적인 집합조직(Goss texture)을 갖는 재료로서 압연방향으로의 자성특성이 극히 우수하다. 이중 결정 배향도에 있어서 [001]방향이 압연방향에 대해 CGO의 경우 약  $\pm 7^\circ$ , HGO의 경우  $\pm 3^\circ$  범위내로 차이가 나는 두가지 제품으로 크게 구분된다. CGO의 경우 두께가 0.35~0.27 mm까지 주로 있으며, HGO의 경우 0.35~0.23 mm 제품이 주로 상업화 되어 있으며, 특수 용도로서 0.15 mm까지 개발이 되어 있으나, 현재 용도는 극히 한정적이다. HGO 0.23 mm 두께재의 경우 자구미세화를 통하여 철손을 10% 정도 감소시킬 수 있으며, 이를 이용하여 만든 자구미세화 변압기는 아몰퍼스 변압기와 경쟁 가능한 제품이며, "저소음 고효율 변압기"라는 이름으로 이미 시중에 나와 있다.

표 1은 방향성 전기강판의 철손 종류와 철손에 영

표 1. Material factors on core loss of electrical steel.

Type of core loss	Important factor	Improvement method	Remark
Hysteresis Loss	Crystal orientation	Degree of orientation (110)[001]	Restricted
	Impurity	-	Restricted
	Strain	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Tension coating</li> <li>■ Heat treatment</li> </ul>	Restricted
	Surface	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Reduction of Roughness</li> </ul>	To be
Eddy Current Loss	Sheet thickness	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Decrease of thickness</li> </ul>	To be
	Resistivity	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Si content</li> </ul>	To be
	Domain wall spacing (domain control)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Grain size</li> <li>■ Surface coating</li> <li>■ Domain refinement</li> </ul>	To be

향을 미치는 인자들을 정리한 것이다. 철손은 이력손실(Hysteresis Loss,  $W_h$ )과 와전류 손실(Eddy Current Loss,  $W_e$ )로 구분 할 수 있다[2]. 와전류 손실은 강판내 규소함량 변화에 의한 저항변화, 강판의 두께 등에 영향을 받는 고전적 의미의 와전류 손실(Classical Eddy Current Loss,  $W_{ec}$ )과 자구(Magnetic Domain) 크기와 성질에 의한 이상손실(Anomalous Loss,  $W_a$ )로 나누어서 설명되어 왔으나, 이후 와전류 손실의 구성손실인자가 자구의 거동에 의해 발생되는 것으로 알려졌으며, 이로 설명되고 있다. 이력손실을 줄이기 위하여는 Goss Texture로의 결정배향성을 향상시키고, 불순물을 줄이고, 전기강판을 압연방향으로 장력을 가하거나, 열처리를 통하여 불필요한 응력을 제거하는 것 및 표면조도를 매끈하게 가져가는 것 등이 있다. 와전류 손실을 줄이기 위하여는 두께감소, Si첨가량을 증대시키거나, 결정립 크기를 줄이거나, 압연방향으로의 장력을 크게 하거나, 자구의 폭을 미세화시키는 방법들이 있다. 변압기에서 사용되는 사용주파수대인 50~60 Hz에서 전체 철손중 와전류 손실이 차지하는 비중이 약 70%에 이르기 때문에 방향성 전기강판의 철손을 감소시키기 위해서는 이력손실보다 와전류 손실을 감소시키는 것이 보다 효과적이라고 알려져 있다. 따라서 본 고에서는 자구거동이 와전류에 미치는 영향을 이해하고, 고투자율 방향성 전기강판에서 와전류 손실을 저감시키는 방법과 각 방법이 갖는 특징과 기구에 대해 살펴보고자 한다.

## 2. 와전류 손실에 미치는 자구의 영향

폭이 무한한 판상의 시편에  $180^\circ$  자벽을 갖는 자구가 평행하게 배열되어 있고 자벽은 동일한 속도로 움직이며 자벽간의 상호작용이 없다고 가정하면 와전류 손실은 식(1)으로 표현할 수 있다.

