

비정질 $Tb_{45.7}Fe_{54.3-x}Co_x$ 및 $Tb_{50.2}Fe_{49.8-x}Co_x$ ($0 \leq x \leq 9.6$) 합금박막의 자기변형 및 자기적 특성

최용석 · 조성수 · 윤기갑 · 이완수 · 이 영* · 김종오*

배전기술센터, 한전 전력연구원
*충남대학교 고기능성소재연구센터

Magnetostrictive and Magnetic Properties of Amorphous $Tb_{45.7}Fe_{54.3-x}Co_x$ and $Tb_{50.2}Fe_{49.8-x}Co_x$ ($0 \leq x \leq 9.6$) Alloy Thin Films

Y.S. Choi, S.S. Cho, G.G. Yoon, W.S. Lee, Ying Li* and C.O. Kim*

Power Distribution Technology Center, Korea Electric Power Research Institute, 103-16 Munjidong, Yusung-gu, Taejeon 305-380

*Research Center for Advanced Magnetic Materials, Chungnam National University, Gongdong 220, Yusung-gu, Taejeon 305-764

(2001년 6월 30일 받음, 2001년 8월 10일 최종수정본 받음)

초 록 비정질 $Tb_{45.7}Fe_{54.3-x}Co_x$ 및 $Tb_{50.2}Fe_{49.8-x}Co_x$ ($0 \leq x \leq 9.6$) 합금박막의 자기적 특성 및 자기변형특성에 대하여 체계적으로 조사하였다. 박막제조는 Fe 타겟에 Tb, Co 소편으로 구성된 복합타겟 방식의 rf 마그네트론 스퍼터링법에 의해 제조하였다. XRD 조사에 의한 박막의 미세구조는 잘 발달된 비정질 구조를 나타내었다. $Tb_{45.7}Fe_{54.3-x}Co_x$ ($x=2 \sim 4$)에서 우수한 고유자기 변형특성 및 저자기장자기변형특성을 얻었다. 즉, 100 Oe의 저자기장에서 130ppm의 자기변형을 나타내었으며 고유자기변형(인가 자기장, 5 kOe)은 330ppm에서 400ppm으로 증가하였다.

Abstract The magnetic and magnetostrictive properties of amorphous $Tb_{45.7}Fe_{54.3-x}Co_x$ and $Tb_{50.2}Fe_{49.8-x}Co_x$ ($0 \leq x \leq 9.6$) thin films have systematically been investigated. The films were fabricated by rf magnetron sputtering using a composite target which consists of a Fe plate and Tb, Co chips. The microstructure mainly consists of an amorphous phase. Excellent intrinsic and low magnetic-field-magnetostrictive properties were achieved in $Tb_{45.7}Fe_{54.3-x}Co_x$ ($x=2 \sim 4$). The magnetostriction of 130 ppm was obtained with low field of 100 Oe. The intrinsic magnetostriction(applied field, 5 kOe) were increased from 330ppm to 400ppm.

Key words : magnetostriction effects, amorphous materials, thin films, sputtering

1. 서 론

거대 자기변형현상을 보이는 피토류-철계 합금박막은 마이크로 디바이스의 구동용 재료로서 우수한 특성을 가지고 있기 때문에 이에 대한 연구가 90년대 초반부터 많이 진행되어 왔다.^{1,2)} R-Fe합금의 잘 알려진 응용 상 문제점은 이들 합금의 큰 결정자기이방성 때문에 거대 자기변형을 달성하기 위해서는 매우 큰 자기장이 필요하다는 것이다. 최근 비정질상의 Tb-Fe 합금박막에서 응용 상 필수적인 낮은 자기장에서 큰 자기변형특성의 연구결과가 있었다.³⁾ 한편, Tb-Fe 합금박막의 비정질화는 결정자기이방성의 감소로 인해 낮은 자기장에서의 민감성을 증가시키지만, 이 재료의 강자성 성질이 사라지는 큐리온도(T_c)의 감소를 초래한다.⁴⁾ 비정질 Tb-Fe 합금은 Tb과 Fe간의 반평행한 결합을 하고 Fe-Fe와 Tb-Tb 간에는 평행한 결합을 하는 페리자성특성을 나타내고, 비정질의 불규칙한 구조에 의해 비공선적(noncollinear)인 스핀 배열을 하는 sperimagnetic의 특성을 나타낸다.⁵⁾ 강자성 원소중 Co는 강한 강자성 결합을 하고 가장 높은 T_c를 나타낸다. TbFe₂ 결정질합금에서 Fe를

