

냉간가공도가 극박 3%규소강판의 유도자화 특성에 미치는 효과

정진성, 김두수, 신재호, 허남희

한전 전력연구원

Effect of Cold Rolling Reduction on Magnetic Induction of Thin-Gauged 3%Si-Fe Strip

J.S.Jung, D.S.Kim, J.H.Shin, N.H.Heo
Korea Electric Power Research Institute

서 론

현재 변압기 철심 재료는 주로 방향성 전기 강판이 사용되고 있으며, 우수한 자기유도 특성과 낮은 철손이 중요한 요건이다. 방향성 전기강판은 약 3%Si를 함유하며 2차 재결정에 의해 {100}<001> Gross texture로 배향된다. 극박 3%Si-Fe의 2차 재결정에 미치는 냉간 압연율의 효과에 대한 연구결과 보고는 거의 없다. 본 연구의 목적은 다단 냉간압연에 의해 제조되는 박판 3%Si-Fe strip의 자기유도에 미치는 최종 냉간 압연율의 효과를 밝히는 것이다.

실 험

3%Si-Fe 합금은 진공유도용해로를 사용하여 제조되었으며, 합금의 조성은 표 1과 같다. 잉곳트는 1200℃에서 1시간 유지후 2~2.5 mm두께의 판으로 열간 압연하였다. 판들은 냉간 압연하기 전에 30분동안 800℃에서 예비소둔하였으며 1차, 2차, 3차 냉간압연율 통해 0.1~0.15mm 두께의 판으로 최종 압연하였다. 냉간 압연 공정은 표 2에 상세하게 나타내었다. 1, 2차 냉간압연후에는 중간 소둔을 800℃에서 30분동안 하였고, 최종 열처리는 1200℃에서 하였다. 모든 열처리는 약 10^{-6} torr에서 행해졌다. 그림 1은 최종 열처리 시간에 따른 가장 큰 결정립 크기의 변화를 보여준다. 0.06 ks 동안의 최종 열처리시 초기단계에서의 결정립 크기는 0.2~0.3 μm의 범위를 갖으며, 3차 냉간 압연보다는 1차(single-stage) 냉간압연한 시편에 있어서 결정립 크기가 더 작다. 그러나 열처리 시간이 길어지면 양상은 반대가 된다. 1차 냉간압연에서의 보다 작은 결정립 크기는 상대적으로 심한 냉간가공에 기인한다. 그림 1로부터 얻은 결정립 성장속도를 그림 2에 나타내었다. 최종 열처리의 초기단계에서 1차 냉간압연판의 성장속도는 3차

(triple-stage) 냉간압연판보다 3~5배 빠르다. 최종 열처리 시간이 증가함에 따라 성장속도는 감소하며 결정립 크기의 증가로 인해 성장속도의 차이는 점차 작아진다.

Table 1. The chemical composition of the 3%Si-Fe alloy. (wt.%)

C	Si	Mn	S	N
0.003	2.92	<0.001	0.0006	0.001

Table 2. Details of cold rolling process.

Cold rolling process	Hot band thickness (mm)	Reduction Ratio (%)	Final thickness (mm)
Single-stage	1.9	92	0.15
Double-stage	1.9	80-60	0.15
Triple-stage	2.0	75-50-60	0.10

{100}결정립은 H₂S 분위기하에서 가장 작은 표면 자유에너지를 갖기 때문에 선택적으로 성장하며 또한 성장 구동력은 {100}면과 다른 면들과의 표면 자유에너지 차이이다.¹⁻³ 1차 결정립 성장은 판 전체에 걸쳐 일어나며 판 두께의 1~2배가 될 때까지 계속된다. 판의 2차 결정립 선형 성장 속도 G는,

$$G = M \left(\frac{\gamma_B}{r} + \frac{2\Delta\gamma_s}{t} + C \right) \quad (1)$$

여기서,

M : 결정립계 이동도

γ_B : 결정립계 자유 에너지

r : 평균 일차 결정립 반지름

$2\Delta\gamma_s$: {100}면과 다른 방위의 면 사이의 표면 자유에너지차

t : 판 두께

C : 석출물에 의해 마이너스 구동력으로 작용하는 항

로 주어진다.

현 연구에서 사용된 합금에 포함된 불순물의 양은 무시할 정도의 양이기 때문에 Zener항 C는 무시할 수 있다. γ_B/r 항은 결정립계 구동력이며, $2\Delta\gamma_s/t$ 항은 표면자유에너지 차로 인한 추가적인 구동력이다. 표면 자유에너지 항 $2\Delta\gamma_s/t$ 는 $\Delta\gamma_s/\gamma_B$ 가 약 0.03이기 때문에 성장속도에는 주로 γ_B/r 항이 영향을 미친다. 즉, 성장속도는 주로 1차 결정립 크기에 의해 좌우되며 결과적으로 결정립계 에너지에 의해 좌우되며, 표면 자유에너지 차는 성장할 결정립을 결정할 뿐 성장속도의 제어 인자는 아니다. 그림 2에서 보는 바와 같이 초기 열처리 단계에서 1차 냉연판의 보다 빠른 성장속도는 상대적으로 작은 1차 결정립크기에 기인하며, 성장속도는 1차 결정립 크기가 증가함에 따라 감소한다. 냉연공정과 최종 열처리 시간에 따른 면밀도의 변화들을 에치-핏(etch-pit) 방법으로 대략 측정하여 표. 3에 나타내었다. 스트립들은 냉연 방법과 열처리 시간에 따라 면밀도에 상당한 차이를 보였다.