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

식에서  $t, \rho$ 와  $2L$ 은 각각 판의 두께, 비저항과 자벽의 간격을 나타낸다. 즉, 전기강판의 두께가 얇아질수록, 비저항이 증가할수록 또한  $180^\circ$  자벽의 간

격이 좁아질수록 와전류 손실은 감소함을 알 수 있다[3]. Kittel은 180° 자구폭에 미치는 결정 배향도와 자벽에너지의 상관관계를 식(2)으로 나타내었다[4].

$$2L = \left( \frac{\sigma_w t}{1.7 M_s^2 \left[ \frac{1}{1 + \mu^*} \right]} \right)^{1/2} \frac{1}{\sin \beta} \quad (2)$$

$\alpha_w M_s$ 와  $\mu^*$ 는 각각 자벽 에너지, 포화 자화값 및 자구의 유효 투자율을 나타내며,  $\beta$ 는 결정방위의 이탈도로 나타내고 있다. 또한 자구의 유효 투자율은 결정자기 이방성 에너지(Magnetocrystalline Anisotropy Energy)에 반비례한다. 식 (2)에서 <001>결정방위에 대한 압연방위의 이탈도가 증가함에 따라 자구폭은 감소하고 식 (1)에 의해 와전류 손실은 감소하는 것으로 나타나지만, 그림 2에서와 같이 결정방위의 이탈도가 증가하면 유도자속밀도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 이탈도가 클수록 환류자구(Closure Domain)가 증가하기 때문이다.

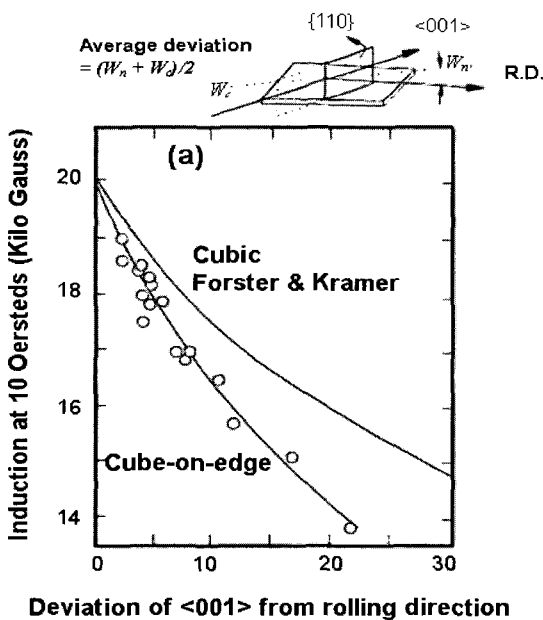


그림 2 (a) Relation of deviation from ideal orientation with magnetic induction for 3.15 %Si-Fe [5].

그림에서 Cube-on-edge는 (110)[001], Cubic은 (100)[001] 결정배향성을 갖는 구조를 말한다. 통상의 방향성 제품은 모두 Cube-on-edge를 가지며, 유도자속밀도에 미치는 이탈도의 영향이 Cubic에 비하여 더욱 급격함을 알 수 있다[5].

### 3. 기계적 및 열적 에너지에 의한 자구 미세화

1924년 Hayes Wolford[6]는 전기강판표면에 자화방향에 대해 90° 방향으로 스크래치를 형성시킴으로써 철손이 향상된다는 것을 최초로 발견하였다. 이는 전기강판 표면에 국부적인 응력 인가에 의해 형성된 국부적인 변형이 자구의 불연속대로 작용함으로써 결정입계와 같이 자구의 폭을 줄였기 때문이다[6-8]. 방향성 전기강판에서 결정 배향성(110)[001]을 열화시키지 않으면서 2차 재결정 내부의 자구폭을 인위적인 방법으로 좁게 만들어 철손을 낮추는 연구는 1970년대 이후 활발히 진행되어 왔다.