Co로 일부 치환하여 작은 함량의 Co 첨가에 따라 큐리온도가 증가하고 있음을 보고하였다.⁶⁾ 또한 sperimagnetic을 나타내는 Dy-Co 합금에서 Co 원소의 자기 모멘트들은 collinear한 배열을 한다고 보고하였다.⁷⁾

Tb-Fe 자기변형합금 박막의 응용 시 중요한 특성인 자기장 민감성 증대를 위한 연구는 활성화되었으나 큐리온도에 대한 연구 및 노력이 미미한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 자기적 민감성 우수한 Tb-Fe 비정질 합금 박막을 제조하여 큐리온도특성을 개선하기 위해 $Tb_{45.7}Fe_{54.3}$ 및 $Tb_{50.2}Fe_{49.8}$ 합금박막에 강한 강자성 결합을 하는 Co를 소량 첨가하여 자기적특성 및 자기변형 특성에 대해 조사하였다.

2. 실험 방법

약 1 μ m의 TbFeCo 박막을 Si (100) 기판에 고주파 플라나 마그네트론(RF planar magnetron) 스퍼터링 장치를 이용하여 제조 하였다. 박막제조시의 스퍼터링 가스로는 순도 99.999%의 Ar을 사용하였으며, 스퍼터링 압력은 2mTorr와 5mTorr로 고정하였다. 잔류가스의 영향을 최소화하기 위하여 진공조 내의 진공도를 7×10^{-7} Torr 이하로

하였으며 타겟과 기관간의 거리는 6cm, rf 투입전력은 300W로 하였다. 자기변형 측정용 시편의 경우 측정의 정확도를 증가시키기 위해서는 가능한 얇은 기관을 사용하는 것이 요구되기 때문에 용도에 따라 웨이퍼를 다음과 같이 사용했다. 박막의 조성과 미세구조 분석 및 일반 자기적 특성을 측정하기 위한 박막을 제조하기 위해서는 $10 \times 10 \text{ mm}^2$, 두께 0.5mm의 기관을 사용하였고, 자기변형을 측정하기 위한 시편은 $10 \times 20 \text{ mm}^2$, 두께 0.2mm의 Si기관(100)을 사용하였다. 사용한 타겟트는 직경 4inch, 순도 99.9%의 Fe 타겟트였으며, 타겟트 위에 Tb, Co 등의 소편($5 \times 5 \text{ mm}^2$)을 원주상으로 배치한 복합타겟트(composite target) 방식으로 구성하였다. 성막시 소편의 개수를 조절하면서 박막의 조성을 변화시켰다.

박막의 두께는 stylus 형의 surface profiler를 이용하여 측정하였고 조성은 EPMA (Electron Probe Micro Analysis), 박막의 두께방향에 따른 조성편차 및 박막표면에서의 산화 등은 AES (Auger Electron Spectroscopy)로 분석하였다. 박막의 자기적 성질은 진동시료형자속계 (Vibrating Sample Magnetometer)를 사용하여 상온에서 M-H 곡선을 최대 15 kOe의 자장을 인가하여 측정하였다. 큐리온도는 10 kOe의 자기장을 가한 상태에서, 진공 중에서 시료의 온도를 올리면서 측정된 M-T (자화-온도) 곡선으로부터 구하였다. 박막의 결정구조와 미세 조직은 Cu-K α 선을 이용한 XRD (X-ray diffractometry)를 이용하여 분석하였다.

박막의 자기변형은 광학적 방법을 이용하여 측정하였다. 광학적 방법은 He-Ne 레이저 광을 이용하여 박막이 입혀진 기관이 자장을 인가함에 따라 휘어지는 정도를 측정하여 박막의 자기변형을 측정하는 방법이다. 이 방법은 이미 상용화되어 있는 것으로 본 연구에서는 일본 Naruse 사가 제작한 장비를 이용하여 박막의 자기 변형을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

