

3차 재결정에 의한 극박 방향성 규소강판의 결정립 크기와 자벽수와의 관계

김영학

부산수산대학교 전기공학과

荒井賢一

日本 東北大學 電氣通信研究所

(1996년 4월 1일 받음, 1996년 7월 3일 최종수정본 받음)

극박 방향성 규소강판의 철손을 저감시킬 목적으로 열처리방법[8]을 이용하여 결정 크기의 제어에 의해 자구폭을 변화시켰으며 결정립의 크기와 직류 자기특성, 철손, 자구폭과의 관계에 대해 검토하였다. 결정립 크기가 1 mm 이하로 작게되어도, B_0 는 1.95 T 이상의 높은 값을 나타내었고 항자력 H_c 는 결정립 크기의 감소에 따라 증가하였다. 결정립 크기가 1 mm 이하의 범위에서 결정립 크기를 감소시키기에 의해 자벽수가 증가하였으며 여자주파수가 높게 됨에 따라 증가하는 자벽수도 결정립 크기가 작을수록 많아지고 자구 세분화에 효과적이었다. 결정립 크기의 감소는 자구 세분화에 의해 와전류 손실을 저감시키지만 히스테리시스 손실이 지배적으로 낮은 여자주파수의 철손은 결정립 크기가 작은 시료일수록 높은 값을 나타내었다. 그러나 높은 주파수 영역의 철손은 와전류손실이 지배적이기 때문에 결정립 크기가 작은 시료일수록 낮은 값을 나타내었다. 이 결과로부터 결정립크기를 제어함에 의해 자구폭을 변화시킬수 있으며 극박방향성 규소강판의 저 손실화에 매우 유리한 수법인 것을 알았다.

I. 서 론

산업발전에 따라 전력수요는 계속해서 증가하고 있고, 지구환경의 오염방지과 에너지 절약의 문제가 점점 심각해지고 있다. 현재에도 시기에 따라서 전력수요는 발전능력의 한계까지 요구되어 산업전반에 걸쳐 여러 가지의 에너지 절약에 대한 대책이 제시되고 있다. 특히 전력은 일반적으로 저장하여 사용할 수 없고 항상 발전소로부터 수용가까지 많은 변압기를 통해 보내 오고 있기 때문에 변압기에서의 전력손실은 막대한 양에 달한다. 이와 같은 변압기의 손실의 대부분은 철심재료에 의해 차지하고 있으므로 철심재료인 규소강판의 철손감소에 대한 연구가 계속 이루어져 왔다.

표면이 깨끗한 시료에 표면에너지가 가장 낮은[1] (110)면의 결정립이 다른 결정면과의 표면 에너지 차를 구동력으로 3차 재결정이 성장[2]하는 것을 이용한 극박 방향성 규소강판의 제작이 가능하게 되었다[3]. 이러한 극박 방향성 규소강판은 종래의 높은 자속 밀도의 방향성 규소강판[4] [5]에 비해 철손이 매우 적은 것[6]을 큰 특징으로 한다. 이 극박 규소강판에 장력인가 및 표면 스크래치 등의 자구세분화 처리에 의해 자벽수를 증가시켜 와전류 손실의 감소에 의해 철손을 감소시키는 보고도 있다[7]. 그러나 이러한 부가기술의 도입이 제조 공정수의

증가를 초래한다.

본 연구에서는 이러한 부가기술을 사용하지 않고 철손을 저감시키기 위해 재결정을 위한 열처리방법[8]을 검토하여 결정 크기의 제어에 의해 자구폭을 변화시켰다. 이러한 강판을 대상으로 결정립의 크기에 대한 자구폭과 손실에 대해서 검토하였다.

II. 실험 방법

모재에는 불순물 제거 열처리[9]에 의해 Cu 함유량을 20 ppm 이하로 한 두께 260 μm 의 고자속밀도 방향성 규소강판(신일본제철 시판품 : Z-6H)을 이용하였다. 이것을 직경 20 mm의 워크롤을 가지는 4단 압연기를 이용하여 두께 33 μm -35 μm 까지 냉간 압연한 후, 폭이 5 mm, 길이가 100 mm 정도로 절단하여 시료로 하였다. 열처리는 약 1×10^{-3} Pa의 진공 중에서 1150 $^{\circ}\text{C}$ 로 가열된 적외선 집중 가열로 속에서 시료를 연속적으로 이동시켜 3차 재결정립 성장이 완료할 때까지 수행되었다.