전기강판의 자구폭을 좁게 형성시키기 위한 방법으로는 볼 스크래치법[7], 레이저 조사법 [9-10], 플라즈마 이용법[11-12] 등이 있다. 이들 자구미세화 방법들은 자구미세화를 위한 외부에너지의 형태만 변경되었을 뿐 180° 자구를 미세화 함으로써 자벽간

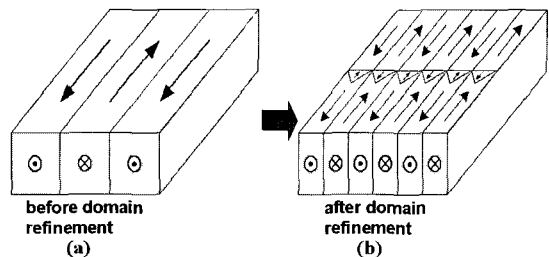


그림 3. Schematic diagram showing change of domain structure before (a) and after domain refinement (b).

격을 좁혀 자구의 이동거리를 감소시킴에 따라 철손을 개선시키는 기구 (Mechanism)는 동일하다. 그림 3에 자구미세화 전(a)후(b)의 자구형상을 도식적으로 나타내었다. 일반적으로 전기강판에 스크래치가 도입되면 180° 자구폭은 좁아지나 환류자구의 생성 때문에 철손감소 효과가 일부 상쇄된다. 여기에 압연방향으로 인장응력을 부여하면 환류자구가 소멸되면서 자구폭의 미세화에 의한 철손의 개선효과를 극대화 할 수 있다. 자구미세화법에서는 기계적 응력에 의한 자구미세화법인 볼 스크래치법과 열적에너지에 의한 레이저 조사법에 대하여 살펴보기로 하겠다.

3.1 볼(Ball) 스크래치법에 의한 자구미세화법

기계적 응력을 인가함으로써 강판 표면에 스크래치를 형성시키는 볼 스크래치법은 Steel Wire Brush, Scriber, Ball Pencil 등을 이용할 수 있으며, 공업적으로는 Steel Bearing, Ball Units Traverse Stationary Strip[13] 등이 이용되기도 한다. 그림 4는 결정방위 이탈각( $\beta$ )와 주자구(180° 자구) 폭의 관계를 나타내었으며, 이로인한 환류자구(Closure Domain)의 분율과 철손을 나타내었다[7]. 주자구 폭은 이탈각이 2° 정도까지 급격히 감소하다가 2° 이상에서는 감소율이 조금씩 진행된다. 철손이 2° 부근까지 감소하는 것은 주자구 폭의 감소(자구미세화)와 비례하며, 그 이상에서의 철손의 증가는 환류자구의 증가에 기인한다.

그림 5에서는 Fukawa 등[14]이 직경 0.6 mm의 강구(예로 볼펜)를 이용하여 깊이 0.9  $\mu\text{m}$ 까지 압입하여 연속적인 스크래치를 형성 시 강판에 형성되는 잔류응력의 분포를 FEM법을 이용하여 계산결과를 도식적으로 나타내었다. 그림에서 화살표는 주응력 중 가장 큰 응력값 ( $\sigma_1$ )을 나타낸 것이다. 잔류응력은

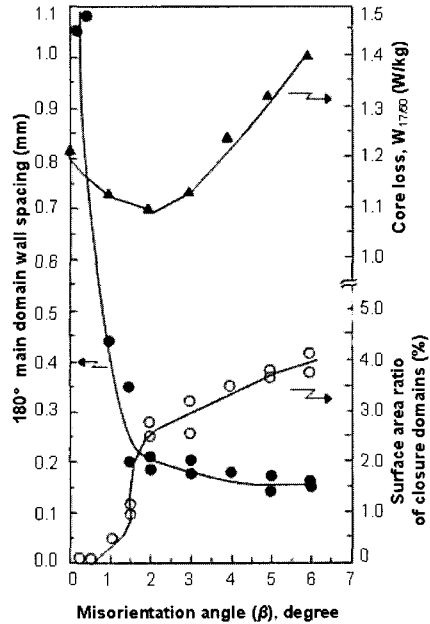


그림 4. Effects of  $\beta$  on main domain and closure domain of 3 %Si-Fe single crystal with orientation near (110)[001].

