

비정질 자성 합금의 조성에 따른 비대칭 자기 이력 곡선의 변화

신경호

한국과학기술연구원 금속연구부
서울특별시 성북구 하월곡동, 136-791

민성혜 · 이장로

숙명여자대학교 물리학과
서울특별시 용산구 청과동, 140-742

(1995년 6월 26일 받음, 1995년 7월 18일 최종수정본 받음)

비대칭 자화 반전 효과의 원인을 조사하기 위하여 $(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$ 계 비정질 자성 합금 리본을 무자장 중에서 열처리 온도 380 °C로 하여 16시간 동안 열처리한 후 합금 조성에 따른 자기 이력 곡선의 변화에 대하여 연구하였다. Fe 나 Co만을 함유하고 있는 합금의 경우보다 이들 두 금속을 모두 함유하고 있는 비정질 합금 리본의 경우가 무자장 열처리에 의해서 자기벽내에 더 큰 유도 자기 이방성을 형성함으로써 보다 뚜렷한 비대칭 자화 반전 효과를 얻을 수 있었다. 또한 영자왜 조성에 가까운 비정질 합금의 경우에서 보다 뚜렷한 비대칭 자화 반전 효과를 얻을 수 있었는데, 두 가지 금속 모두를 함유하는 특히 서로 비슷한 함량을 함유하는 조성을 가질수록 뚜렷한 효과를 얻을 수 있다는 사실과 복합적으로 작용하였다.

I. 서 론

비대칭 자기 이력(Asymmetric Magnetization Reversal; 이하 AMR) 현상은 K. Shin 등[1]이 발견한 이래, 이 현상에 의하여 구현되는 자기 이력 곡선의 독특함과 차세대 도난 방지 센서로서의 활용 가능성 때문에 꾸준히 연구되어 지고 있는 과제이다. 일련의 연구에 의하여 AMR 현상이 자기적으로 포화되지 않은 상태로 큐리 온도 이하에서 열처리 함으로써 자기벽이 고착된 것[2]과 열처리 중에 비정질 합금 리본 표면의 B 결핍층에 생성된 준경자성체의 존재와 연관하다는 점[3] 그리고 이 준경자성체가 결정화된 Co라는 점[4] 등이 밝혀졌으나, 준경자성체의 존재에 따라 자기벽이 고착된 정도 즉 자기벽내에 유도된 자기 이방성의 크기에 대해서는 체계적인 연구가 진행되지 못하였다.

Fig. 1(a)는 영자왜 조성인 $(\text{Fe}_{0.06}\text{Co}_{0.94})_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$ 비정질 합금 리본의 정자기 이력곡선이다. Fig. 1(b)는 열처리 시 무자장으로 하여 380 °C 에서 16시간 열처리한 후 상온에서 그런 이력 곡선으로, Fig. 1(a) 급냉 리본의 이력 곡선과는 큰 차이를 보이고 있다. 즉, 무자장중에서 열처리한 경우에는 탈자된 상태가 안정화되어 있어 측정 자장의 방향이 원점에서 양(+)의 방향 혹은 음(-)의 방향으로 변할 때 각 방향에서 어느 임계 자장값에 이르러서야 비로소 각각의 단한변의 비가역적인 Barkhausen

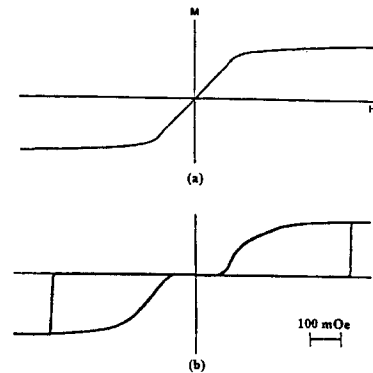


Fig. 1. Hysteresis loops of amorphous ribbon, (a) as-cast, (b) annealed at 380°C for 16 hour in a zero-field condition.

jump에 의해 자화 반전을 한다. 그러나 양(+)과 음(-)의 자장 각 영역에서 가역적인 자화반전을 하는 부분과 비가역적인 자화반전을 하는 부분이 각각 비대칭을 이루고 있음을 볼 수 있다. 그래서 우리는 이것을 二重 비대칭 자화반전(Double Asymmetric Magnetization Reversal; 이하 D-AMR)이라 이름하였다.

