전기용량법에 의한 자기이방성 측정장치*

이용호 · 이연숙 · 신용돌 · 문기원
전북대학교 물리학과

노태환 · 김희중 · 강일구
한국과학기술연구원 금속연구부

(1991년 3월 20일 받음)

전기용량법에 의한 자기이방성 측정장치를 설계 제작하였다. 균일자기장 속에서 원판 또는 구형의 시료가 자기이방성에 의해 받는 토오크를 평행판 축전기의 미소용량 변화로 변환하여, 그것을 변압기 부리지로 검출하였다. 3% Si-Fe 단결정의(100)면에 대한 입방 이방성 K_1은 3.3×10^4 J/m^{3}가 얻어졌으며, 교정에는 Ni선의 형상이방성을 이용하였다. 기타 수종의 시료에 대한 결과도 기존치와 좋은 일치를 보였다.

Ⅰ. 서 론

자기이방성(magnetic anisotropy)은 자성체의 자기특성을 결정하는 여러 인자중 가장 중요한 기초인자의 하나이다. 자기이방성을 측정하는 방법은 여러가지가 있으며, 대별하면 자성체가 자기장에서 받는 토오크를 측정하여 이방성상수를 결정하는 force method와, 시료를 교류자기장속에 놓을때 생기는 자화의 인가자기장에 대한 방향 변화를 탐색코일(search coil)로 측정하는 전자기 유도법의 두종류가 있다. Penoyer가 고안한 torque magnetometer[1]는 힘측정법에 속하며 이방성측정의 주류를 이루고 있으나 매우 고가이다. 또 측정의 메카니즘이 섬세하고 복잡하며, 진동에 약하며 특히 side force와 회전축의 마찰 문제가 난점이다. 본 연구에서는 force method로서, Penoyer의 electromagnetic sensor대신 전기용량법에 의한 torque sensor를 이용하여 자기이방성을 측정하는 장치를 제작하였다.

Ⅱ. 이론적 배경

자기이방성의 원인으로는 결정자기이방성, 형상자기이방성, 자기변형에 의한 이방성등 여러가지가 있다. 다음에 그 각각을 요약하여 자기이방성 측정의 이론적 기초를 기술한다.

1. 결정자기 이방성

일반적으로 강자성 결정에 있어서 자발자화는 결정의 특정 방향을 향하려는 경향이 있으며 그 특정방향을 자화용이축이라 한다. Fe 단결정의 용이축은 〈100〉이며 Co에서는 [0001]이다. 이것을 환언하면 단위체적당의 자기적 내부에너지 E_A가 자발자화 I_s의 방향에 의존하며 Fe의 경우에는 I_s의 방향이 [100], [010], [001], [100] …일때 E_A가 최소가 된다는 것이다. Co의 경우에는 3회 대칭축인 C축인 [0001]에 I_s가 향할 때 E_A는 최소값이 되며 $[000\bar{1}]$때도 같은 값이 되어 이 경우를 일축(uniaxial)이방성이라하고 I_s의 C축에 대한 각을 θ라 하면 $E_A(\theta)=E_A(-\theta)$인 대칭성이 성립하기 때문에 E_A의 θ 의존성이 다음과 같은 급수로 전개된다[2].

$$E_A=K_{U1}\sin^2\theta+K_{U2}\sin^4\theta+K_{U3}\sin^6\theta+K_{U4}\sin^6\theta\cos6\phi+\cdots \quad (1)$$

여기서 K_{U1}, K_{U2} 등을 일축이방성 상수라 하며 배각의 공식들에 의해

$$E_A=\frac{1}{2}K_{U1}(1-\cos2\theta)+\frac{1}{8}K_{U2}(3-4\cos2\theta+\cos4\theta)$$

* 본 연구의 일부는 1990년도 과학기술처의 특정연구비의 지원을 받았음

$$+\frac{1}{32}K_{U3}(10-15\cos 2\theta+6\cos 4\theta-\cos 6\theta)$$

$$+\frac{1}{32}K_{U3}(10-15\cos 2\theta+6\cos 4\theta-\cos 6\theta)\cos 6\phi+\cdots \quad (2)$$