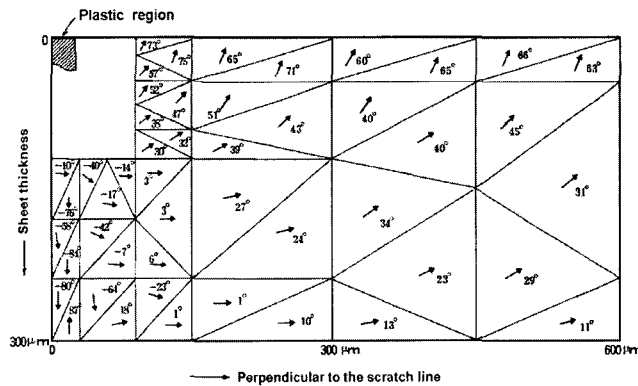


그림 5. Direction of principal stress  $\sigma_1$  due to ball-point scratching.

스크래치 부위에서 거리가 멀어질수록 지속적으로 감소한다. 스크래치가 형성된 표면부위는 판의 두께 방향으로 인장응력이 인가되며, 스크래치가 형성된 표면직하는 압축응력이 나타나지만 판의 내부 ( $-45^\circ < \alpha < 45^\circ$ )에서는 주로 압연방향으로 인장응력이 작용함을 알 수 있다. 따라서 강판표면에서 형성된 스크래치는 강판 내부에서 압연방향으로 인장응력을 유발하며 이러한 인장응력에 의해  $180^\circ$  자구의 미세화를 유발시키게 된다. 그러나 스크래치에 의해 유기된 인장응력은 스크래치를 중심으로 짧은 거리 범위 내에서 나타나기에 어떻게 길이가 수 mm 내지 수십 mm의 자구를 미세화 시키게 되는지에 대하여 정량적으로 명확하게 해석하지는 못하고 있다.

### 3.2 레이저에 의한 자구 미세화법

레이저에 의한 자구미세화는 기구적으로는 불펜에 의한 자구미세화법과 동일하다. 레이저 자구미세화법은 수십~수백  $\mu\text{m}$  크기의 집속된 레이저 빔을 강판에 조사함으로써 표면에서의 순간적인 증발과 산란과정에서 수천기압의 충격파가 형성됨으로써 조사부위에 부분적인 탄소성영역이 형성된다 [15]. 레이저에 의한 자구변화는 현상학적으로 기계적 압입법의 경우와 동일하나 변형기구는 다소 차이가 있다. 레이저조사에 의한 변형은 방향성 전기강판의 주슬립계인  $\{110\}\langle 111 \rangle$ 과 고온에서 일어나는 슬립계인  $\{112\}\langle 111 \rangle$ ,  $\{123\}\langle 111 \rangle$ 의 변형이 일어나며, 전위밀도가 낮아 기계적 변형과는 달리 재결정이 일어나지 않는다. 그림 6은 시편의 좌측 반은 레이저 조사를 하고 나머지 우측 반은 하지 않은 상태에서의 자구폭을 Bitter Pattern법을 이용하여 관찰한 자구사진이다. 레이저 조사부위는 미세화되었으며, 하지 않은 부분에서는 자구폭이 넓은 상태 그대로이다 [9].