Tb-Fe 비정질 합금박막에서 Fe에 대한 Co의 치환 효과를 관찰하기 위하여 스퍼터링조건을 변화시키면서 수 차례의 실험을 수행하여 많은 시료를 제조하였으며, 이러한 시료들 중에서 Tb의 조성을 고정하여 Tb의 원자 %는 거의 같으면서 Co의 함량은 다른 시료들을 선택하였다. 본 연구에서 선택한 일정한 Tb조성을 갖은 합금 계는 2가지 종류이며, 구체적으로는 다음과 같다: $\text{Tb}_{45.7}\text{Fe}_{54.3-x}\text{Co}_x$ 및 $\text{Tb}_{50.2}\text{Fe}_{49.8-x}\text{Co}_x$, $0 \leq x \leq 9.6$ (여기서 x는 원자 %로 나타낸 Co 함량을 의미한다.) 각각의 합금 시리즈에서 조성비의 편차는 1% 이내이다.

Fig. 1은 각 조성의 X선 회절의 결과이다. Fig. 1(a)의 $\text{Tb}_{45.7}\text{Fe}_{54.3-x}\text{Co}_x$ 인 경우 Co가 첨가되지 않은 상태에서 조성에서 결정질 peak가 보이지 않고 전형적인 비정질을 나타내고 있으며 Co의 첨가에 의해서도 거의 미세구조의 변화는 관찰 되지 않았다. Fig. 1(b)의 $\text{Tb}_{50.2}\text{Fe}_{49.8-x}\text{Co}_x$ 의 조성에서 Co를 첨가하지 않았을 경우에는 31° 부근에서 미소한 α -Tb의 peak가 관찰되고 있다. 이는 과포화된 Tb이

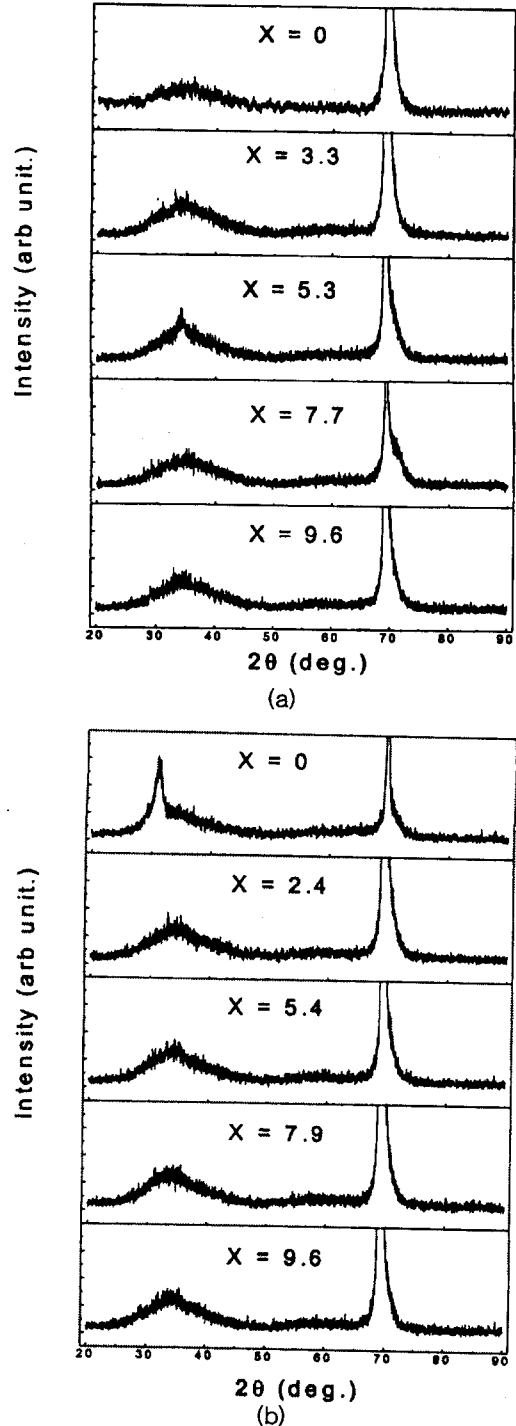


Fig. 1. (a) X-ray diffraction patterns for a series of $\text{Tb}_{45.7}\text{Fe}_{54.3-x}\text{Co}_x$ thin films. (b) X-ray diffraction patterns for a series of $\text{Tb}_{50.2}\text{Fe}_{49.8-x}\text{Co}_x$ thin films.