본 연구에서는 D-AMR의 조성 의존성을 체계적으로 조사하여 주어진 합금 조성계에서 유도 자기 이방성의 크기 등을 연구함으로써 AMR 현상에 대한 이해를 구하고

자 하였다. 본 연구에서 조성 의존성을 조사하기 위해서 영자왜 조성인 $(\text{Fe}_{0.06}\text{Co}_{0.94})_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$ 조성을 중심으로 포화자왜값이 양 혹은 음이 되도록 Fe/Co 비를 조절하여 제조한 비정질 합금 리본에 대하여 실험을 행하였다.

II. 실험 방법

여러가지 조성의 FeCoSiB계 비정질 합금 리본을 진공 급냉응고장치로써 제조하였다. chamber 내의 압력이 Ar 60 mmHg 분위기, 선속도는 40 m/sec의 조건으로 제조하였으며, 제조된 비정질 합금 리본의 폭이 1.0 ~ 1.2 mm, 두께는 $22 \pm 2 \mu\text{m}$ 였다.

실험의 재현성을 위해서는 열처리할 때나 자기특성을 측정할 때 무자장 분위기를 유지하는 것이 중요하다. 그래서 X, Y, Z축으로 각각 직교시킨 세 쌍의 Helmholtz coil을 이용하여 $0 \pm 3 \text{ mOe}$ 의 무자장 조건을 구현하였다. Helmholtz coil의 자장은 2 Oe 이하의 미세 자장을 측정할 수 있는 fluxgate magnetometer를 이용하여 측정하였다.

본 연구에서는 Fe와 Co의 조성을 변화시킨 $(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$ ($x = 0, 0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1$) 비정질 합금 리본을 열처리함으로써, 조성 변화 그리고 포화자왜값에 따른 특성의 변화를 조사하였다. 여러가지 다른 조성을 갖는 비정질 합금 리본을 75 mm의 길이로 절단한 후, 상기의 자체 제작한 Helmholtz coil set를 이용하여 영자장으로 만든 공간에 두어, 대기중의 산화 분위기에서 380 °C의 온도로 16시간 동안 열처리하였다.

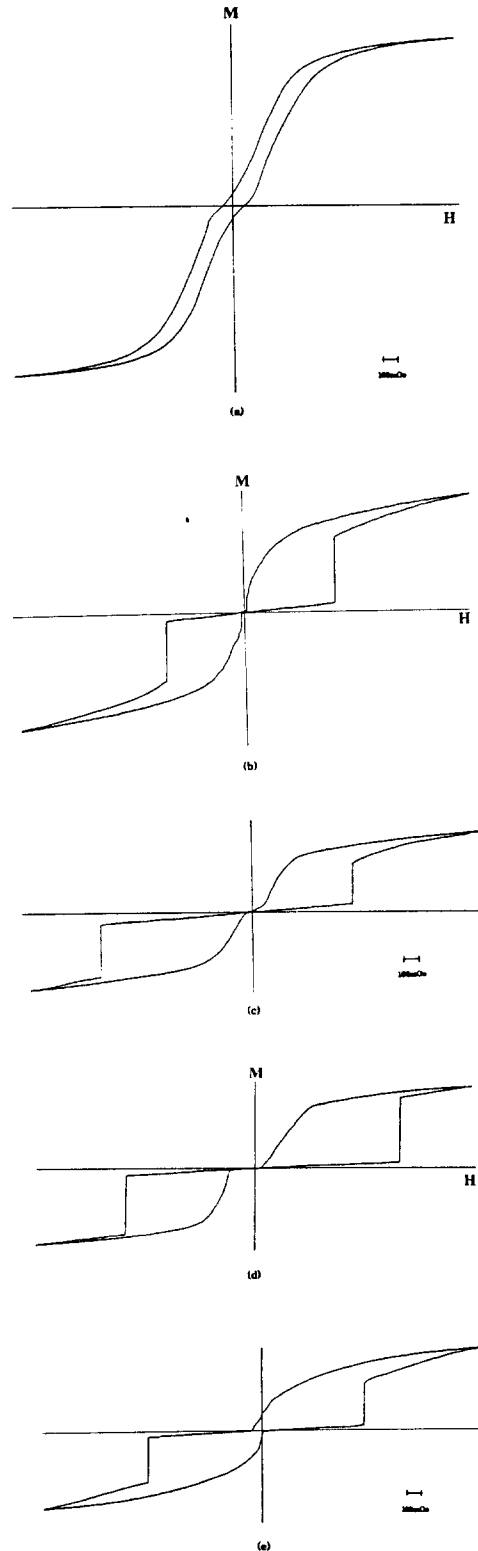
비정질 합금 리본의 열처리로는 직경 25 mm 석영관에 비자성의 열선을 자장이 발생하지 않도록 무유도 권선 방식으로 감은 것을 사용하였다.