그림 7은 레이저 조사패턴(a)과 레이저 조사에 의한 입사에너지와 철손의 상관관계(b)를 나타내고 있다 [10]. 레이저 입사에너지가 증가함에 따라 철손은 개선되나 임계에너지(3 mJ/pulse) 이상에서는 점차 증가한다. 레이저 입사에너지가 3 mJ/pulse 이상에서 자구미세화 효과에도 불구하고 철손이 증가하는 것은 레이저 입사에너지 증가에 의한 소성변형량 증

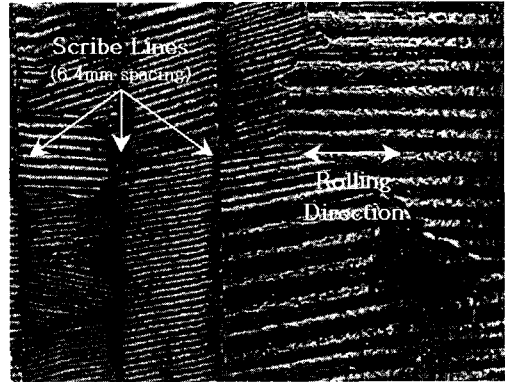
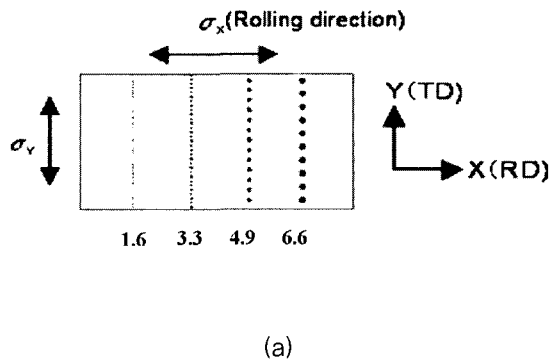
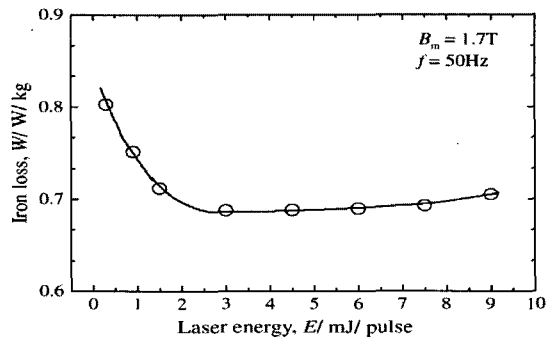


그림 6. Domain pattern of scribed strip showing the domain refinement produced by laser scribing.



(a)



(b)

그림 7. Pattern of surface layer (a) and effect of core loss (b) by laser irradiation.

가로 자벽의 이동을 방해하는 요소가 많아지기 때문이다.

상기의 자구미세화법에 대해 두 가지 경우에 대해 조사하였다. 스크렛치법의 효과는 자기탄성효과(Magnetoelastic Effect)에 기인하여 기계적 및 레이저방법으로 강판에 주어진 탄성응력은 후열처리 공정에서 소실되어 자구미세화 효과가 사라진다. 이러한 특성으로 가공 후 응력제거소둔(Stress Relief Annealing, SRA) 처리를 하지 않는 적철심 변압기(반대로 가공 후 반드시 열처리공정을 해야만 하는 것은 권철심 변압기임) 소재에 사용이 한정되어 있다.

#### 4. 전기강판의 두께 감소

전기강판의 와전류 손실은 식 (1)에 의해 강판 두께의 제곱에 비례하여 감소되기 때문에 강판의 두께를 줄여 철손을 개선하기 위한 연구가 진행되고 있다. 그림 8은 방향성 전기강판을 이용하여 강판의 두께와 철손과의 관계를 나타낸 것이다 [16]. 그림에서