Fig. 1은 열처리로 안에서 압연된 강판을 연속적으로 열처리를 수행하는 방법에 이용한 적외선 가열로의 구성을 나타낸 것이다. 길이가 160 mm의 가열 히터를 가지는 적외선 가열로의 중심에 긴 석영관을 장착하여 그 석영관의 안에 압연된 방향성 규소강판이 든 반투명한 석영관을

배치시켰다. 반투명한 석영관의 끝에 자석을 붙혀 외부로부터 다른 자석으로 반투명한 석영관을 연속적으로 이동하여 규소강판의 연속이동에 의한 열처리를 하였다. 이때, 노의 온도, 압연된 강판의 이동속도 및 열처리로 안을 통과하는 시간이 3차 재결정을 일으키는 중요한 파라미터로 된다. 따라서 시료의 승온속도를 제어하기위해 열처리로 안으로 삽입하는 속도를 제어하여 결정의 크기를 제어하였다.

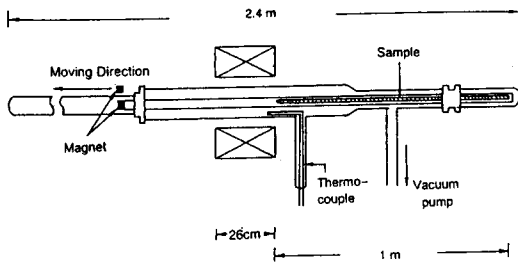


Fig 1. Furnace for continuous annealing.

Fig. 2는 시료를 적외선 가열로의 균열대로의 삽입속도에 의한 결정립 크기의 변화를 나타낸 것이다. 삽입속도가 0.17 mm/s ~ 300 mm/s의 범위에서 변화함에 따라 결정립의 크기는 0.26 mm ~ 0.74 mm까지 변화하였고, 삽입속도가 빠를수록 결정립의 크기가 감소하였다. 이 결정립의 크기변화는 3차 재결정의 핵성장 개시온도와 성장속도가 각각의 핵마다 틀리는 것에 기인한 것이

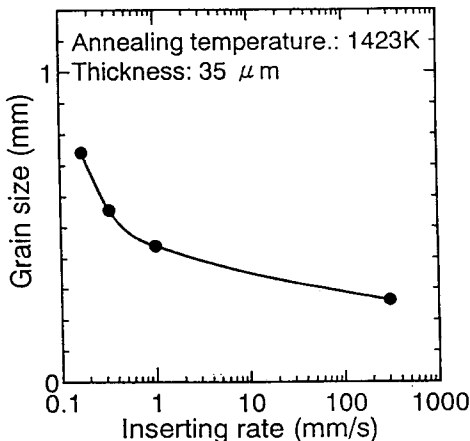


Fig 2. Dependence of grain size on inserting speed into annealing furnace.

라고 생각된다. 즉 삽입속도가 빠르게 되면 승온속도가 빨라져 보다 많은 3차 재결정의 핵이 성장하기 때문에 결정립의 크기가 감소한 것으로 생각된다.

결정립의 크기가 틀리는 시료를 이용하여 직류 자기특성과 철손의 측정 및 자구관찰을 50 Hz-800 Hz의 주파수 범위에서 수행하였다. 직류 자기특성은 직류 자화측정기, 철손측정에는 단판시험기, 자구관찰은 로렌츠 SEM [10]을 이용하였다.

III. 실험결과 및 고찰

Fig. 3에 800 A/m의 자장을 인가하였을 때의 자속밀도 B_8 과 그때의 항자력 H_c 의 결정립의 크기에 대한 의존성을 나타낸 것이다. 어느 결정립의 시료에서도 B_8 의 값은 1.95 T 이상의 매우 높은 값을 나타낸다. 이것은 냉간 압연 전의 사용한 모재가 고집적도의 (110) [001] 조직을 가지고 있기 때문에 방향성이 높은 (110) [001] 결정만이 3차 재결정의 핵으로서 존재하여 성장하므로 결정립의 크기가 작은 상태에서 결정립의 수가 증가하더라도 방향성이 현저하게 나쁜 결정립은 재결정 과정에서 모두 소멸되었기 때문이라고 생각된다. 한편, 항자력은 결정립의 크기의 감소에 따라 증가하였다. 이것은 결정립의 크기가 감소함에 따라 상대적으로 결정 입계의 면적이 증대하여 자벽 이동을 방해하기 때문이라고 생각된다.