첫째, 압연율이 92%인 1차 냉연 스트립은 3분동안의 최종 열처리후에 90%의 $\{100\}<110>$ 결정립들과 미량의 $\{110\}<001>$ 과 $\{111\}<112>$ 결정립을 나타내었고, 열처리 시간의 증가에 따라, $\{100\}<001>$ 결정립들은 완전히 사라지고, $\{100\}<110>$ 결정립들의 면밀도는 약간 증가하였다. 둘째, 최종 냉연 압연율이 60%인 2차 또는 3차 냉연 스트립은 3분동안의 최종 열처리후에 50~65%의 $\{100\}<110>$ 결정립들과 30~40%의 $\{110\}<001>$ 결정립으로 구성되었고, 면밀도들은 1.2 ks까지 거의 변화가 없었으나, 7.2 ks 후에는 $\{110\}<001>$ 결정립들만이 관찰된다. 결국, 최종 냉간 변형이 심할수록 최종 열처리 초기 단계에서 $\{100\}<110>$ 결정립들의 생성경향이 더 강해진다.

그림 3에서 보는 바와 같이, 0.18 ks의 최종 열처리 시간까지는 편석 속도가 증발속도보다 빠르기 때문에 황이 스트립 표면에 누적되나, 그 이후에는 증발에 의한 황의 고갈 영역이 형성되면서, 상대적으로 편석 속도보다는 증발 속도가 빠르게 되기 때문에 황의 표면 편석량이 감소하여 1.2 ks 후에는 편석된 황은 표면에서 관찰되지 않는다. 증발에 영향을 받는 황의 편석거동은 Fe-Sn계에 있어서의 Sn의 편석거동을 수식화한 연구⁴에 의해서 해석될 수 있으며, 수식화된 식을 아래에 제시한다.

$$\frac{X_s(t) - X_s(0)}{X_s(\infty) - X_s(0)} = \frac{1}{E+1} \exp\left(-\frac{EDt}{\beta^2 f^2}\right) \left[1 - \exp\left(\frac{(E+1)Dt}{\beta^2 f^2}\right) \times \operatorname{erfc}\left(\frac{Dt}{\beta^2 f^2}\right)^{1/2} - (E)^{1/2} \operatorname{erf}\left(-\frac{EDt}{\beta^2 f^2}\right)^{1/2} \right] \quad (2)$$

여기서,

$X_b(0), X_b(t), X_b(\infty)$: 0, t, ∞ 시간에서의 입계편석 농도

β : enrichment ratio

t : 시간

D : 용질의 확산계수

f : 4 (입계편석), 1(표면편석)

E : 증발속도에 관계되는 무차원 변수

이다.

다른 연구결과²⁵에 의하면, {100} 결정립들은 다른 결정립들을 소비하면서 1.2 ks의 열처리시간까지 성장해야 한다. 그러나, 그림 1과 표 3에서 보듯이 1.2 ks까지

Table 3. Changes in planar density with cold rolling process and annealing time at 1200°C.

	0.18(ks)	1.20(ks)	7.2(ks)
Single-stage	~ 90% {100}<110> trace {110}<001> + {111}<112>	~95% {100}<110> trace {111}<112>	~ 95% {100}<110> trace {111}<112>
Double-stage	~ 65% {100}<110> ~ 30% {110}<001> trace {111}<112>	~ 70% {100}<110> ~ 30% {110}<001>	~ 100% {110}<001>
Triple-stage	50~60% {100}<110> 30~40% {110}<001> trace {111}<112>	~ 60% {100}<110> ~ 40% {110}<001>	~ 100% {110}<001>

면밀도는 거의 변화가 없지만 결정립 크기는 0.06 ks 후의 결정립 크기보다 5~15배 정도 크다. 에치 핏결과로부터 0.18 ks까지 최종 열처리된 스트립내의 {100}면들은 압연 방향으로 배향되어 있기 보다는 사실상 결정립면과 냉간압연방