자장 열처리한 리본의 자기 특성은 bucking coil로 보정시킨 pick-up coil과 fluxmeter를 이용하여 상온에서 자기 이력곡선을 그린 후, 이력 곡선으로부터 자기 특성을 구하였다. 열처리후 리본의 조성에 따른 포화 자화값은 상온에서 VSM(Vibrating Sample Magnetometer)으로 측정하였다. 한편 비정질 합금 리본의 조성 분석은 Atomic Absorption 방법으로 분석하였는 바, 3% 이내의 범위에서 목적 조성과 일치하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

자기 이력 곡선의 모양은 주어진 열처리 조건하에서 리본의 조성에 따라 민감하게 변화하였다.

Fig. 2는 $(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$ ($x = 0, 0.2, 0.4, 0.5,$



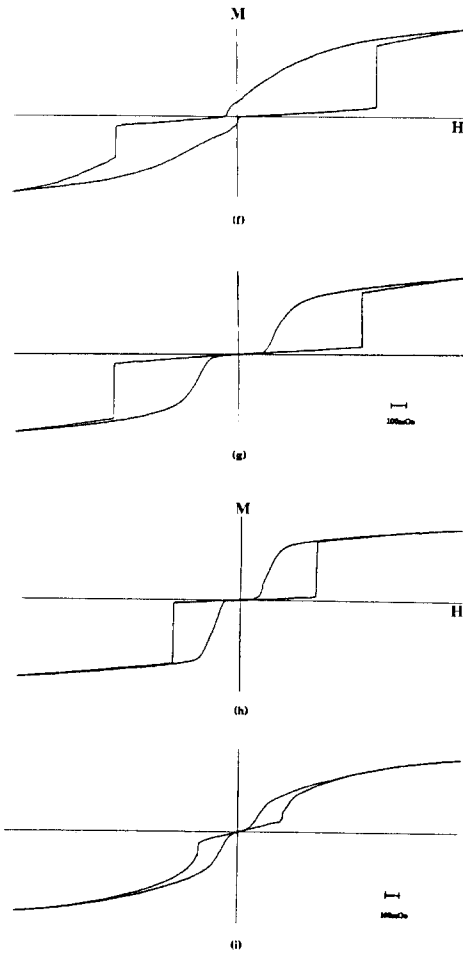


Fig. 2. Hysteresis loops of amorphous ribbon with different composition $(Fe_{1-x}Co_x)_{75}Si_{10}B_{15}$ after annealed in zero field. (a) $x = 0$, (b) $x = 20$, (c) $x = 40$, (d) $x = 50$, (e) $x = 60$, (f) $x = 70$, (g) $x = 80$, (h) $x = 90$, (i) $x = 100$.

0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1) 비정질 합금 리본을 무자장 중에서 열처리 온도 380 °C로 하여 16시간 동안 열처리 후 측정 자장의 최대 크기 1500 mOe를 인가하여 상온에서 그런 자기 이력 곡선이다.

Fig. 3은 Fig. 2의 결과를 체계적으로 분석하기 위하여 전형적인 二重 비대칭 자화 반전(Double Asymmetric Magnetization Reversal ; D-AMR)의 특징을 갖는 Fig. 2(g)의 자기 이력 곡선을 이용하여 D-AMR의 자기 특성값을 정의한 것이다.

Fig. 2의 결과로부터 구한 조성 변화에 따른 jump field, H_j 를 보면(Fig. 4) Fe나 Co만을 함유하고 있는 경우에는 H_j 가 300 mOe 미만으로 작지만 두 금속을 모

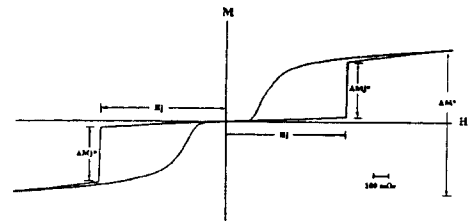


Fig. 3. Typical double-AMR loop identifying characteristic quantities

H_j : the jump field,

the field at which a magnetization jump occurs after annealing in zero field.

ΔM_j^* : the magnetization jump,

the change in magnetization at H_j , normalized to the change in magnetization for a field change from +1500 to -1500 mOe of an as-cast amorphous ribbon.

