

Fe-B-Si 비정질 리본의 자기특성에 미치는 응력의 영향

Stress Effects on Magnetic Properties of Amorphous Fe-B-Si Ribbon

宋 在 成* · 金 起 煜** · 任 縞 彬***
 (Jae-Sung Song · Ki-Uk Kim · Ho-Bin Im)

Abstract- The effects of annealing with and without magnetic field on magnetic properties of amorphous Fe-B-Si cores have been investigated as a function of toroidal stress. By decreasing the toroidal stress, the magnetic properties of the amorphous ribbon have been improved. Near 180° domain walls exist in the thermally annealed toroidal cores, but the domain walls are not parallel to the longitudinal direction of the ribbon. In the specimen annealed with a magnetic field strength of 10 Oe in the longitudinal ribbon length axis, the domains are nearly parallel to the longitudinal direction due to the field induced uniaxial anisotropy, resulting in further increase in the remanent magnetization and decrease in the coercive force and loss.

1. 서 론

전력용 변압기 철심재료로는 규소강판이 주로 사용되고 있고 신소재인 철계 비정질재료가 우수한 자기특성으로 규소강판의 대체재로서 기대되고 있다. 철계 비정질 합금이 차기 전력용 변압기 철심재료로 각광을 받고 있는 것은 자속밀도가 비교적 높고 자기이력손실이 적은데다 전기 저항이 크고, 박막이어서 eddy current loss가 작기 때문이

다. [1, 2]

그러나 as-quenched 상태의 비정질 재료는 10° deg/sec 정도의 냉각속도로 급랭에 의하여 제조되므로 stress를 강하게 받고 있는 상태이기 때문에 투자율, 보자력(coercive force) 등 자기적 성질이 좋지 못하고 철손도 크다.

따라서 비정질의 stress relaxation을 위해서 열처리를 하여야 하는데 열처리 조건에 따라 특성 변화가 크므로 이에 대한 연구가 활발하다. 최근에는 field annealing에 의한 비정질 재료의 자기 특성 향상 연구가 활발하며, field annealing은 오래전부터 연자성, 경자성 결정질 재료의 각형성(squareness)을 높이는데 유용한 방법으로 알려져 왔는데 field annealing에 의한 각형성 향상의 본질은 induced uniaxial magnetic anisotropy에 있

*正 會 員 : 韓國電氣研究所 電氣材料研究部 先任 研究員 · 工博

**正 會 員 : 韓國電氣研究所 電氣材料研究部 研究 員

***正 會 員 : KAIST 材料工學科 教授 · 工博

接受日字 : 1991年 1月 28日

1次修正 : 1991年 4月 16日

는 것이므로 이 방법의 비정질 재료에의 적용이 가능한 것으로 여겨지고 있다. [3, 4]

지금까지 유도자기 이방성 형성에 대한 연구는 자기이방성이 비교적 잔류 응력이나 외부응력에 민감하지 않은 near-zero-magnetostriction material(Co-base amorphous 등)을 중심으로 행하여졌다. [5, 6] 그런데 변압기등의 core재료로서 사용될때에는 winding하여 core를 제작하므로 외부응력이 가해지는데 외부응력을 가한 상태에서의 자장중 열처리에 의한 유도자기 이방성 형성에 관한 연구는 거의 없다.

따라서 본 연구에서는 전력용 변압기의 core 재료로서 유망한 $Fe_{78}B_{13}Si_9$ 비정질 재료(포화자화 $\lambda_s = 27 \times 10^{-6}$)에 대한 stress-field annealing 효과에 대하여 자기특성 변화의 관점에서 고찰하였는데 stress의 크기는 시료를 감는 원통형의 pyrex bobbin의 diameter로 변화시켰다.