석출한 것으로 사료된다. 이 조성에서 Co를 첨가하자 α -Tb의 peak가 관찰되지 않는 전형적인 비정질상을 나타내어 Co 첨가가 α -Tb 석출 거동을 억제한 것으로 생각된다.

강자성체의 큐리온도는 여러 가지 인자중 exchange stiffness에 의해 가장 큰 영향을 받으며 이는 교환작용의 크기와 인접한 원자 수의 함수이다. 특히 비정질의 경우 결정질과 달리 조성뿐만 아니라 미세구조에 따라 교환상호작용의 크기와 인접 원자 수가 달라지게 된다. Heisenberg 모델에 의하면 교환결합은 구성이온간의 거리, 국부적 자기모

멘트들간의 자, 교환적분에 의존한다. 비정질의 미세구조가 장범위 규칙성이 없는 불균일한 구조를 가지므로 국부적 자기모멘트의 요동에 의해 큐리온도가 결정질과 비교하여 낮음을 잘 설명해준다.

Fig. 2에는 Tb_{45.7}Fe_{54.3-x}Co_x 및 Tb_{50.2}Fe_{49.8-x}Co_x 조성의 Co의 함량에 따른 T_c 변화에 대한 결과를 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 Co를 첨가하지 않았을 때 각각의 조성에서 165°C, 169°C의 T_c를 나타내다가 Co를 미량 첨가에 따라 약간 감소하여 첨가량 9.6at%까지 증가시켜도 큐리온도는 거의 변하지 않고 약간 증가하는 경향을 보이고 있어, 결정질 TbFe₂의 Co 첨가 효과에 대한 연구와³⁾ 상이한 결과를 나타내고 있다. 이러한 이유는 본 연구에 의해 제조된 Tb_{45.7}Fe_{54.3-x}Co_x 및 Tb_{50.2}Fe_{49.8-x}Co_x 합금박막의 경우 매우 잘 발달된 비정질상을 나타내고 있어, (특히 Tb_{50.2}Fe_{49.8-x}Co_x 합금박막의 경우 Co가 첨가됨에 따라 α-Tb 석출을 억제한 거동을 볼 수 있었다) 이들 합금 박막의 구조적 불규칙으로 인해 Tb 자기모멘트의 비공선적인 배열을 소량의 Co 첨가가 큰 영향을 주지 못하고 오히려 큐리온도의 감소를 초래한 것으로 생각된다. 또한 이들 Co 원소는 Fe와의 강자성 결합을 하고 Tb과의 반평행한 ferrimagnetic을 형성하므로 Tb 부격자의 noncollinear한 배열에 영향을 미치지 못하여, 결과적으로 Tb-Fe합금의 교환 작용 및 인접원자간의 강자성 결합이 분산된 것으로 사료된다.

Fig. 3은 비정질 Tb_{45.7}Fe_{54.3-x}Co_x 및 Tb_{50.2}Fe_{49.8-x}Co_x 합금의 Co 첨가량이 증가함에 따른 M₁₅의 의존성을 나타내는 그림이다. M₁₅는 15 kOe의 인가자장을 가해줄 때 나타낸 자화값이다. Tb-Fe합금은 ferrimagnetic의 성질을 나타내며 Tb함량 22%에서 실온의 자화가 0이 되는 보상 조성이 존재한다. Tb_{45.7}Fe_{54.3} 및 Tb_{50.2}Fe_{49.8}합금의 M₁₅는 각각 5320 G 4790 G를 나타내어 ferrimagnetic 특성을 잘 나타내고 있어 Lim³⁾ 등의 연구와 잘 일치하고 있다. 한편 두 조성 모두 Co가 첨가됨에 따라 M₁₅는 약간 증가하다가 감소하는 경향을 나타내고 있다. Tb-Fe 합금의 전체 자기모멘트는 서로 반평행인 Tb과 Fe 각각의 부격자(subnetwork) 자기모멘트의 차로 주어진다. Co 함량이 4at% 이상 증가함에 따라 두 조성에서 M₁₅가 감소한 것은 Fe의 자기모멘트방향으로 첨가된 Co의 자기모멘트가 배열하여 Fe-Co합금화에 의한 천이금속 부격자의 자화값이 증가하므로 희토류 금속과 천이금속간의 부격자 자기모멘트의 차가 감소하고 Tb-Fe합금의 순 자기모멘트를 감소시켰기 때문이라 생각되어진다. Fe-Co 합금에서 Co함량이 증가함에 따라 자화값이 증가한다는 것은 잘 알려진 사실이다. 반면, Co를 2~4at% 첨가시 M₁₅가 약간 증가한 결과는 M₁₅-Co 함량곡선에서 면내이방성이 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 Co를 첨가하지 않은 경우 0.38의 낮은 각형비를 나타내다가, Co를 2.5at% 첨가하자 0.6으로 증가한 Tb_{45.7}Fe_{54.3-x}Co_x의 조성에서 면내이방성이 증가함에 따라 자화가 용이해지고 이에 따른 자화값이 증가한 것으로 보여진다. 따라서 각 조성의 Co 첨가량 변화에 따른 M₁₅의 변화