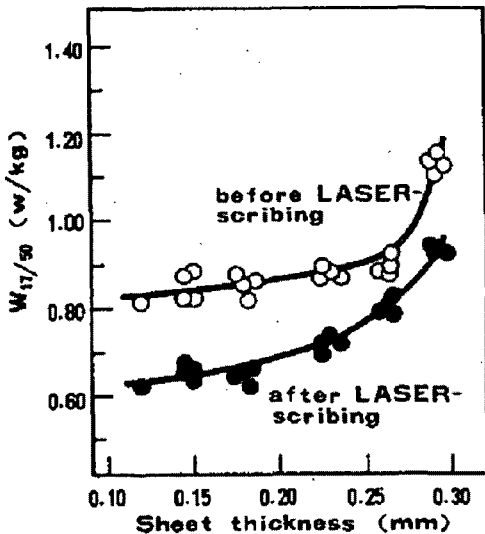


그림 8. Effect of thickness on core loss of commercial grain-oriented silicon steel chemically polished to various thicknesses.

와 같이 두께가 감소함에 따라 철손이 감소함을 알 수 있다. 그러나 전기강판의 두께 감소에 비례해서 철손의 개선효과를 계속적으로 얻을 수는 없다. 이는 임계두께 이하로 두께감소에 따라 2차 재결정과정에서 (110)[001] 방위로 결정립을 배향시키는 것이 어렵기 때문이다. 즉, 강판의 두께가 얇아질수록 재결정립 성장억제제 (Inhibitor, (110)[001] 방위로 결정립을 선택적으로 성장시키며 타 방위의 성장을 억제하는 것으로 미세한 석출물과 입계편석물에 의해 나타남)의 표면/결정립 체적비가 커짐으로 성장억제제의 결정성장 억제효과가 감소되기 때문이다.

Arai 등[17]은 고자속밀도 방향성 전기강판의 2차 재결정 소둔판을 이용하여 표면 코팅층과 Glass 피막층을 제거하여 다시 압연한 후 고진공에서 소둔(3차 재결정)을 거쳐 0.075 mm의 두께에서 측정된 철손(W<sub>17/50</sub>)이 0.42 W/kg로 나타남을 보고하고 있다. 그러나 이러한 결과는 취성이 강한 2차 재결정 소둔판을 수~수십  $\mu$ m 까지 안정적으로 압연을 해야 하며, 고진공의 분위기를 유지 해야하는 어려움이 남아있다. 0.1 mm 이하 두께의 방향성 전기강판의 용도는 통상의 방향성 전기강판의 용도와는 달리 레이저발전용 Trigger Transformer 및 고주파 Switching Regulator 등과 같은 고주파용 기기에서 주로 사용될 전망이다.

#### 5. 결정립의 크기와 장력 코팅

일반적으로 결정립이 작아지면 각 결정립에서 발생하는 와전류 손실이 줄어든다[18]. Littmann[5]은 철손이 최소가 되는 방향성 전기강판의 결정입도가 1 mm 정도라고 했다. 그러나 실제 강판의 결정립 크기(최근 방향성 전기강판의 평균 결정 입도는 15~20 mm입)는 결정방위의 집적도 향상과 강중 자기시효에 영향을 미치는 불순물 원소의 양을 감소시키기 위해 1200 °C 부근에서 장시간 열처리를 하게 되기에 불가피하게 결정립이 커지게 되어 와전류 손실이 높게 나타난다. 그림 9는 강판의 두께별 결정립 크기에 따른 철손을 나타내었으며, 강판의 두께가 얇고 결정립이 작을수록(ASTM NO.가 클 수록) 철손이 감소함을 알 수 있다.

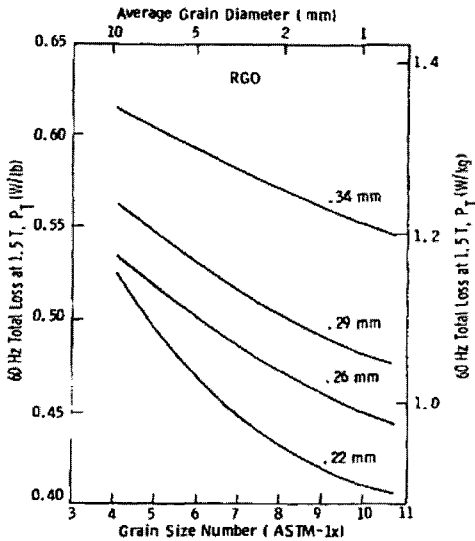


그림 9. Effect of grain size on total loss Pt at 1.5T of 0.22 to 0.34mm thick regular grain oriented.