ΔM^* : the reversible magnetization,

the total change in magnetization for a field change of +1500 to -1500 mOe normalized to the same change in an as-cast ribbon.

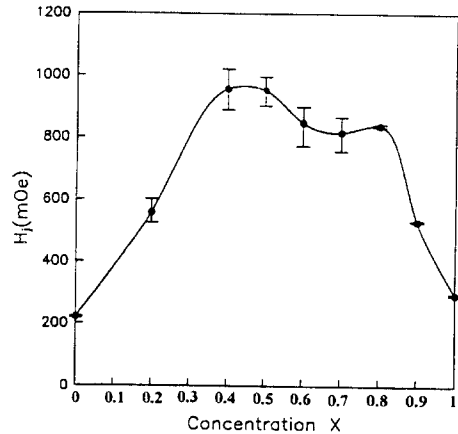


Fig. 4. Compositional dependence of H_j in $(Fe_{1-x}Co_x)_{75}Si_{10}B_{15}$ amorphous alloys.

두 함유하고 있는 경우 $x = 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ 에서는 800 mOe 이상의 큰 H_j 값을 가졌다.

조성에 따라 H_j 가 변화하는 것은 조성에 따라 유도 자기 이방성이 변화하기 때문이다. jump field H_j 가 조성에 따라 변화하는 것을 이론적으로 살펴보자.

H_j 는 다음과 같은 값에 의해 결정된다[5].

$$H_j(K_c, a) = H_k + H_d(a) - H_D + H_s \quad (1)$$

이때 각 값들은 다음과 같다.

- H_k : Induced anisotropy field
- $\Delta H_d(a)$: Demagnetizing field in reverse domain
- H_D : Demagnetizing field
- H_s : Shift field
- K_u : Induced uniaxial magnetic anisotropy
- a : Reverse domain size

먼저 induced anisotropy field H_k 를 계산해 보자.

$$H_k = \alpha \frac{K_u}{I_s} \quad \left(\alpha = 1^{[6]}, 1.4^{[7]}, 2^{[8]}, \frac{\pi^{[9]}}{3} \right)$$

$$= AK_u \quad \left(A = \frac{\alpha}{I_s} \right) \quad (2)$$

유도 자기 이방성 K_u 는 열처리 온도, 자화값, 화학 조성 등에 의해 다음 식의 첫째 줄에 따라 변화하며, 둘째 줄의 식은 본 연구에서 다루고 있는 화학 조성에 의한 변화에 대해서 유도 자기 이방성과의 비례 관계만을 간략히 적은 것이다[10].

$$K_u = - \frac{A}{kT_a} [M_s(T_a) / M_s(0)]^2$$

$$[M_s(T) / M_s(0)]^2 x^2(1-x)^2$$

$$\propto \frac{M_s(T_a)^2}{T_a} \quad (3)$$

상기 (3)식의 M_s 는 (2)식의 I_s 와 같이 재료의 포화자화값을 나타낸다. Co 함유량의 변화 x 에 따른 K_u 의 계산값 변화를 Fig. 5에 실선으로 나타내었다. K_u 의 계산값은 $x=0$ 과 $x=1$ 에서 영의 값을 가지며, $x=0.5$ 에서 최대값을 가지는데 실험으로부터 얻은 조성에 따른 H_j 값의 변화와 비교해 보기 위해 $x=0$ 과 $x=0.5$ 에서 계산값 K_u 가 실험값 H_j 와 일치하도록 Curve fitting 하여 보았다. 한편, H_j 를 조성에 강하게 의존하는 항과 약하게 의존하는 항으로 갈라보면 다음과 같다.

$$H_j(K_u, \alpha) = H_k + \Delta H_d(a) - H_D + H_s$$

$$= AK_u + B \quad \left(A = \frac{\alpha}{I_s}, \right.$$

$$\left. B = \Delta H_d(a) - H_D + H_s \right)$$

$$= ax^2(1-x)^2 + b \quad (4)$$

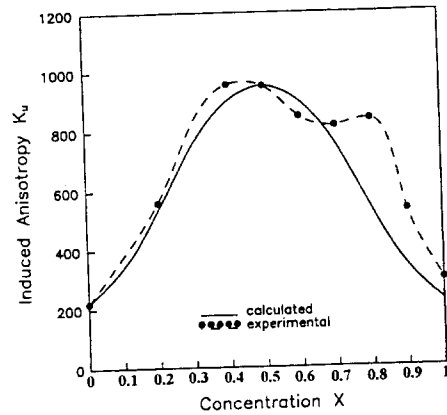


Fig. 5. K_u as a function of concentration x .