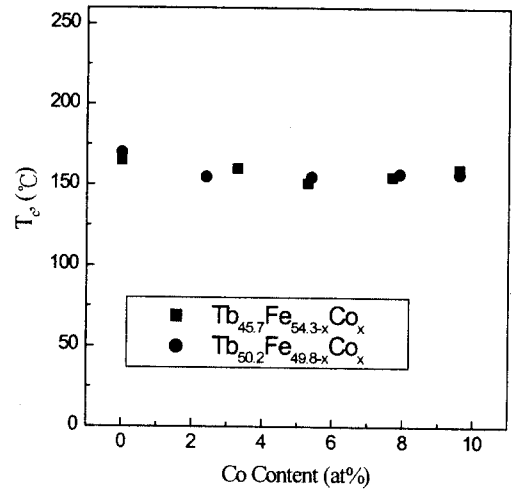


Fig. 2. Curie temperature vs Co content for Tb_{45.7}Fe_{54.3-x}Co_x and Tb_{50.2}Fe_{49.8-x}Co_x thin films.

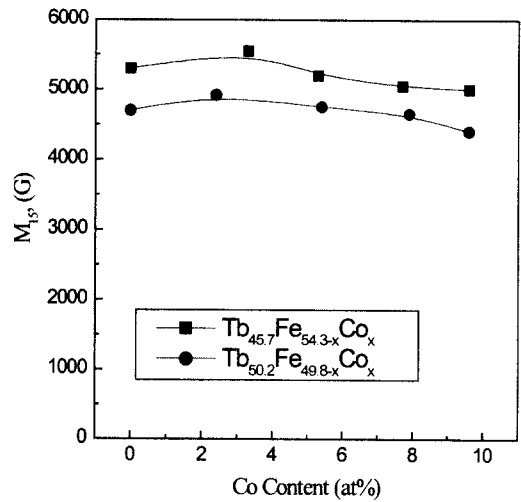


Fig. 3. Dependence of M₁₅ on Co content for Tb_{45.7}Fe_{54.3-x}Co_x and Tb_{50.2}Fe_{49.8-x}Co_x thin films.

는 각형비 및 자기모멘트의 배열의 복합적인 결과로 설명되어야 한다고 생각된다. 본 연구결과에 의한 두 조성의 합금은 잘 발달된 비정질 상으로 결정질에서의 자기적 특성과는 다른 경향을 나타낼 수 있다. 따라서 이러한 경향은 비정질 상의 미세구조 및 근접원자간의 배위수 등과 관련되어 설명되어야 할 것으로 생각되며 좀더 세심한 연구가 진행 중이다.

Fig. 4는 Co 첨가에 대한 두 조성에서의 각형비 (M_r/M₁₅)의 영향이다. 각형비특성은 박막의 면내이방성을 잘 표현해준다. 즉 각형비가 높을수록 강한 면내이방성 특성을 나타낸다. 자기변형박막의 응용시 박막에 자기장을 가해 주는 방향이 면 방향이므로 면 방향으로 이방성이 강한 특성을 요구한다. 특히 박막의 응용시 가해 줄 수 있는 자기장의 한계가 수백 Oe로 한정되기 때문에 강한 면내이방성은 자기장 민감성측면에서 상당히 중요한 특성이다. Lim³⁾ 등의 연구결과에 의하면 Tb 함량이 증가함에 따라 면내이방성이 증가하여 50at% Tb 조성에서 가장 강한 면내이방성을 보이고 있는데 이는 본 연구결과와 잘 일치하고 있었