으로 고쳐쓸 수 있다. 여기서 ϕ는 α_1, α_2, α_3축을 포함하는 평면에 정사영된 포화자화 I_s의 α_1축에 대한 방위각이다. Fe, Ni등의 입방정계에 있어서는 Co등의 일축이방성보다 대칭도가 훨씬 높아지며, I_s의 방향여현을 α_1, α_2, α_3라 하면 E_A의 대칭성에 의해

$$E_A=K_1(\alpha_1^2\alpha_2^2+\alpha_2^2\alpha_3^2+\alpha_3^2\alpha_1^2)+K_2\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2 +K_3(\alpha_1^2\alpha_2^2+\alpha_2^2\alpha_3^2+\alpha_3^2\alpha_1^2)^2+\cdots \quad (3)$$

등이 되며 K_1, K_2, K_3등을 입방이방성상수(cubic anisotropy constant)라 한다. Fe의 경우 $K_1=4.72\times10^4$ J/m^3, $K_2=-0.075\times10^4$ J/m^{3}이다[3]. [100]에서는 $\alpha_1=1$, $\alpha_2=\alpha_3=0$이므로 $E_A=0$가 되고 [111]에서는 $\alpha_2=\alpha_2=\alpha_3=3^{-1/2}$이므로 $E_A=\frac{1}{3}K_1+\frac{1}{27}K_2+\frac{1}{9}K_3+\cdots$가 되어 Fe에서는 $K_1>0$, $K_1\gg|K_2|$이므로 〈100〉는 자화용이축이 되고 〈111〉은 자화곤난축이 된다.

$$E_A=\frac{1}{8}K_1(1-\cos 4\theta)+\frac{1}{128}K_3(3-4\cos 4\theta+\cos 8\theta) \quad (4)$$

(110)면내에서는 Is와 [001]사이의 각을 θ라 할 때 $\alpha_1=\alpha_2=2^{-1/2}\sin\theta$, $\alpha_3=\cos\theta$가 되어 (3)식은

$$E_A=\frac{1}{32}K_1(7-4\cos 2\theta-3\cos 4\theta)+\frac{1}{128}K_2(2-\cos 2\theta-\cos 4\theta+\cos 6\theta)+\frac{1}{2048}K_3(73-88\cos 2\theta-52\cos 4\theta+24\cos 5\theta+18\cos 8\theta)+ \quad (5)$$

가 된다. 이상을 종합하여 E_A는 일반적으로

$$E_A=A_2\cos 2\theta+A_4\cos 4\theta+2\theta A_6\cos 6\theta+A_8\cos 8\theta \quad (6)$$

의 형식이 되며, 일축이방성의 경우는 (2)를 (6)과 비교하여

$$A_2=-\frac{1}{2}K_{U1}-\frac{1}{2}K_{U2}-\frac{15}{32}K_{U3}(1+\cos 6\phi)\cdots$$

$$A_4=-\frac{1}{8}K_{U2}+\frac{3}{16}K_{U3}(1+\cos 6\phi)\cdots$$

$$A_6=-\frac{1}{32}K_{U3}(1+\cos 6\phi)+\cdots \quad (7)$$

이 되며 입방정계의 (001)면의 경우는

$$A_2=0,\ A_4=-\frac{1}{8}K_1-\frac{1}{32}K_3+\cdots,\ A_6=0,\ A_8=\frac{1}{128}K_3+\cdots \quad (8)$$

이 된다.

2. 형상이방성(Shape Anisotropy)

시료가 자기장속에서 회전할때 시료의 형상이 회전축에 대해 대칭이 아니면 반자기장에 의한 자기퍼텐셜에너지가 방향에 따라 변화하여 형상이방성이 생긴다. 시료의 형상이 x축에 대하여 회전타원체이며 x축이 타원의 장축, y축이 단축이라 가정하고, 이것을 z축과 수직인 균일자기장속에서 z축을 회전축으로 회전시킬때, 외부자기장이 충분히 커서 시료가 포화되면 I_s는 xy면 내에 있다. I_s와 x축사이의 각을 θ라 하고, 시료의 부피를 v라 하면 반자기장에 의한 자기퍼텐셜에너지 U는