Fig. 5에서 보는 바와 같이 $x=0$ 과 $x=0.5$ 에서의 두 값으로부터 구한 상수 a, b 로부터 그린 계산값이 실험값 H_j 와 매우 유사한 경향을 보인다. $x=0.7, 0.8, 0.9, 1$ 에서 실험값이 높은 것은 다음 계산으로부터 구한 Table. III에서 볼 수 있는 바와 같이 이들 조성에서의 H_D 가 조금 작기 때문이라고 해석할 수 있다. 각 조성을 갖는 비정질 자성 합금 리본의 H_D 는 리본의 칫수와 자화를 측정함으로써 계산할 수 있는 것이어서 아래에 H_D 의 각 조성의 리본에서의 계산값을 구해 보았다. 리본의 반자장은 다음 식에 의하여 계산할 수 있다.

$$H_D = L \times I_s \quad (5)$$

여기서 L 은 리본축의 반자장 상수로 리본의 모양을 general ellipsoid라고 가정할 때 앞에서와 같이 다음과 같은 식에 의해서 계산할 수 있다[11].

$$\frac{L}{4\pi} = \frac{bc}{a^2} \left(\ln \left(\frac{4a}{b+c} \right) - 1 \right) \quad (6)$$

즉, 리본의 길이(a), 폭(b), 두께(c) 등의 칫수에 따라 반자장 상수(L)을 구할 수 있다. 각 조성의 리본의 칫수를 측정된 후 상기의 식에 넣어 계산하여 얻은 리본의 축방향의 반자장 상수 L 은 다음 Table. I과 같다.

한편 각 조성의 비정질 자성 합금의 포화 자화값을 VSM으로 측정된 결과는 Table. II에 나타내었다.

따라서, 이 두 값으로부터 반자장 세기 H_D 를 계산하여 Table. III을 얻었다.

shift field H_s 는 무자장 중에서 열처리하였을 때 측정하지 않았는데, 그 이유는 $\lambda_s \neq 0$ 인 조성에서는 보자력값이 커서 $\lambda_s \neq 0$ 의 조성에서처럼 H_s 를 구할 때 H_c 값을 무

Table. I. Variation of demagnetizing factor along the ribbon axis.

Composition (x)	L
0	3.265×10^{-4}
0.2	2.665×10^{-4}
0.4	2.705×10^{-4}
0.5	3.083×10^{-4}
0.6	2.776×10^{-4}
0.7	2.896×10^{-4}
0.8	2.776×10^{-4}
0.9	2.776×10^{-4}
1	2.776×10^{-4}

Table. II. Variation saturation magnetization.

Composition (x)	I_s (emu / cc)
0	1050.6
0.2	1302.8
0.4	1146.7
0.5	869.4
0.6	954
0.7	768.2
0.8	845.5
0.9	652.5
1	674.4

Table III. Variaton of demagnetizing field.

Composition (x)	H_D (mOe)
0	343
0.2	346
0.4	310
0.5	268
0.6	265
0.7	223
0.8	235
0.9	118
1	187

시할 수 없어서 믿을 만한 H_s 값을 M-H 곡선으로 부터 얻기 곤란하였기 때문이었다. 조성에 따른 H_s 값의 변화에 대해서는 좀더 면밀한 검토가 필요하겠으나 본연구에서는 조성에 따라 보다 강하게 의존하리라고 예상되는

K_u 의 조성 변화 의존성만을 검토하였다.

Fig. 4에서 H_j 가 조성에 따라 변화하는 것은 조성에 따라 유도 자기 이방성이 변화하기 때문임을 알 수 있었다. 유도 자기 이방성은 서로 다른 두 종류의 원자간의 내부 교환 확산에 의한 방향성 규칙에 의해 유발되는데, Fe나 Co만 함유하고 있는 경우에도 작은 H_j 값을 가지는 것은 금속-금속간의 방향성 규칙에 의해서 뿐만 아니라 금속-비금속간에도 작지만 방향성 규칙에 의해 유도 자기 이방성이 유발하기 때문이다[10].