2. 실험방법

본 실험에서 사용한 시료는 $Fe_{78}B_{13}Si_9$ 의 조성을 갖는 비정질 합금으로 두께 $20\mu m$, 폭 $2.5cm$ 의 ribbon형상이다. 비정질 ribbon은 직경 $1.0 \sim 4.0cm$ 의 pyrex bobbin에 40회씩 감아서 toroidal stress의 변화를 주었다. 이렇게 감은 비정질 재료는 ribbon의 중립면을 경계로 하여 원주방향으로 외측에는 인장력이 내측에는 압축력이 걸리게 되며 양측에서 응력의 절대치는 동일하다. 이때 비정질 재료의 내측과 외측에 걸리는 stress(σ)는 [7]

$$\sigma = \frac{E \times \chi}{\rho}$$

여기서

E : 비정질 재료의 Young's modulus

ρ : 곡률반경

χ : Ribbon 중립면에서의 거리

로 나타낼 수 있는데 본재료의 Young's modulus $E = 12 \times 10^3 \text{ kg/mm}^2$ 이고 ρ 는 pyrex bobbin-diameter에 따라 정해지는 값이므로 winding process에 의한 응력상태를 계산할 수 있으며 pyrex bobbin diameter(ϕ)가 증가할수록 거기에 반 비례해서 ribbon에 걸리는 toroidal stress는 감소한다.

Toroidal stress의 변화와 더불어 as-quenched 상태와 열처리(무자장중 혹은 ribbon 길이 방향으로의 자장중)에 따른 자기적 특성(H_c , B_r , B_s , B_r/B_s)을 측정하기 위하여 B-H meter를 사용하

였고 철손 측정은 전력계-전류계-전압계법을 이용하였다. 또 induced anisotropy constant(K_u)는 ribbon 길이 방향으로 외부자장을 걸어주면서 열처리한 시료(H_L)와 ribbon 폭 방향으로 외부자장을 걸어주면서 열처리한 시료(H_T)의 초자화곡선으로부터 $K_u = \int (H_T - H_L) dB$ 에 의하여 구하였으며 [8] 자구는 Bitter method [9]로 광학현미경을 이용하여 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1에 10 Oe의 자장을 ribbon 길이 방향으로 가하면서 혹은 무자장중에서 적정열처리 온도인 $380^\circ C$ 에서 2시간 동안 열처리한 시료의 bobbin diameter에 따른 측정자속밀도 $B_m = 1.2 \text{ Tesla}$, 측정주파수 $f = 60 \text{ Hz}$ 에서의 total core loss를 나타내었는데 열처리 온도 및 자장크기에 따른 자기특성의 변화는 앞서의 연구결과에 잘 나타나 있다.

[10] 그림 1에서 X 는 무자장중에서 열처리한 시료, \bullet 는 10 Oe의 자장을 비정질 ribbon 길이 방향으로 가하면서 열처리한 시료의 total core loss를 나타내는데 자장중 열처리한 시료의 loss가 무자장중에서 열처리한 시료의 loss보다 bobbin diameter에 따른 stress변화에 상관없이 훨씬 작았

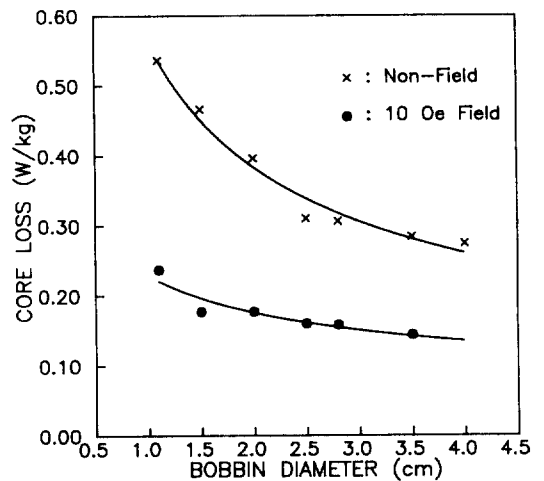


그림 1 자장중 혹은 무자장중에서 열처리한 $Fe_{78}B_{13}Si_9$ 비정질 재료의 bobbin diameter에 따른 철손 변화

Fig. 1 Core losses versus bobbin diameter for amorphous $Fe_{78}B_{13}Si_9$ cores annealed with (●) and without field (x).