$$U=\frac{1}{2\mu_0}I_s^2\,v(N_x\cos^2\theta+N_y\sin^2\theta) \quad (9)$$

가 된다. 여기서 N_x, N_y는 시료의 x축, y축 방향에 대한 반자기장 계수이다. 만일 시료의 모양이 공이면 $N_x=N_y$, 단축=장축이되므로

$$U=\frac{1}{6\mu_0}I_s^2\,v \quad (10)$$

가 되어 이방성은 없어진다. 또 시료가 원판모양이고 그 면이 균일자기장 내에 있을때도 $U=\frac{N_x}{2\mu_0}I_s^2v$가 되어 각도변화는 없어진다. 따라서 시료 고유의 자기이방성을 측정할 때 시료의 모양은 공 또는 원판이라야 한다.

3. 자기변형에 의한 이방성

자성체 내부에 내부응력이 있으면 Villari 효과 즉 역자기변형 효과에 의해 자발자화의 방향이 변화하여 자기이방성이 생긴다. 등방자기변형(isotropic magnetostriction)의 경우, 자기탄성 에너지밀도 E_σ(magneto-elastic energy density)는

$$E_\sigma=-\frac{3}{2}\lambda\sigma\cos^2\theta \quad (11)$$

로 주어진다[4]. 여기서 σ는 내부응력, λ는 자기변형율, θ는 자화용이축과 내부응력 사이의 각도이다. 따라서 θ가 변화하면 자성체의 총 내부에너지가 변화하여 자기이방성이 생기므로 결정자기이방성 측정에 있어서는 $\sigma=0$으로 하기 위해 시료의 열처리등이 바람직하다.

4. Force method에 의한 자기이방성 측정원리

공 또는 원판 형의 시료의 자화용이축이 균일자기장

한국자기학회지 Volume 1, Number 1, June 1991

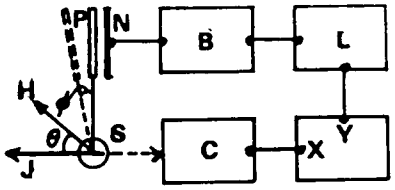

Fig. 1. The block diagram of the anisotropy measurement system.

H와 θ의 각을 갖을때 시료는 H 및 자화용이축을 포함하는 면에 수직한 방향의 토오크 τ를 받으며

$$\tau = -\frac{\partial E_A}{\partial \theta} \quad v \tag{12}$$

인 관계식에 의하여 τ가 구하여진다. E_A는 일반적으로 (6)식과 같이 쓸 수 있으므로, 이것을 (12)식에 대입하면

$$\tau / v = -2A_2 \sin 2\theta - 4A_4 \cos 4\theta - 9A_8 \cos 8\theta + \cdots \tag{13}$$

과 같이되어 θ에 대한 토오크 τ의 그래프가 실험으로 얻어지면, 그 그래프를 Fourier 분석을 하여 A_2, A_4…등을 구하여 이방성상수 K등을 구할 수 있다.

Ⅲ. 측정장치

1. 측정장치의 구성

그림 1은 전기용량법에 의한 자기이방성 측정장치의 개요도이다. 원판 또는 구형의 시료 S는 균일자기장 H 속에 놓이며 H의 방향변화에 따른 토오크를 받아 S에 연결된 축전기의 가동극판 N이 회전하면 N과 축전기의 고정극판 P 사이의 전기용량이 미소량 변화하며, 그것이 transformer ratio-arm bridge (B)에 의하여 용량변화에 비례하는 전압으로 변환되고 그것을 lock-in amplifier(L)로 증폭하여 XY기록계의 Y축에 입력한다. X축에는 시료의 자기장 H에 대한 회전각을 각도변환기 (C)에 의하여 전압으로 변환한 것을 입력하여 회전각에 대한 토오크 변화의 곡선을 그려 이방성을 측정한다.