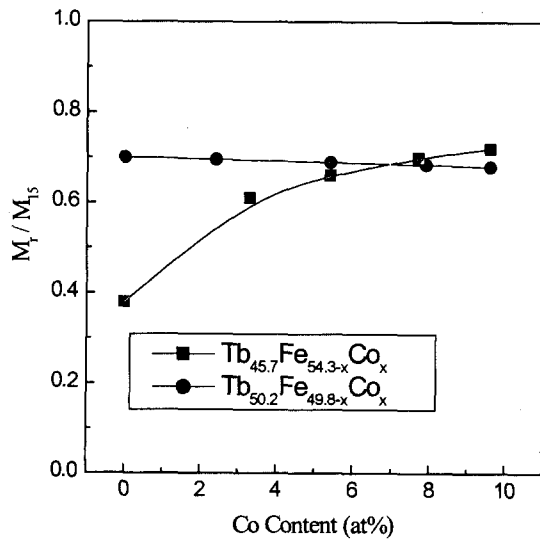


Fig. 4. Dependence of M_r/M_{1s} on Co content for $Tb_{45.7}Fe_{54.3-x}Co_x$ and $Tb_{50.2}Fe_{49.8-x}Co_x$ thin films.

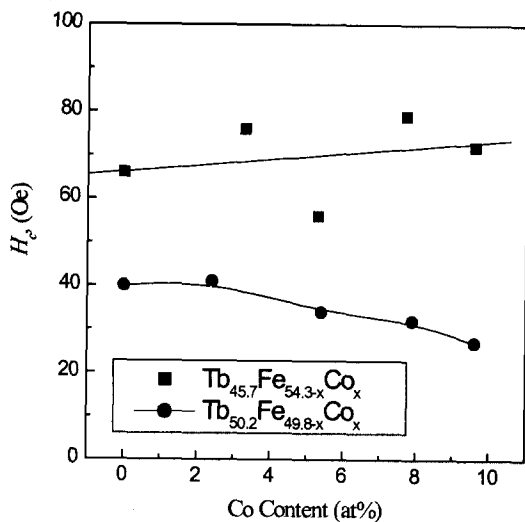


Fig. 5. Dependence of coercivity H_c on Co content for $Tb_{45.7}Fe_{54.3-x}Co_x$ and $Tb_{50.2}Fe_{49.8-x}Co_x$ thin films.

다. $Tb_{45.7}Fe_{54.3-x}Co_x$ 의 조성에서는 Co가 첨가되지 않은 상태에서 0.38의 낮은 각형비를 나타내다가, Co를 2.5at% 첨가하자 0.62로 증가하여 강한 면내이방성을 나타내고 있다. 이러한 결과는 소량 Co첨가에 따라 자기변형의 자기장 민감성이 증대하여 작은 자기장 인가시 높은 자기변형 특성을 나타낼 것으로 예상할 수 있다. Co함량이 증가함에 따라 각형비 약간씩 증가하여 9.6at% 첨가시 면내이방성이 우수했던 $Tb_{50.2}Fe_{49.8-x}Co_x$ 조성과 유사한 각형비를 나타내고 있다. $Tb_{45.7}Fe_{54.3-x}Co_x$ 의 낮은 각형비를 나타냈던 조성에서는 Co 첨가에 의해 면내이방성이 향상되는 것으로 보이고 있으나, 각형비 0.7의 면내이방성이 이미 잘 발달된 $Tb_{50.2}Fe_{49.8-x}Co_x$ 조성에서는 Co의 첨가와 상관없이 각형비가 거의 변하지 않았다. 본 연구에서 이방성은 자기이력곡선을 면내 방향과 면에 수직인 자기장을 가하면서 측정하여 비교함으로써 결정하였다.

Fig. 5는 Co 함량에 따른 보자력에 대한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 $Tb_{45.7}Fe_{54.3-x}Co_x$ 의 조성에서는 Co의 첨가량에 따라 증가하거나 감소하는 뚜렷한 경향은 보이지 않고 있으며, $Tb_{50.2}Fe_{49.8-x}Co_x$ 합금박막의 경우는 Co가 첨가됨에 따라 약간 감소하였다. Tb-Fe합금에서 보자력은 박막의 이방성과 관련이 있다고 보고하고 있는데, 본 연구의 경우 $Tb_{45.7}Fe_{54.3-x}Co_x$ 의 조성에서는 면내이방성이 증가하여 보자력의 감소를 예상할 수 있으나, 감소 및 증가의 뚜렷한 경향을 찾아 볼 수 없었다.