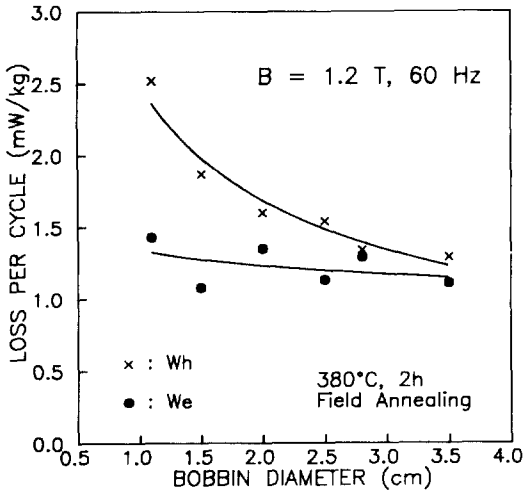


그림 2 10 Oe의 자장중에서 열처리한 $Fe_{78}B_{13}Si_9$ 비정질 재료의 bobbin diameter에 따른 자기이력손실 및 와전류 손실
 Fig. 2 Hysteresis and eddy current loss versus bobbin diameter for amorphous $Fe_{78}B_{13}Si_9$ cores annealed with static field of 10 Oe.

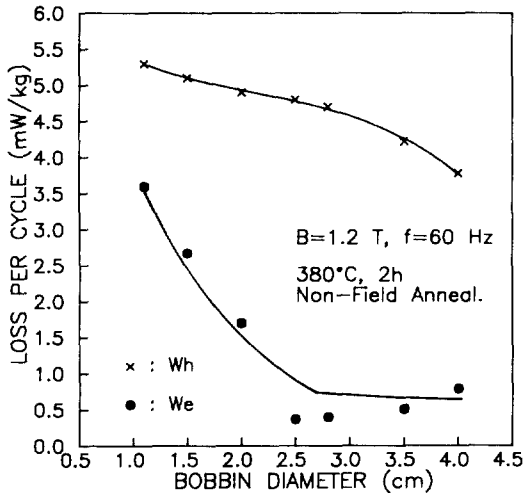


그림 3 무자장중에서 열처리한 $Fe_{78}B_{13}Si_9$ 비정질 재료의 bobbin diameter에 따른 자기이력 손실 및 와전류 손실
 Fig. 3 Hysteresis and eddy current loss versus bobbin diameter for amorphous $Fe_{78}B_{13}Si_9$ cores annealed without field.

으며, bobbin diameter가 증가함에 따라 즉 시료에 걸리는 toroidal stress가 감소함에 따라 core loss가 감소하였는데 무자장중에서 열처리한 시료

의 경우 급격히 감소한 반면 자장중에서 열처리한 시료는 완만하게 감소하였다. 이는 자장중 열처리 효과에 의하여 stress relaxation이 쉽게 일어나기 때문인 것으로 생각된다.

Total core loss는 자기이력손실(Wh)과 와전류 손실(We)의 합으로 표시되는데 자장중에서 열처리한 시료 및 무자장중에서 열처리한 시료의 bobbin diameter에 따른 단위 주파수당 자기이력 손실 및 와전류 손실을 그림 2, 그림 3에 각각 나타내었다. 그림 2는 10 Oe의 자장을 ribbon 길이 방향으로 가하면서 열처리한 시료의 경우인데 자기이력손실이 bobbin diameter가 커짐에 따라 급격히 감소(bobbin diameter가 1.1cm에서 3.5cm로 커졌을 때 Wh는 50% 감소)하였고, 반면에 와전류손실은 bobbin diameter가 커짐에 따라 아주 미미하게 감소하였다. 그림 3은 무자장중에서 열처리한 시료의 bobbin diameter에 따른 단위주파수당 손실인데 자기이력손실은 그림 2에서와 마찬가지로 bobbin diameter가 증가함에 따라 감소하였으나 와전류 손실은 자장중에서 열처리한 시료와는 달리 작은 bobbin diameter(1.1cm)에서 3.6 mW/kg의 큰값을 갖고 bobbin diameter가 커짐에 따라 급격히 감소하여 $\phi=2.5cm$ 에서 0.5mW/kg으로 되고 그 이상의 bobbin diameter에서는 거의 일정한 값을 나타냈다. 이와같이 자장중에서 열처리한 시료와는 달리 무자장 중에서 열처리한 시료의 경우 작은 bobbin diameter에서 큰 와전류 손