2. 전기용량 변환기와 시료

그림 2는 전기용량법에 의한 토오크 변환기의 세부도이다. 시료 S는 연결봉 C에 의하여 3개의 축전기의 가동 극판 P가 세워진 원판 L에 연결되어 있다. L와 같은 크기의 상부원판 O에는 3개의 고정극판 N가 있으며 L와

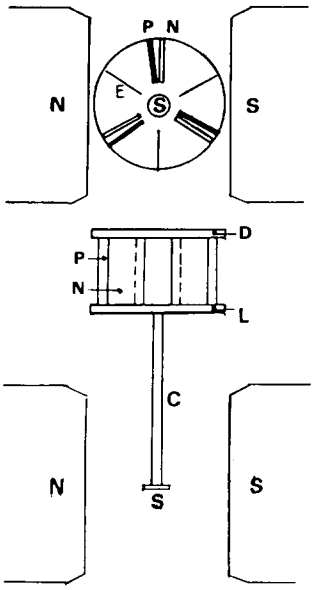

Fig. 2. The torque sensor by the capacitance method.

O는 3개의 인청동판 E(두께 0.1mm, 8×15mm)으로 연결되어 C축에 대한 토오크에는 잘 회전하나 C축에 대한 직각방향의 힘에 대해서는 큰 강도를 나타나게 배치하였다. 자기장 H에 대한 시료 S의 각도 θ의 측정은 회전축에 연동된 가변저항기에 의한 전압출력으로 하였다. 그러나 이방성상수가 작아서 측정에 고감도가 요구될때는 시료는 고정하고, 전자석을 회전시키는 방법을 사용하였다. 전기용량변환기의 고정판 N과 회전판의 P의 크기는 10×12㎜이고 그 사이의 평균간격을 0.26㎜로 하면 $C_0 = \varepsilon_0 A / \ell$ (C_0는 전기용량, ε_0는 진공의 유전율, A는 극판의 넓이, ℓ는 극판간격)에 의하여 3쌍의 N, P의 전기용량 C_0는 약 12 pF가 된다. 탄성지지판 E는 8×14㎜의 크기이며 두께는 0.1㎜의 인청동판이다. 시료는 3%Si-Fe 단결정판(grain oriented)과 수종의 상업용 규소강판 및 비정질 박대를 사용하였다. 그 자세한 내용은 표1과 같다.

3. 토오크 측정의 이론

시료에 가해지는 토오크 τ는 탄성지지판 E에 의한 복원토오크 τ_e와 비긴다. τ에 의한 시료의 미소회전각을 ϕ, 탄성계수를 e라 하면 $\tau_e = -e\phi$이고, $\tau = -\tau_e$임으로(12)식에 의해

Table I. Several properties of samples.

시료이름	두께(mm)	제조회사	결정상	특기 사항
(100)P	0.25	신일본제철	준 단결정	grain oriented
(100)E	0.25	신일본제철	준 단결정	grain oriented
USF 1	0.35	?	다결정	시판용 변압기철심
USF 2	0.33	?	다결정	시판용 변압기철심
SC	0.03	미국 Allied Co.	비정질	폭 25.6mm, Roll상
MB	0.03	미국 Allied Co.	비정질	폭 25.6mm, Roll상

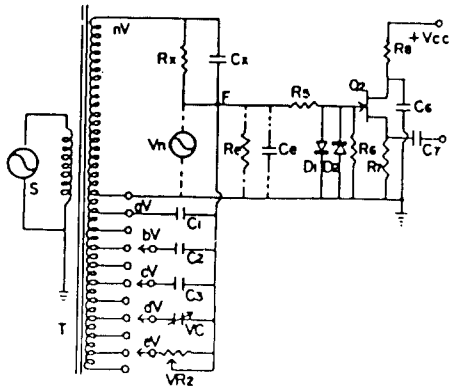

Fig. 3. The transformer ratio-arm bridge.