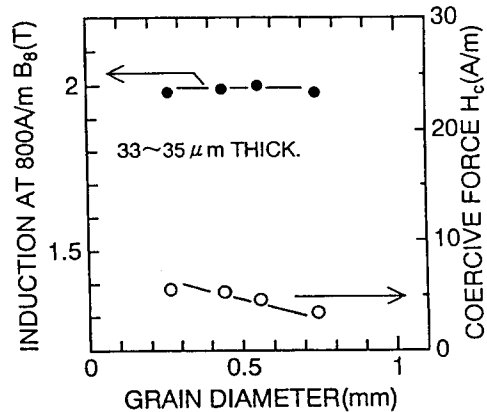


Fig 3. Dependence of B_8 and H_c on grain size.

결정립 크기의 철손에 대한 영향을 조사하기 위해서 자구관찰을 하였다. 종래부터 두께가 300 μm 이상의 두꺼운 방향성 규소강판의 자구와 철손의 관계에서는 90° 자벽의 발생과 소멸이 매우 중요하다고 지적되어 왔다

[11]. 그러나 자구관찰의 결과, 여기서 이용한 1 mm 이하의 결정립을 가지는 극박 방향성 규소강판에 있어서는 모두 180° 자벽을 가지는 자구에 의해 구성되고 있다. 이것은 시료의 두께가 매우 얇기 때문에 시료 양면 사이에 자기적 결합이 강하게 되는 것과 또한 [001] 축의 집적도가 높은 때문이라고 생각된다[12]. 0.26 mm, 0.44 mm, 0.74 mm의 결정립 크기를 가지는 3개의 시료에 대해서 주파수에 대한 자벽수의 증가경향을 조사하였다. Fig. 4은 자벽수의 증가를 N_d 와 N_s 의 차로 나타내고, 주파수 의존성을 나타낸 것이다. 여기서 N_d 는 동적 자벽수

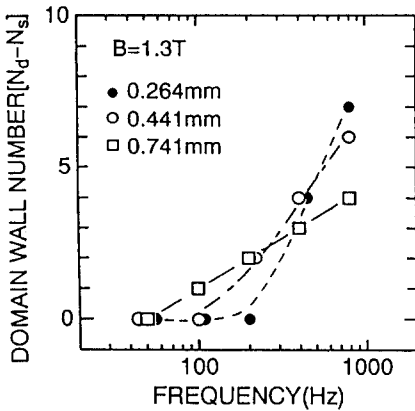


Fig 4. Dependence of number of domain walls on exciting frequency.

이고 N_s 는 소자상태의 자벽수이다. 자벽이 발생하는 주파수는 결정립 크기 0.74 mm의 시료의 경우, 100 Hz였으며, 0.44 mm의 시료의 경우에는 200 Hz, 0.26 mm의 시료에서는 400 Hz로 되어 결정립 크기의 감소에 의해 자벽수는 증가를 시작하는 주파수가 높게 되었다. 이것은 결정립 크기의 감소와 함께 항자력이 증가하는 것으로부터 자벽에너지의 극소적인 변화가 결정립 크기의 감소와 함께 증가하기 때문이라고 생각된다[9]. 그러나 자벽수가 증가하는 결정립 크기가 작은 시료일 수록 급격히 자벽수가 증가하고 800 Hz에 있어서 결정립의 크기가 작은 시료일 수록 증가가 크게 되는 것이 실험적으로 나타났다. 이것으로부터 결정립 크기가 작을수록 높은 주파수에 있어서 자벽수가 증가하기 쉽고 자구 세분화에 효과적인 것을 알 수 있다. 이상과 같이 결정립 크기의 감소가 자구의 세분화에 크게 기여하고 또한 주파수가 높을수록 결정립 크기의 감소에 의한 자구세분화 효과가 큼을 알 수 있다.