Fig. 6a는 자기장 100 및 5000 Oe에서 측정된 자기변형의 Co 함량에 따른 영향을 조사한 결과이다. $Tb_{45.7}Fe_{54.3-x}Co_x$ 의 조성에서 Co 3.2at%의 작은 함량 첨가시 100 Oe 자기장 인가시 38ppm에서 120ppm으로 상당히 큰 증가를 보이고 있으며, 5000 Oe에서는 400ppm으로 Co를 첨가하지 않은 상태(130ppm)보다 증가한 것을 볼 수 있다. 이러한 자기변형특성의 변화는 고유 포화 특성이라 할 수 있는 5000 Oe에서의 자기변형특성 및 저자기장에서 자기변형특성이 동시에 개선된 결과로 볼 수 있다. 이러한 이유는 앞에서 언급한 Co 첨가에 따른 포화자화특성과 각형비호로 설명할 수 있다. 즉 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 Co를 3.2at% 첨가시 포화자화의 증가 및 Fig. 4에서 나타난 각형비의 증가로 고유자기변형특성 및 낮은자기장 민감성이 개선된 것으로 이해되며, 응용시 중요한 특성인 낮은 자기장에서 자기변형특성의 증가는 자기변형특성을 응용하기 위해 매우 바람직한 결과라 할 수 있다. 한편 $Tb_{45.7}Fe_{54.3-x}Co_x$ 의 조성에서 4at% 이상 Co를 첨가시 5000 Oe의 경우 고유 자기변형특성은 대체적으로 감소한 반면에 100 Oe의 경우에는 거의 변화가 없었으며, 이러한 결과는 Co 약 2~3at% 첨가가 $Tb_{45.7}Fe_{54.3-x}Co_x$ 합금 박막의 특성개선에 가장 용이한 것으로 판단된다. 한편, Fig. 6b에서의 면내이방성이 잘 발달되어 있던 $Tb_{50.2}Fe_{49.8-x}Co_x$ 합금 조성의 경우에는 Co 첨가에 따라 자기변형특성이 거의 변화하지 않고 오히려 약간 감소하는 경향을 나타내고 있다. 자기변형의 Co 첨가에 따른 특성변화를 정리해보면, 다음과 같다.

Tb-Fe 합금박막의 잘 발달된 면내이방성이 응용시 중요한 특성이라는 것을 잘 설명해준다. 즉 낮은 자기장에서 자기 변형특성이 개선되기 위해서는 면내이방성이 잘 발달되어야 하며 $Tb_{45.7}Fe_{54.3-x}Co_x$ 의 조성에서 3.2at% Co를 첨가함에 따라 면내이방성이 향상되어 낮은 자기장에서의 자기변형특성이 크게 향상되었으며, 이와 동반하여 포화자화값의 증가가 고유 포화 자기변형 특성이 증가하였다. 그러나 면내이방성이 잘 발달되어 있던 높은 Tb조성의 합금 박막에서는 제 3원소의 영향으로 오히려 고유의 자기변형특성을 감소시킨 것으로 생각된다. 과거 연구¹⁻³⁾ 결과에 의하면 Tb-Fe 합금박막에서 낮은 자기장에서의 자기변형이 최대인 조성은 다소 높은 Tb 함량일 때이었다. 이러한 조성 범위에서 고유의 포화자기변형은 작는데, 본 연구 결과에 의해 고유포화자기변형특성이 작은 $Tb_{45.7}Fe_{54.3-x}Co_x$ 의 조성에서 소량 Co를 첨가하여 고유의 포화자기변형특성도 크게 하고 낮은 자기장에서의 자기변형특성도 개선시킬 수