$$v \cdot \partial E_A / \partial \theta = -e\phi \tag{14}$$

이 성립한다. 또 시료가 미소각 ϕ만큼 회전하면 ℓ_0는 $\ell_0 + \Delta\ell$로 변화하고, C_0는 $C_0 + \Delta C$로 변화한다. 그리고 $\Delta\ell = G\phi$ (G는 장치상수)로 두면

$$\Delta C = -C_0 \, \Delta\ell/\ell = -C_0 G\phi/\ell \tag{15}$$

이 되며 ΔC는 매우 미소하다. ΔC를 검출하기 위하여 그림 3과 같은 transformer ratio-arm bridge를 사용한다. C_x가 P와 N로 구성된 토오크 검출용 용량 cell이며 $H=0$때 $C_x = C_0$이며 이때 C_2, C_3, VC, VR_2등에 연결된 switch를 조정하여 b, c, d, e 등의 값을 변화시켜 부리지를 평형상태로 하면 F점의 출력전압은 0이 된다. 시료에 가해지는 토오크 τ에 의하여 C_x가 $C_0 + \Delta C$로 변화할 때 부리지는 평형이 깨어지고 F점에는 다음과 같은 출력전압 V가 발생한다[8].

$$V = nV_0 \cdot \Delta C/C \tag{16}$$

여기서 V_0는 변압기 T의 단위 권선당의 전압이고, n는 2차 코일의 단위권선의 배수이다. C는 $C_1 + C_2 + C_3 + VC + C_e$이다. 본 실험에서 $C = 1800$ pF, $n = 150$, $V_0 = 0.6$V로 하였다. (13), (14), (15)식에 의하여 구하려는 토오크 τ는 다음과 같다.

$$\tau = -\nu \, \partial E_A / \partial\theta = -\frac{eC\ell}{n C_1 G V_0} \cdot V \equiv -Q \cdot V \tag{17}$$

여기서 $Q \equiv eC\ell/n C_0 G V_0$로서 장치 전체를 통한 장치상수이다. Q는 표준시료에 의하여 구해지며 본 실험에서는 다음에 기술하는 바와같이 Ni선의 형상이방성을 이용하였다. F점의 출력 V는 과대입력 제한회로가 부가된 Q_2(FET)의 source follower를 경유하여 lock-in amplifier에 입력하여 증폭한 뒤 그 출력을 XY기록계로 기록하였다. (16)식의 유도과정은 문헌[8]에 있다.

Ⅳ. 실험결과 및 고찰

1. 표준시료에 의한 측정장치의 교정

실험적으로 본 장치를 교정하기 위하여 표준시료로서 순수한 Ni선(직경 0.127 mm, 길이 5.8 mm)의 일축이방성을 이용하였다. Ni선의 일축이방성 에너지 U는 (9)식에 의하여

$$U = \frac{1}{2\mu_0} I_s^2 \, v \, [(N_x - N_y)\cos 2\theta + N_y] \tag{18}$$

으로 쓸 수 있다. Bozorth[5]에 의하여 $N_x = 0.001$, $N_y = 0.499$가 됨으로 상수항을 제외하고 θ에만 관계되는 $U(\theta)$는 대체적으로

$$U(\theta) = \frac{-1}{4\mu_0} I_s^2 \, v \cos^2\theta \tag{19}$$

이 된다. 따라서 토오크 τ는

$$\tau = \frac{\partial U(\theta)}{\partial \theta} = \frac{1}{4\mu_0} I_s^2 \, v \sin 2\theta \tag{20}$$

와 같다.

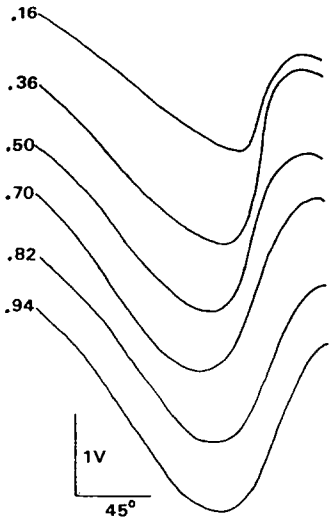

Fig. 4. The torque curves of a pure Ni wire for calibration. The values at the left of the curves represent the field intensity in tesla (Fig.5~Fig.8).