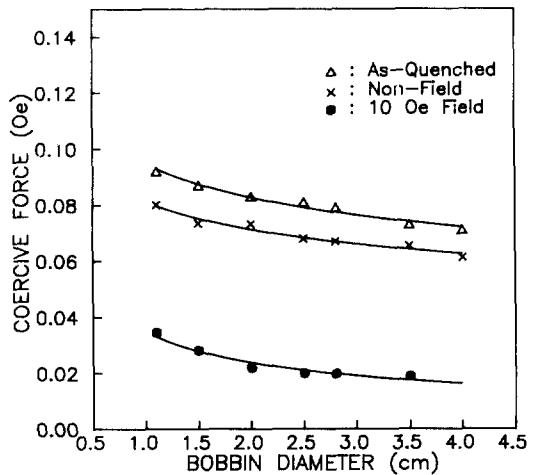


그림 4 $Fe_{78}B_{13}Si_9$ 비정질 재료의 bobbin diameter에 따른 보자력의 변화
 Fig. 4 Coercive force as a function of bobbin diameter for amorphous $Fe_{78}B_{13}Si_9$ cores.

실을 나타내는 것은 비정질 ribbon의 winding process에서 발생한 응력에 의한 stress-induced anisotropy가 시료내부에 복잡하게 형성되어 무자장 열처리만으로는 완전히 해소시키기가 어렵기 때문인 것으로 생각된다.

그림 2, 그림 3으로부터 자장중에서 열처리하든 무자장중에서 열처리하든 total core loss는 자기이력 손실의 크기에 주로 지배를 받는 것을 알 수가 있는데 자기이력손실은 보자력(Hc)의 크기와 관련이 크므로 bobbin diameter에 따른 보자력의 변화를 그림 4에 나타내었다.

As-quenched 상태의 시료의 보자력이 열처리한 시료보다 훨씬 큰 값을 갖는 것은 Bitter method로 자구를 관찰한 결과 as-quenched 시료가 복잡한 형태의 내부응력에 의해서 maze domain pattern을 갖기 때문인 것으로 밝혀졌다. [10] 자장중 열처리에 의하여 보자력의 크기를 훨씬 낮출 수 있는 것은 단순한 열처리에 의해서는 180° domain wall이 형성되긴 하지만 ribbon의 길이 방향에서 크게 tilting되어 존재하는데 ribbon길이 방향으로 자장을 걸어주면서 열처리 함으로 인하여 180° domain wall을 ribbon 길이 방향으로 잘 배열시킨 결과로서 판단되며 bobbin diameter에 따른 보자력의 변화는 bobbin diameter가 증가함에

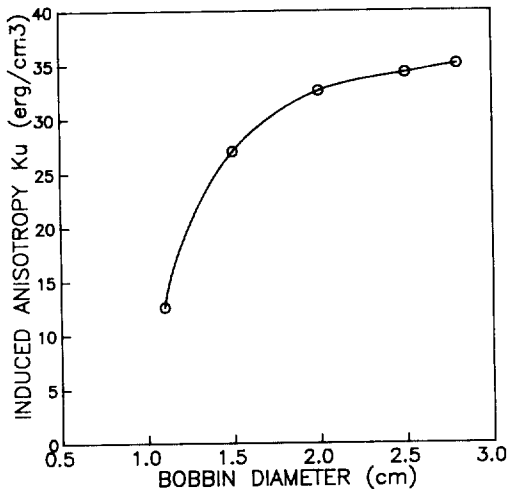


그림 5 10 Oe의 자장중에서 열처리한 Fe₇₈B₁₃Si₉ 비정질 재료의 bobbin diameter에 따른 유도 자기 이방성 계수의 변화

Fig. 5 Induced anisotropy as a function of bobbin diameter for amorphous Fe₇₈B₁₃Si₉ cores annealed in the field of 10 Oe.