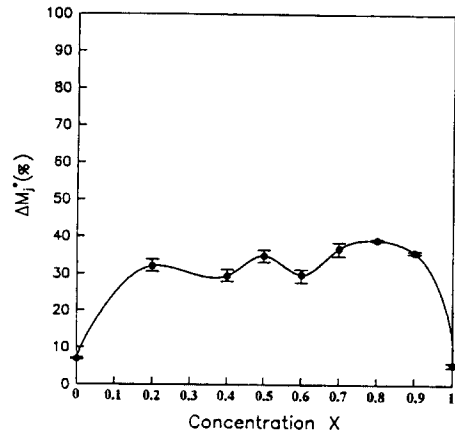


Fig. 6. Compositional dependence of ΔM_j^* in $(Fe_{1-x}Co_x)_{75}Si_{10}B_{15}$ amorphous alloys.

조성 변화에 따른 magnetization jump ΔM_j^* 를 보면 (Fig. 6), Co 함유량 $x = 0.7, 0.8, 0.9$ 에서 35% 이상의 큰 값을 가지며, 비대칭 자화 반전 효과가 미흡한 Fe나 Co만을 함유하고 있는 경우에는 그 값이 작아서 5~7%에 불과하였다. 이러한 결과는 magnetization jump ΔM_j^* 가 두 가지 금속이 비슷한 양으로 함유된 합금의 경우에서 열처리에 의해서 유도되는 비대칭 자화 반전 효과가 더 크다는 사실과 영자왜 조성 $[(Fe_{0.06}Co_{0.94})_{75}Si_{10}B_{15}]$ 에 가까울수록 비대칭 자화 반전 효과가 더 강하게 생길 수 있음을 시사한다.

조성 변화에 따른 reversible magnetization ΔM^* (Fig. 7)는 Fe나 Co 한가지 금속만을 함유하고 있는 경우 120%이상의 높은 값을 보였으며 두 금속을 모두 함유하고 있을 때 100% 이하의 작은 값을 보였으나, Co 함유량 $x = 0.6, 0.7$ 에서 110% 내외의 값을 가졌다.

조성에 따라 ΔM^* 값이 변화하는 원인을 알아보기 위해 비대칭 자화 반전 효과가 나타나지 않게 포화자장 5000 mOe를 인가하여 열처리한 후 ΔM^* 값의 변화를 알

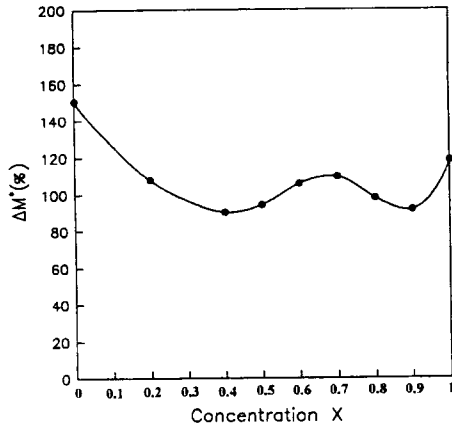


Fig. 7. Compositional dependence of ΔM^* in $(Fe_{1-x}Co_x)_{75}Si_{10}B_{15}$ amorphous alloys.

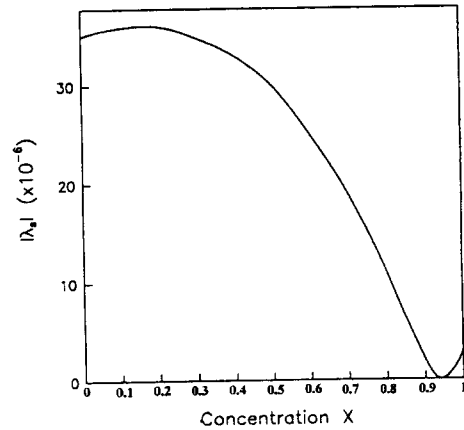


Fig. 9. Compositional dependence of λ_s in $(Fe_{1-x}Co_x)_{75}Si_{10}B_{15}$ amorphous alloys.

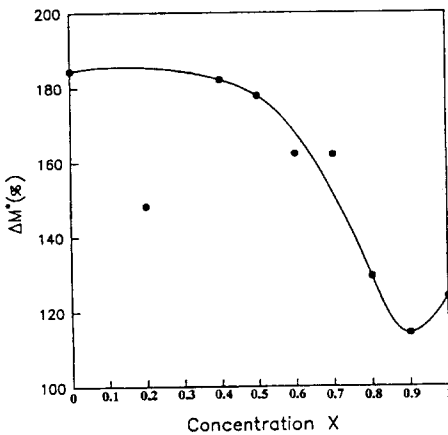


Fig. 8. Compositional dependence of ΔM^* annealed in 5000 mOe.