자구 세분화에 동반된 손실 값의 변화를 조사하는 것을 목적으로 철손, W_t , 와전류손실, W_e , 히스테리시스 손실, W_h 의 결정립 크기의 의존성에 관한 검토를 하였다. Fig. 5는 여자주파수 50 Hz에 있어서의 한 주기 당의 손실과 자벽수의 결정립 의존성을 나타낸 것이다. 히스테리시스 손실은 결정립 크기의 감소와 함께 증가하였다. 이것은 결정립 크기의 감소에 의한 항자력의 증가와 같은 경향이며, 결정립 크기의 감소에 동반된 상대적인 결정입계의 면적의 증대가 요인으로 되어 자벽의 이동이 방해되기 때문이라고 생각된다. 한편, 와전류 손실은 결정립 크기의 감소와 함께 저감하는 경향이 보인다. 어느 결정립을 가지는 시료에 있어서도 90° 자벽을 가지는 자구는 존재하지 않기 때문에 결정립 크기가 감소하고 180° 자벽의 수가 증가한 것에 의해 와전류 손실이 저감되었다고 생각된다.

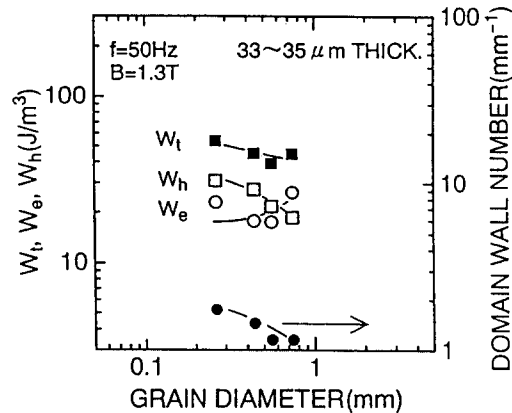


Fig 5. Dependence of number domain walls and total losses, eddy current losses, hysteresis losses on grain size. (at $f=50$ Hz)

히스테리시스 손실과 와전류 손실의 합인 철손은 여자주파수가 50 Hz만큼 낮은 경우는 히스테리시스 손실이 철손에 점하는 비율이 와전류 손실과 같던가 혹은 그 이상이기 때문에 결정립 크기의 감소에 동반된 히스테리시스 손실이 증가하여 철손이 증가하였다. 한편 Fig. 6에 나타내는 바와 같이 여자주파수가 800 Hz까지 높게 되면 철손에 차지하는 와전류 손실의 비율이 히스테리시스 손실에 비해 크게 되기 때문에 결정립 크기의 감소와 함께 와전류손실이 감소하여 철손도 저하되었다.

이러한 실험 결과로부터 철손이 최소로 되는 결정립의 크기는 여자하는 주파수에 의해 변화한다고 생각된다.

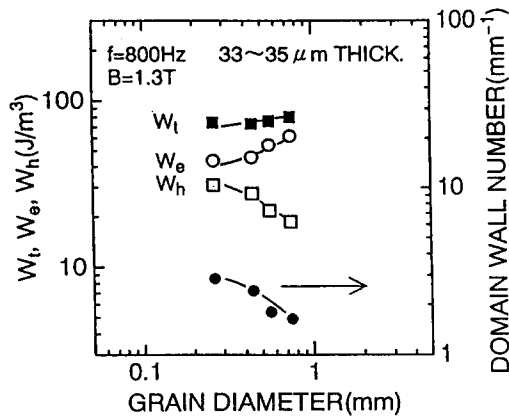


Fig 6. Dependence of number domain walls and total losses, eddy current losses, hysteresis losses on grain size. (at $f=800\text{Hz}$)

Fig. 7에 나타내는 바와 같이 본 연구에서 제작한 결정립의 크기 $0.26\sim 0.74\text{ mm}$ 의 시료에 대해 여자주파수가 높게 되면 철손이 최저로 되는 결정립의 크기는 감소하는 경향을 나타냄을 알 수 있다. 이것은 인가주파수의 상승에 의해 철손에 차지하는 와전류 손실의 비율이 증가하기 때문에 보다 와전류 손실이 작은 시료의 철손이 작게 되기 때문이다.

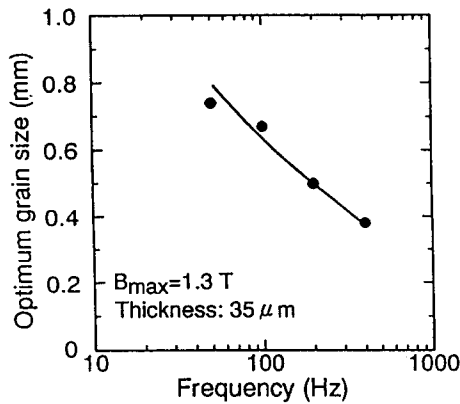


Fig 7. Dependence of grain size representing the minimum total losses on frequency.