따라 서서히 감소하였는데 이는 bobbin diameter 증가에 따라서 열처리시 시료의 내부응력이 감소하여 자구의 이동 및 재배열이 용이해지기 때문인 것으로 생각된다.

그림 5에 380°C에서 2시간 동안 ribbon 길이 방향으로 10 Oe의 자장을 걸어 주면서 열처리한 시

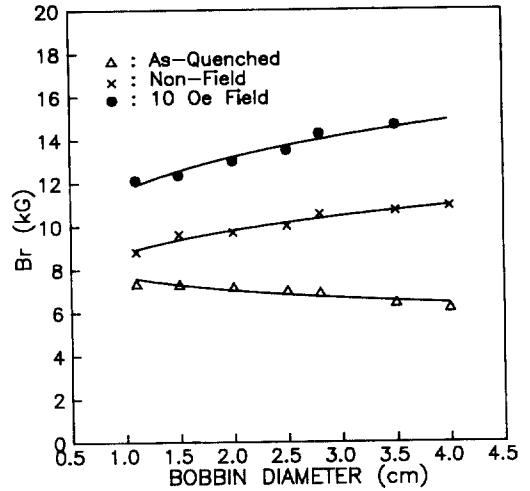


그림 6 Fe₇₈B₁₃Si₉ 비정질 재료의 bobbin diameter에 따른 잔류 자속밀도의 변화
Fig. 6 Remanence versus bobbin diameter for amorphous Fe₇₈B₁₃Si₉ cores.

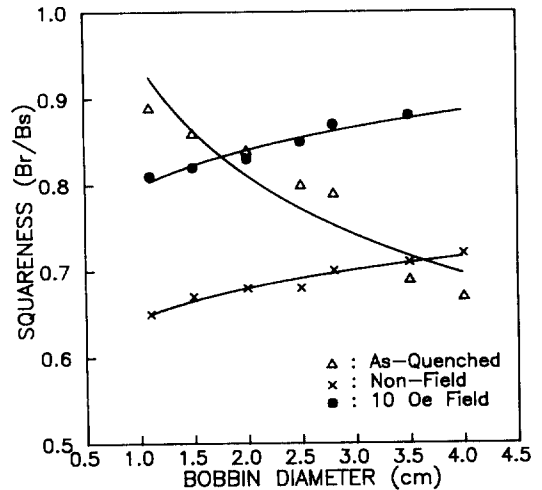


그림 7 Fe₇₈B₁₃Si₉ 비정질 재료의 각형성에 미치는 bobbin diameter의 영향

Fig. 7 The effects of bobbin diameter on the squareness of amorphous Fe₇₈B₁₃Si₉ cores.

료의 bobbin diameter에 따른 유도자기 이방성 계수(Ku)의 변화를 나타내었다. 앞서의 loss의 변화 결과로부터 예측된 바와 같이 bobbin diameter가 증가함에 따라 $\phi=2.5\sim 3.0\text{cm}$ 까지는 급격히 증가하였으며 그 이상에서는 Ku의 증가세가 완만하였다.