아보았다(Fig. 8). Fe만 함유하고 있을 때 ΔM^* 값은 180 % 이상 증가하였고 Co 함유량이 증가함에 따라 ΔM^* 값에서의 증가량은 감소하였다. Co 함유량 $x = 0.9$ 에서 최소값을 가지나 110 %를 상회하는 값으로서 급냉 리본의 총 자화 변화량과 비교할때 모든 조성에서 열처리후 ΔM^* 가 크게 증가하였다. 이것은 열처리에 의한 stress relaxation 효과에 의해 잔류 응력이 크게 감소하였기 때문이라 생각된다.

조성이 변화함에 따라 ΔM^* 값이 변화하는 원인을 보다 면밀히 검토하기 위해서 $(Fe_{1-x}Co_x)_{75}Si_{10}B_{15}$ 비정질 합금 리본에서의 자왜값과 비교하여 보았다(Fig. 9) [10]. 조성 변화에 따른 자왜값의 변화는 Co 함유량이 중

가함에 따라 감소하다가 $x = 0.94$ 에서 영의 자왜를 갖고 Co 함유량이 $x = 0.94$ 이상으로 증가함에 따라 자왜값의 절대값은 다시 증가하였다. 잔류 응력하에서 자왜가 큰 물질은 자기 탄성 에너지 $E_{me} = -2/3 \lambda_s \sigma \cos \theta^2$ 가 증가하여 작은 인가 자장에 의해 쉽게 자화하지 못한다. 따라서 자왜값이 큰 경우 잔류 응력의 감소는 자기 탄성 에너지를 크게 감소시켜 외부 자장 방향으로 자화를 용이하게 한다. Fe만 함유하고 있는 경우 열처리한 후 자화량은 급냉 리본의 자화량에 비해 ΔM^* 이 180 % 이상 증가하였고 자왜값이 작을 경우, 즉 영자왜 조성에 가까운 $x = 0.9$ 에서는 잔류 응력 감소에 의한 자화의 효과가 상대적으로 미미하여 110 %의 최소값을 가졌다.

Fig. 7에서 무자장 열처리에 의한 ΔM^* 의 변화는 열처리 효과와 AMR 효과가 복합적으로 나타난 것이라 볼 수 있다. 따라서 Fig. 8에 나타난 바와 같이 순수한 열처리 효과에 의한 ΔM^* 의 변화와 Fig. 7의 경우와 같이 두 가지 효과를 모두 가지고 있을 때의 ΔM^* 의 변화로부터 순수한 비대칭 자화 반전 효과에 의한 ΔM^* 값의 변화를 구해 보았다(Fig. 10). 즉, 이 두 효과가 ΔM^* 값에 미치는 영향이 독립적이면서도 附加적인 것이기 때문에 열처리 효과에 의한 ΔM^* 증가분과 비대칭 자화 반전 효과에 의한 ΔM^* 감소분을 더한 값을 Fig. 7에서와 같이 두 가지 효과가 복합적으로 작용하였을 때의 ΔM^* 값으로 규정하는 것이 가능하다. 이와 같은 방법으로 Fig. 7과 Fig. 8에서의 두 실험값으로부터 계산하여 얻은 순수한 비대칭 자화 반전 효과에 의해서 지배되는 ΔM^* 값의 조성에 따른 변화는 앞서 알아본 H_c 값의 변화(Fig. 4)와 정반대의 양상을 가진다. 즉, Co와 Fe의 함량이 비슷한 $x = 0.4$ 과

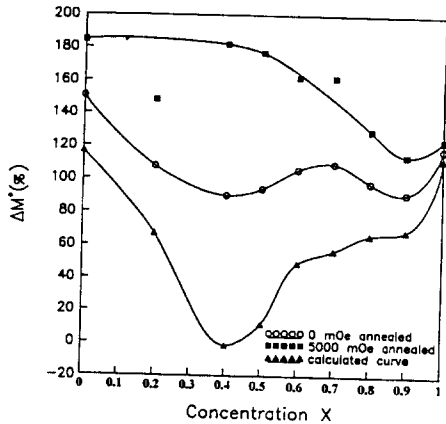


Fig. 10. Calculated ΔM^* as a function of concentration X for $(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$ amorphous alloys.