IV. 결 론

결정립의 크기가 다른 극박 규소강판을 제작하여 직류

자기 특성, 철손, 자구폭을 측정된 결과 이하의 결론을 얻었다.

- (1) 극박 방향성 규소강판은 결정립 크기가 1 mm 이하로 작게 되어도, 결정립의 크기에 상관없이 $(110)[001]$ 조직의 집적도가 매우 높았으며 800 A/m 의 자계를 인가하였을 때의 자속밀도 B_8 는 1.95 T 이상의 높은 값을 나타내었다. 또한 항자력 H_c 는 결정립 크기의 감소에 따라 증가하였다.
- (2) 극박 규소강판의 결정립 크기가 1 mm 이하의 범위에서 결정립 크기를 감소시킴에 의해 자벽수를 증가하였다. 또한 여자주파수가 높게 됨에 따라 증가하는 자벽수도 결정립 크기가 작을수록 많아지고 자구 세분화에 효과적이었다.
- (3) 결정립 크기의 감소는 자구 세분화에 의해 와전류 손실을 저감시키지만 한편 히스테리시스 손실이 지배적으로 낮은 여자주파수의 철손은 결정립 크기가 작은 시료일수록 높은 값을 나타내는 결과로 된다. 그러나 높은 주파수 영역의 철손은 와전류손실이 지배적이기 때문에 결정립 크기가 작은 시료일수록 낮은 값을 나타내었다. 본 연구에서 제작한 $0.26\text{ mm}\sim 74\text{ mm}$ 의 결정립 크기를 가지는 극박방향성규소강판에 있어서 최소의 철손치를 나타내는 결정립 크기는 여자주파수에 의존하고 주파수가 높을수록 작게 되는 것을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 결정립크기를 제어함에 의해 부가 기술없이 자구폭을 변화시킬수 있으며 극박방향성규소강판의 저 손실화에 매우 유리한 수법인 것을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] J. K. Makenziem, J. Moore and J. F. Nicholas : J. Phys. Chem, Solids Pergamon Press., **23**, 185(1962).
- [2] J. L. Walter and C. G. Dunn : Trans. Metall. Soc. AIME, **215**, 465(1959).
- [3] K. I. Arai and K. Ishiyama : J. Appl. Phys., **64**, 5352(1988).
- [4] 清水, 原勢 : 日本金屬學會誌, **53**, 571(1990).
- [5] 原勢, 清水 : 日本金屬學會誌, **54**, 1(1990).
- [6] K. I. Arai, K. Ishiyama and H. Mogi : IEEE Trans. Magn., **25**, 3439(1989).
- [7] K. I. Arai, H. Mogi and K. Ishiyama : IEEE Trans. Magn., **26**, 1966(1990).
- [8] 大川, 金, 石山, 荒井 : 일본 응용자기학회지, **17**,

- 221 (1993).
[9] Ishiyama, K. I. Arai and T. Honda : J. Appl. Phys., **70**, 6262 (1991).
[10] 김영학, 荒井賢一 : 한국자기학회지, **5**, 885 (1995).
[11] 田口 : 일본금속학회지, **49**, 899, (1985).
[12] 山口 : 일본응용학회지, **8**, 201 (1984).

Relation of Grain Size with Magnetic Domain Wall for Tertiary Recrystallized 3% Si-Fe Strip

Y. H. Kim

Department of Electrical Engineering, National Fishery University of Pusan

K. I. Arai

Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, Sendai, Japan

(Received 1 April 1996, in final form 3 July 1996)

The relationship between grain size and number of magnetic domain walls for tertiary recrystallized ultra thin 3 % Si-Fe strips was investigated. It was found that the strips with different grain size can be produced by controlling the inserting speed of sample in annealing furnace. Though grain size of the strip became smaller than 1mm, B_8 of high value above 1.95T was obtained. But H_c increased with decaying the grain size. The magnetic domains and losses of the ultra thin grain oriented silicon steel with smaller grain size were observed. The eddy current losses of the strips were decreased with decreasing the grain size in high frequency range because strips with smaller grain have narrower magnetic domain wall spacings. But Hysteresis losses of the strips with smaller grain have high value in low frequency range. Therefore the iron loss of ultra thin grain oriented silicon steel could be controlled by the grain size. It was clarified that the minimum total losses depended on the exciting frequency and grain size.