향 및 냉간압연면은 3차원적으로 틀어져 있다. 이것은 {100} 결정립들사이에서 표면 자유에너지의 차이를 만들어 가장 낮은 표면 자유에너지를 갖는 결정립만이 성장한다. 그러므로 표 3에서 보듯이 {100}결정립의 면밀도 변화는 거의 없음에도 불구하고 1.2 ks 까지 결정립성장이 가능하다. 그림 4는 1200℃에서 최종 열처리 시간에 따르는 극박 3%규소강판의 유도자화 값을 나타낸 것이다. 유도자화값은 열처리 시간에 따라 증가하였으며 14.4 ks후에는 거의 포화된다. 유도자화값의 변화 양상은 표 2의 {110}<001>면밀도의 분포와 일치하고, 유도자화값은 1차 냉연 스트립(single-stage cold rolling)에 있어서 가장 낮았다. 포화자화값은 2차 또는 3차 냉연 스트립에서는 1.90 Tesla 이상이고, 1차 냉연 스트립은 1.69 Tesla의 매우 낮은 값을 나타내었다. 그림 3에서 언급 하였듯이, 유도자화의 골(trough)은 아마 황의 편석에 의해 {100}결정립들이 다른 결정립들, 특히 {110}결정립들을 소비하면서 성장하기 때문으로 사료된다.

결 론

다단 냉간압연에 의해 제조된 극박 3%규소강판의 유도자화에 미치는 최종 냉간압연율의 효과를 조사하였다. 1200℃에서 열처리후에 재결정화된 {110} 결정립들의 면밀도는 92%의 1차 냉간압연율에서는 0 이었다. 재결정후의 {110}면밀도는 2차 냉간 압연율과 거의 무관하였으며, 60%의 마지막 냉간압연율을 갖는 3차 냉간 압연인 경우에 최종열처리후에 1.9 Tesla이상의 높은 유도자화값이 얻어졌다.

참고문헌

1. J. L. Walter : Acta Met., 1959, vol.7, p. 424.
2. K. Foster, J. J. Kramer, and G. W. Wiener, Trans. AIME, 1963, vol. 227, p. 185.
3. W. L. Elban, M. A. Hebbbar, and J. J. Kramer, Metall. Trans., vol 1975, p. 1929.
4. C. Lea and M. P. Seah, Phil. Mag., 1977, vol. 35, p. 213.
5. N. H. Heo, K. H. Chai, J. G. Na, and J. S. Woo : J. Appl. Phys.,(in press).

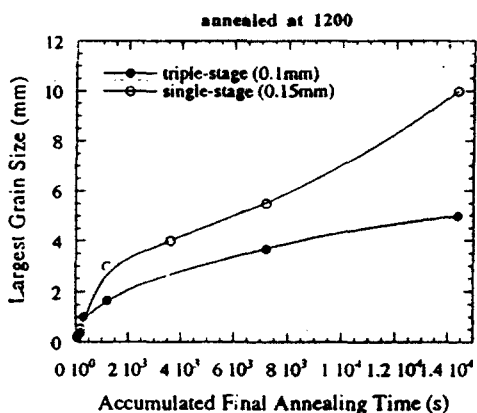


Fig. 1. Changes in largest grain size with final annealing time at 1200°C.

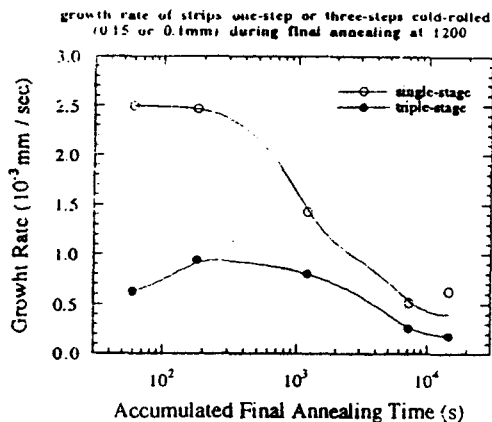


Fig. 2. Changes in growth rate with final annealing time at 1200°C.

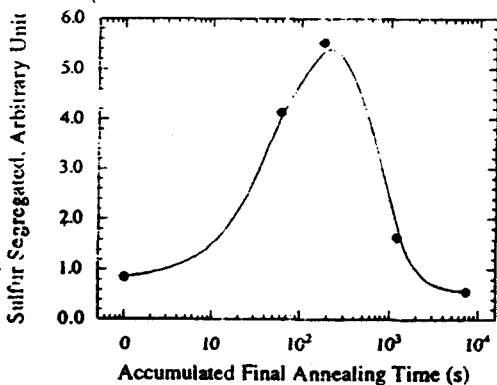


Fig. 3. Sulfur segregation with final annealing time at 1200°C.

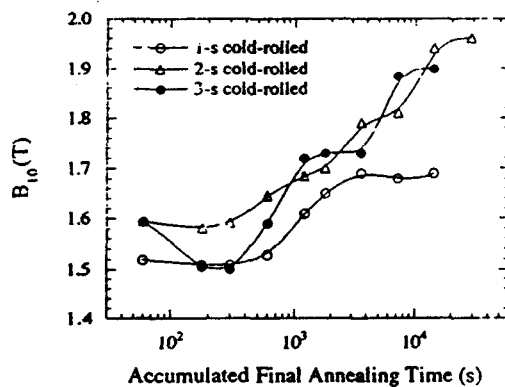


Fig. 4. Changes in magnetic induction of the thin-gauged 3%Si-Fe strips with final annealing time at 1200°C.