τ의 실측도는 그림 4와 같다. 이 토오크 곡선은 H가 커짐에 따라 대체적으로 180°를 한주기로 하는 sine곡선이 되며, 그것은 (8)식의 일축이방성이 대체적으로 성립하는 것을 나타내고 있다. H=9400 Oe 때의 진폭은 1.23V이다. Ni선의 I_s=0.61T, v=7.34×10^{-11}m^{3}을 (8)식에 대입하면, 그 진폭은 5.4×10^{-6} N·m가 되며 이것이 토오크 곡선의 진폭 1.23V에 해당된다. 따라서 본 장치의 토오크에 대한 감도는 4.4×10^{-6} N·m/V이다. 0°때와 180°때의 torque값에 차이가 있는데 이것은 시료 지지축의 연직성이 약간 틀어져서 생기는 계통적 오차이다. 또 전자석의 회전각도가 전자석의 구조상의 난점에 의하여 회전각도 범위가 180°보다 약간 부족한 170°인 원인도 겹쳐져 있으며, 이 점은 앞으로 시정할 예정이다.

2. 몇가지 시료에 대한 측정결과

표 I의 (100)E 시료(직경 3.2 mm, 두께 0.25 mm의 원판)에 대한 실험결과는 그림 5와 같다. H가 커져서 시료가 포화되면 토오크 곡선은 90°를 1주기로 하는 sine 곡선이 되어 대체적으로 (8)식에 의한 입방이방성을 나타내고 있으며 그 진폭은 7.5V이다. 따라서 토오크 진폭은 4.4×10^{-6} N·m/V×7.5V=3.3×10^{-5} N·m가 된다. (4)식에 의하여 토오크 τ를 구하면

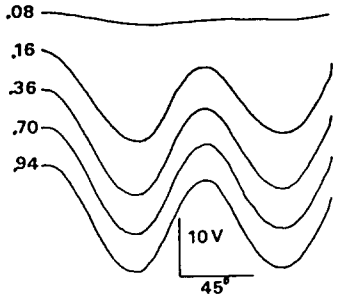

Fig. 5. The torque curves for (199)E sample.

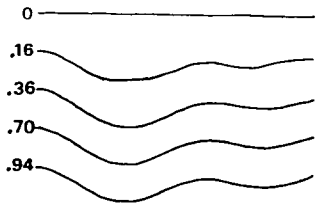

Fig. 6. The torque curves for USF2 sample. The scale is the same as Fig.5.

$$\tau=\frac{\partial E_A}{\partial\theta}\quad v=v\left[\left(\frac{1}{2}K_1+\frac{1}{32}K_3+\cdots\right)\sin 4\theta-\frac{1}{16}K_3\sin 8\theta\cdots\right] \tag{21}$$

가 되며 $K_3 \ll K_1$에 의하여 고차항을 생략하면

$$\tau \fallingdotseq \frac{1}{2}K_1 \sin 4\theta \cdot v \tag{22}$$

이 된다. 따라서

$$K_1=2\tau_{max}/v=\frac{2\times 33\times 10^{-6}\text{N·m}}{2\times 10^{-9}\text{m}^3}=3.3\times 10^4\ \text{J/m}^3 \tag{23}$$

로 산출되며 이것은 bozorth의 3.5×10^4 J/m^3[6]와 좋은 일치를 보이고 있다. 그림7은 시판용 변압기 철심을 직경 3.2 mm의 원판으로 punching한 USF2의 곡선이다. 약간 찌그러진 90° 주기의 sine 곡선이어서 입방이방성에 속하여 고차항의 계수 K_2, K_3등이 있음을 알 수 있다. 여기에서는 근사 계산하여 K_1이 약 6300 J/m^{3}임을 알았다.

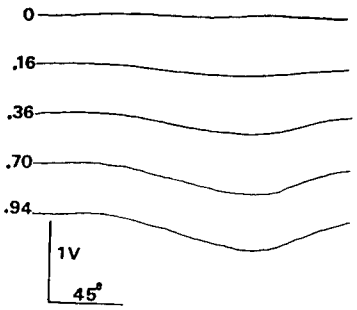

Fig. 7. The torque curves for Metglass 2605SC.