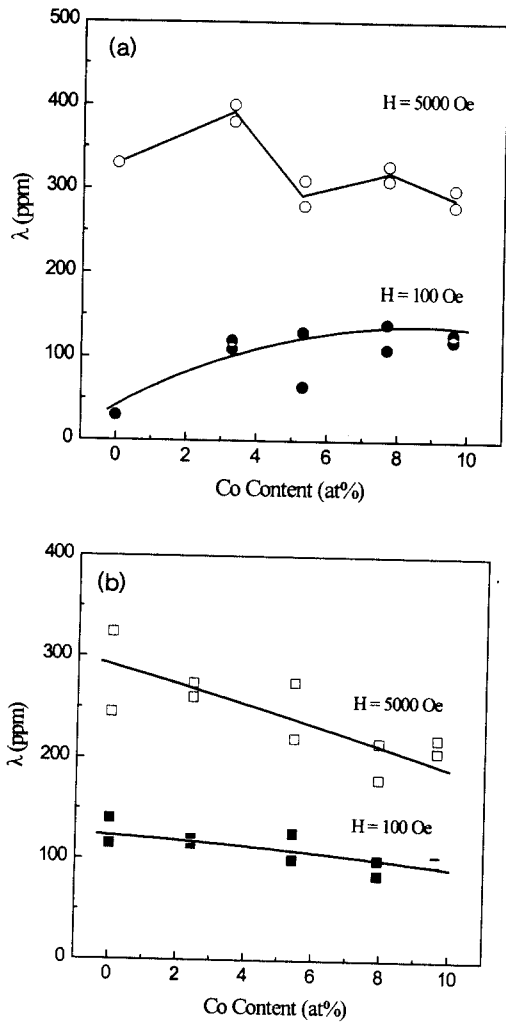


Fig. 6. (a) Magnetostriction λ as a function of the Co content of Tb_{45.7}Fe_{54.3-x}Co_x thin films. (b) Magnetostriction λ as a function of the Co content of Tb_{50.2}Fe_{49.8-x}Co_x thin films.

있었다.

본 연구결과 주안점은 Tb_{45.7}Fe_{54.3-x}Co_x의 조성에서 3.2at% Co를 첨가함에 따라 면내이방성이 향상되어 낮은 자기장에서 자기변형특성이 향상된 것이며, 이러한 연구 결과는 Tb-Fe 합금박막의 응용시 경제적인 효과도 기대할 수 있다. 즉 약 2~3at%의 Co첨가로 Co보다 상대적으로

고가인 Tb함량을 낮출 수 있기 때문이다.

4. 결 론

비정질 Tb_{45.7}Fe_{54.3-x}Co_x 및 Tb_{50.2}Fe_{49.8-x}Co_x 합금박막의 자기적 및 자기변형 성질에 미치는 Co의 첨가 효과를 조사하였다. 자기변형의 응용시 중요한 특성인 자기장 민감성 및 고유 자기변형특성이 Co 첨가에 따라 증가하였다. 구체적으로 Tb_{45.7}Fe_{54.3} 조성 박막에 약 2~3at% Co를 첨가함에 따라 자기장 민감성이 증가하여, 100 Oe의 낮은 인가 자기장에서 130ppm의 우수한 특성의 자기변형박막을 제조할 수 있었으며, 소량의 Co첨가에 따라 포화자화값이 증가하고, 고유자기변형특성이 330ppm에서 약 400ppm으로 증가하였다. 반면에 Co 첨가에 의한 큐리온도 특성 개선 효과는 Co 첨가에 의해 뚜렷한 변화를 관찰하지 못하였으며, 이러한 이유는 이 합금의 비정질 미세조직과 Tb-Fe 비정질 합금의 비공선적(noncolinear)인 자기모멘트 배열을 하는 sperimagnetic 특성으로 설명할 수 있다.

참고 문헌

1. T.Honda, K. I. Arai and M. Yamaguchi, J. Appl. Phys., **76**(10), 6994 (1994).
2. E. Quandt, B. Gerlach and K. Seeman, J. Appl Phys., **76**(10), 7000 (1994).
3. S.H. Lim, Y.S. Choi, S.H. Han, H.J. Kim, T. Shima and H. Fujimori, IEEE Trans. Magn., **33**(5) 3940 (1997).
4. J. Rhyne, S. Pickart and H. Alperin, Phys. Rev. Lett., **29** 1562 (1972)
5. P. Hansen, in Handbook of Magnetic Materials, vol. 6, K. J. Buschow, Ed. Amsterdam, North-Holland, 1991, Chap. 4.
6. A. Dwight, and C. Kimball, Acta, Crys. **B30** 2791 (1974)
7. R. C. Taylor, T. R, McGuire, J. M. D. Coey and A. Gangulee, J. Appl. Phys. **49**, 2885 (1978)
8. H. Kronmuller, J. Appl. Phys., **52** 1859 (1981)