$x = 0.5$ 에서 H_j 가 최대값을 갖는 반면 ΔM^* 는 같은 조성 범위에서 최소값을 갖는다. 비대칭 자화 반전 효과를 가장 잘 반영하는 값인 jump field, H_j 와 열처리 후 ± 1500 mOe의 자장에서 가역적으로 변화하는 자화량의 급냉 상태의 리본이 보이는 자화량에 대한 비인 ΔM^* 가 합금 조성에 따라 이렇듯 정반대의 의존성을 갖는 것은 비대칭 자화 반전 효과에 의해서 재료가 자기적으로 경화됨을 의미한다.

IV. 결 론

여러가지 조성을 가지는 $(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$ 계 비정질 합금 리본을 무자장 중에서 열처리 온도 380 °C로 하여 16시간 동안 열처리한 후 측정 자장의 최대 크기 1500 mOe를 인가하여 상온에서 그인 자기 이력 곡선의 변화를 연구한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Fe나 Co만을 함유하고 있는 합금의 경우보다 이들 두 금속을 모두 함유하고 있는 합금이 더 큰 jump field, H_j 값을 가졌다. 이는 두 금속을 모두 함유하고 있는 경우가 한 종류의 금속을 함유하고 있는 경우보다 무자장 열처리하는 동안 비정질 합금 리본의 자구벽내에 더 큰 유도 자기 이방성이 형성되었기 때문이다.
2. Co 및 Fe를 모두 함유하되 Co-rich인 합금 조성의

비정질 리본이 더 큰 값의 magnetization jump ΔM^* 를 보인 반면, Fe나 Co만을 함유하고 있는 경우에는 그 값이 작았다.

3. reversible magnetization ΔM^* 는 Fe나 Co 한가지 금속만을 함유하고 있는 경우가 두 금속을 모두 함유하고 있을 때보다 더 큰 값을 보였다. 무자장 열처리 후 합금 조성에 따른 이러한 ΔM^* 의 변화는 열처리에 의한 잔류 응력 감소 효과와 AMR 효과가 복합적으로 나타난 것이라 볼 수 있다.

References

- [1] US Patent 5029291, July 2, 1991 : K. H. Shin, Y. Peter Zhou and C. D. Graham, Jr., IEEE Trans. Magn., **MAG-28**, 2772(1992).
- [2] R. Schäfer, Wing K. Ho, J. Yamasaki, A. Hubert, and Floyd B. Humphrey, IEEE Trans. Magn., **MAG-27**, 3678(1991).
- [3] K. H. Shin, C. D. Graham, Jr. and Peter Y. Zhou, IEEE Trans. Magn., **MAG-30**, 4791 (1994).
- [4] C. K. Kim, R. C. O'Handley and W. K. Ho, IEEE Trans. Magn., **MAG-31**, to be published.
- [5] Kyung-Ho Shin : Ph. D. Thesis, Univ. of Pennsylvania (1992).
- [6] H. Fujimori, H. Yoshimoto, and T. Masumoto, J. Appl. Phys. 52, 1893(1981)
- [7] J. Yamasaki, K. Mori, K. Watari and K. Narita, IEEE Trans. Magn. **MAG-20**, 1855 (1984).
- [8] X. Z. Dong and H. Kronmüller, Phys. Stat. Sol. (a) **70**, 451(1982).
- [9] H. Fujimori, 'Proc. 5th Int. Conf. on Rapidly Quenched Metals', Ed. S. Steeb, Vol. II, North-Holland (1984) pp. 1101.
- [10] H. Fujimori, Amorphous Metallic Alloys, Ed. F. E. Luborsky, Butterworths, London / Washington 1983 (p. 300).
- [11] J. A. Osborn, Phys. Rev., **67** 351(1945).

Variation of Asymmetric Hysteresis Loops with Chemical Composition of Amorphous Ferromagnetic Alloys

K. H. Shin

*Magnetic Thin Film Lab. Korea Institute of Science and Technology,
Seoul, 136-791 Korea*

S. H. Min and J. R. Rhee

Dept. of Physics, Sookmyung Women's University, Seoul 140-742 Korea

(Received 26 June 1995, in final form 18 July 1995)

In order to investigate the origin of the asymmetric magnetization reversal effect, we studied the variation of magnetic hysteresis loops with the alloy composition in amorphous ferromagnetic alloy ribbons of $(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$ system annealed at 380 °C for 16 hours in a zero field condition. The asymmetric magnetization reversal effect developed more strongly in amorphous ribbons having two metallic components than in ribbons having a single metallic component. The effect developed more strongly in ribbons showing a smaller value of the saturation magnetostriction. The development of the asymmetric magnetization reversal effect was affected by the ratio of two metallic components as well as the magnitude of the saturation magnetostriction.