방향성 전기강판은 변압기 철심 사용시 와전류 손실을 억제하기 위해 최종 2차 재결정이 완료된 강판을 가지고, Colloid상의 Silica 분말을 첨가하여 강판의 표면에 도포하여 건조시킴으로 장력을 부여하는 장력코팅층을 형성시켜 준다. 장력코팅 피막은 열팽창 계수가 소지강판에 비하여 적기 때문에 강판에는 장력이 발생되어 자구를 미세화 시키게 되고 이로 철손을 시키게 된다.

Graham 등[19]은 방향성 규소강판의 자구벽은 안정된 상태에서 압연면과 58°를 이루나 압연 방향으로 장력이 걸리면 그 경사각도가 압연면에 수직되게 자구벽이 움직이기에 자구벽의 면적이 적어질 것임을 주장하였고, 한편 장력이 증가하면 자구폭이 적어지므로 자구폭의 변화와 자구벽의 면적 변화가 조합으로 작용하여 와전류 손실의 변화와 연결 되어진다고 보고하고 있다.

## 6. 결론

전자유도에 근거한 전력변화 시스템의 철심소자

는 고자속밀도에서 저철손 특성을 요구한다. 철심의 와전류 손실은 야금학적으로는 강판의 두께감소, Si 함량증대 및 결정입도의 감소 등의 방법을 통하여 180° 자벽 간격을 감소시킴으로 가능하다. 그러나 이들 요소 사이에서 방향성 전기강판의 집합조직 방위에 미치는 상반되는 특성 때문에 현재의 기술적 수준에서는 거의 한계에 도달했다. 따라서 전술한 야금학적 방법에 반한 물리적 방법(볼 스크래치 및 레이저 자구미세화법)에 의한 자구미세화법으로 와전류 손실을 감소시키는 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 물리적 방법에 의한 자구미세화법은 응력제거소둔에 의해 자구미세화 효과가 사라져 버리기 때문에 응용 용도가 한정되어 있다. 따라서 향후 방향성 전기강판의 철손 감소를 위해서는 결정 배향성 향상, 고구소화, 경면화 및 응력제거 후에도 자구미세화 효과가 잔존하는 자구미세화기술 개발 등 철손 감소 효과를 나타내는 기술개발에 지금 방향성 전기강판 제조사의 연구원들이 노력하고 있다.

## 참고 문헌

- [1] N. P. Goss : U.S. Patent 1965559, 1934.
- [2] E. T. Stepenson, "Separation of losses in low-alloy, nonoriented electrical steels", J. Appl. Phys., Vol. 57, p. 4226, 1985.
- [3] R. H. Pry and C. P. Bean, "Calculation of the energy loss in magnetic sheet materials using a domain model", J. Appl. Phys., Vol. 29, p. 532, 1958.
- [4] C. Kittel, "Physical theory of ferromagnetic domains", Rev. Mod. Phys., Vol. 21, p. 541, 1966.
- [5] M. F. Littman, "Structures and magnetic properties of grain-oriented 3.2 % silicon-steel", J. Appl. Phys., Vol. 38, p. 1104, 1967.
- [6] D. M. Hayes and D. S. Wolford : U. S. Patent 2234968, 1924.
- [7] T. Nozawa, T. Yamamoto, Y. Matsuo, and Y. Ohyo, "Effect of scratching on losses in 3-percent Si-Fe single crystal with orientation near (110) [001]", IEEE Trans. Magn., Vol. 15, p. 972, 1979.
- [8] T. Nozawa, Y. Matsuo, H. Kobayashi, K. Iwayama, and N. Takahashi, "Magnetic properties and domain structures in domain refined grain-

oriented silicon steel", J. Appl. Phys., Vol. 63, p. 2966, 1988.