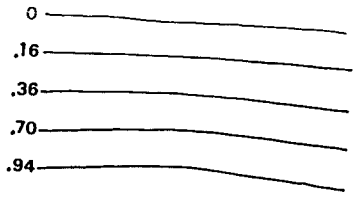

Fig. 8. The torque curves for Metglass 2826MB. The scale is the same as Fig.7.

(100)E 시료보다 작은 것은 다결정임을 말해주고 있다 [7]. USF2에 비교하여 USF1은 K_1이 상당히 큰것으로 보아 grain oriented 구조에 가까운 것으로 추측된다. 비정질 시료는 Metglass 2605SC와 2826MB의 2종류에 대하여 실험하였다. 이들은 두께가 0.03 ㎜이며 직경 6.5 ㎜의 원판으로 성형하였다. 그 토오크 곡선은 그림 7과 8과 같다. 180°의 기본주기로 찌그러진 sine 곡선이므로 대략적으로 일축이방성을 보이고 있다. 비정질 시료가 이방성을 갖는 이유는 자기변형이나, 방향성 배열(directional order), 또는 미소결정설등 여러가지가 있으나 아직 정설은 없다. 이상의 실험결과를 종합하면 표 II와 같다.

이 값들은 종전의 공표치와 좋은 일치를 보이고 있다.

Table. II. Anisotropy constant for several samples.

Name	Texture	Thickness (mm)	Dia(mm)	K_1(J/m³)
(100)E	grain oriented	0.25	3.2	33000
(100)P	grain oriented	0.25	3.2	32000
USF 1	grain oriented	0.35	3.2	19000
USF 2	poly crystal	0.33	3.2	6300
SC	amorphous	0.03	6.5	990
MB	amorphous	0.03	6.5	280

V. 결 론

전기용량법에 의하여 자기이방성 측정장치를 설계 제작하여 수종의 시료에 대하여 측정한 결과 종전의 발표값과 매우 좋은 일치를 보였다. 장치의 최대감도는 1 J/m³의 분해능을 갖었으나 회전기구에서 오는 진동과 왜래 잡음 때문에 현재는 10 J/m³ 정도가 최대 분해능이다. 그러나 회전기구의 개선과 전기용량 헤드의 지지방법을 개선하면 1 J/m³의 최대감도는 용이하게 얻어질것으로 본다. Penoyer의 방법에 비교하여 (1) 매우 간편하다. (2) 감도가 높다 (3) 시료 교체가 용이하다 (4) 매우 경제적이다 등의 장점을 갖고 있다.

참 고 문 헌

[1] R.F. Penoyer: papers presented at the M.M.M. Conference Boston, 1956, pp. 365(New York, American Institute. of Electrical Engineering).
[2] S.Chikazumi:Physics of Magnetism Vol.2, Shokabo, Tokyo(1984).
[3] R.Becker and W. Doering: Ferromagnetismus(Springer, Berlin, 1939).
[4] S.Chikazumi:Physics of Magnetism. 184 John Wiley and Sons Inc. New York, 1964.
[5] R.M. Bozorth:Ferromagnetism. D.Van Nostrand Co, N.Y.(1951) pp.80
[6] R.M.Bozorth: Ferromagnetism. D.Van. Nostrand. N.Y. (1951). pp.570
[7] B.D.Cullity: Intro. Magnetic Materials, Adison-Wesley Co. Massachusetts.(1972). p.238.
[8] 이용호, 응용물리 2, 437(1989).

한국자기학회지 Volume 1, Number 1, June 1991

A Measurement System for Magnetic Anisotropy with Capacitance Method

Y.H.Lee, Y.S.Lee, Y.D.Shin and K.W.Moon
Dept. of Physics, Jeonbuk National University

T.H.Noh, H.J.Kim and I.K.Kang
Division of Metals, Korea Institute of Science and Technology

(Received 20 March 1991)

A measurement system for magnetic anisotropy was built. The torque acting on the disc or sperical samples placed in uniform magnetic field was detected with a capacitive transducer which is connected with a transformer ratio-arm bridge. The output of the bridge was amplified with a lock-in amplifier. The cubic anisotropy constant for (100) of 3% Si-Fe was 3.3×10^4 J/m^3. The calibration for the system was carried out with the shape anisotropy of a thin Ni wire.