그림 6에 bobbin diameter에 따른 잔류자속밀도(Br)의 변화를 그림 7에 bobbin diameter에 따른 squareness(Br/Bs)의 변화를 나타내었다. 자장중 혹은 무자장 중에서 열처리한 시편에서는 bobbin diameter가 커짐에 따라 Br, Br/Bs 값이 증가하였다. 반면에 as-quenched 시편의 경우는 bobbin diameter가 커짐에 따라 Br, Br/Bs 값이 감소하고 있다. As-quenched 상태의 시편이 작은 bobbin diameter에서 높은 Br, Br/Bs 값을 갖는 것은 ribbon 제조과정 및 winding 과정에서의 응력이 복합적으로 작용하여 매우 큰 불균일(inhomogeneous) 응력상태에 놓이기 때문으로 생각된다. 이러한 불균일 응력상태는 열처리에 의해 상당부분 해소가 되어 그림 6에서와 같이 열처리한 시편의 Br값이 as-quenched 상태의 시편보다 훨씬 커진다. 또 bobbin diameter가 커짐에 따라 비정질 ribbon에 걸리는 응력이 작아지면 annealing에 의한 180° domain wall의 형성이 용이해져 자화가 쉬워짐으로서 bobbin diameter 증가에 따라서 Br 및 Br/Bs 값이 증가하는 것으로 사료된다. 자장중 열처리한 시편이 무자장 열처리한 시편에 비해 Br 및 Br/Bs 값이 큰 것은 자장중 열처리에 의한 180° domain wall이 ribbon길이 방향으로 배열되어 ribbon길이 방향이 자화용이축이 되기 때문으로 여겨진다.

4. 결 론

변압기 철심재료인 $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ 비정질 리본을 toroidal stress하에서 열처리할때 리본길이방향으로의 자장유무에 따른 자기특성 변화에 대한 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Bobbin diameter가 커짐에 따라, 즉 시료에 걸리는 toroidal stress가 감소함에 따라 열처리후의 자기특성이 우수하였는데 이는 열처리에 의해 180° domain wall의 형성이 용이해지기 때문이다.
- 2) 자장중에서 열처리했을 때의 자기특성이 무자장 중에서 열처리했을때 보다 특히 우수한 것은

자장효과에 의하여 원자확산이 촉진되어 stress relaxation이 쉽게 일어나 ribbon길이 방향으로 일축 유도자기 이방성이 크게 형성되기 때문으로 생각된다.

3) 비교적 큰 toroidal stress가 걸린 상태에서 무자장중에서 열처리했을 때 와전류 손실이 stress의 크기에 아주 민감하게 변하였는데 이는 비정질 리본의 제조 및 toroidal 시편으로 감는 과정에서 발생한 stress에 의한 stress-induced anisotropy가 시료내부에 복잡하게 형성되어 자장효과가 없는 열처리만으로는 완전히 해소시키기가 어렵기 때문인 것으로 사료된다.

4) As-quenched 시편은 큰 toroidal stress를 받았을 때 보자력이 매우 큰 square loop을 형성하였는데 이는 시편에 걸린 매우 큰 불균일 응력상태가 domain wall의 이동을 방해하는 요소로 작용하기 때문이다.

참 고 문 헌

- [1] G. Bertotti, IEEE Trans. on Mag., MAG-24, 621(1988)
- [2] R. Hasegawa, J. Mag. and Mag. Mater., 41, 79(1984).
- [3] F.E. Luborsky and J.L. Walter, IEEE Trans. on Mag., MAG-13, 953(1977).
- [4] P.J. Flanders, T. Egami and C.D. Graham Jr., IEEE Trans. on Mag., MAG-19, 1904(1983).
- [5] O. Khomoto, H. Fujishima and T. Ojima, IEEE Trans. on Mag., MAG-16, 440(1980).
- [6] H.Y. Yu, D.R. Huang, P.C. Yao and S.E. Hsu, IEEE Trans. on Mag., MAG-22, 558(1986).
- [7] 엄기원, "재료역학연습", 동명사, 226(1979).
- [8] S. Tsunashima, Y. Maehata and S. Uchiyama, IEEE Trans. on Mag., MAG-17, 3073(1981).
- [9] Y. Obi, H. Fujimori and H. Saito, Japan J. Appl. Phys. 15, 4, 611(1976).
- [10] J.S. Song, H.B. Im and M.S. Yun, Amer. Inst. Phys., CD-09, 35th MMM Conference, Oct. 1990, San Diego, CA.