[9] 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., Vol. 55, p. 2121, 1984.

[10] M. Imafuku, H. Suzuki, K. Akita, K. Iwata, and M. Fujikura, "Effects of laser irradiation on iron loss reduction for Fe-3 %Si grain-oriented silicon steel", Acta Mater., Vol. 53, p. 939, 2005.

[11] K. Sato, M. Kurosawa, B. Fukuda, and T. Kan, "Investigation on the domain refining effect in grain-oriented silicon steel", J. Magn. Magn. Mater., Vol. 112, p. 183, 1992.

[12] K. Sato, A. Honda, K. Nakano, M. Ishida, B. Fukuda, and T. Kan, "Development of domain refined grain-oriented silicon steel by grooving", J. Appl. Phys., Vol. 73, p. 6609, 1993.

[13] D. Snell and P. Beckley, "Domain refinement of high-permeability grain-oriented electrical steel using low-friction ball units", J. Magn. Magn. Mater., Vol. 133, p. 167, 1994.

[14] K. Fukawa and T. Yamamoto, "Domain structures and stress distributions due to ball-point scratching in 3 %Si-Fe single crystals with orientation near (110)[001]", IEEE Trans. Magn., Vol. MAG-18, p. 963, 1982.

[15] A. H. Clauer, B. P. Fairland, and B. A. Wilcox, Metall. Trans., Vol. 8A, p. , 1977.

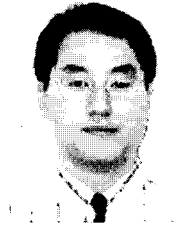
[16] I. Ichijima, M. Nakamura, T. Nozawa, and T. Nakata, "Improvement of magnetic properties in thinner Hi-B with domain-refinement", IEEE Trans. Magn., Vol. MAG-20, p. 1557, 1984.

[17] K. I. Arai, 日本電氣學會 Magnetics 磁性會資料, MAG-88-74, 1988.

[18] K. Foster and M. F. Littmann, "Factors affecting core losses in oriented electrical steels at moderate induction", J. Appl. Phys., Vol. 57, p. 4203, 1985.

[19] C. D. Graham and P. W. Neurath, "Domain wall orientations in silicon-iron crystal", J. Appl. Phys., Vol. 28, p. 888, 1957.

저자약력



성명 : 차상운

- ◆ 학력
- 1987년 부산대 물리학과 이학사
- 1989년 부산대 대학원 금속공학과 공학석사
- 2005년 부산대 대학원 금속공학과 공학박사

- ◆ 경력
- 1989년 - 1994년 포항 산업과학기술연구소 연구원
- 1994년 - 현재 포스코 기술연구소 전문연구원



성명 : 권오열

- ◆ 학력
- 1990년 안동대 재료공학과 공학사
- 1996년 경북대 대학원 금속공학과 공학석사
- 2007년 한국과학기술원 신소재공학과 공학박사

- ◆ 경력
- 1996년 - 2002년 현대제철 기술연구소 연구원
- 2007년 - 현재 포스코 기술연구소 전문연구원



성명 : 김재관

- ◆ 학력
- 1979년 부산대 금속공학과 공학사
- 1981년 부산대 대학원 금속공학과 공학석사
- 1990년 일본 동북대 재료물성학과 공학박사

- ◆ 경력
- 1982년 - 1990년 포스코 기술연구소 연구원
- 1990년 - 1994년 포항 산업과학기술연구소 책임연구원
- 1994년 - 1997년 포스코 일본동경연구소 책임연구원
- 1997년 - 현재 포스코 기술연구소 수석연구원