

토크마그네토미터를 이용한 자화 및 보자력측정의 새로운 방법

허진 · 신성철

한국과학기술원 물리학과

대전 305-701

(1992년 9월 7일 받음)

토크마그네토미터를 이용하여 일축이방성이 있는 자성체의 자화와 인가자장의 방향에 따른보자력을 정확하게 측정하는 새로운 방법을 개발하였다. 자화와보자력을 측정하기 위해 시편을 자화용이축 방향으로 포화시킨 후, 자화용이축과 이루는 자장의 각도(ϕ)가 $1/2\pi$ 와 $\pi+\delta$ 에서 자장(H)를 증가시켜 가며 자장의 변화에 따른 토크(τ)곡선들을 얻었다. 자화는 ϕ 가 $1/2\pi$ 인 토크곡선에서 τ/H 를 측정하여 얻을 수 있었고보자력은 ϕ 가 $\pi+\delta$ 인 토크곡선에서 $\tau = 0$ 이 되는 자장의 세기로부터 구할 수 있었다. 기존의 VSM에 의한 측정과 비교한 결과 2% 이내에서 일치함을 보였으며, 토크마그네토미터의 고감도로 인해 VSM에 의한 방법보다 정밀한 자화 측정이 가능하였다.

I. 서론

자성체에 대한 학문적인 관심과 다양한 응용 가능성으로 인해 지금까지 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 자성체의 자화 및보자력에 관한 정보는 자성체를 이해하고 개발하는데 필수적이다. 이런 물리양들에 대한 측정방법으로는 여러가지 방법[1]이 개발되었으나 통상 VSM(Vibrating Sample Magnetometer)으로 자화 및보자력을 측정하고 있다. 한편 토크마그네토미터를 이용하여 일축 자기이방성과 함께 포화자화를 측정하는 방법이 Miyajima[2], Wielinga[3], 그리고 G. Pastor[4]등에 의해 제시되었다. 그러나 이방법들의 경우 인가자장이 이방성 자장(anisotropy field)보다 커야 정확한 포화자화 측정이 가능하다. 그러므로 이방성자장이 큰 자성체의 경우 인가자장이 낮은 영역에서는 큰 측정오차가 있게되고 측정결과가 각각의 방법에 의존하게 된다.

본 논문에서는 null type 토크마그네토미터를 이용하여 일축 자기이방성이 있는 자성체의 포화자화를 이방성자장보다 낮은 자장영역에서 정확하게 측정하고, 인가자장의 방향에 따른보자력을 측정하는 새로운 방법에 관하여 논하고자 한다.

II. 측정원리

형상이방성과 이방성의 방향이 수직인 일축이방성 자성체의 경우 1차 자기이방성 에너지 상수 K_u 만을 고려하면 자장 H 안에 놓여 있는 자성체의 단위 부피당 정자기 에너지 E 와 토크 τ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} E &= K_u \sin^2\theta + K_s \cos^2\theta - M H \cos(\phi - \theta) \\ &= K_s + (K_u - K_s) \sin^2\theta - M H \cos(\phi - \theta) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\tau = -M H \sin(\phi - \theta) \quad (2)$$

여기서 M 은 자성체의 자화량을 나타내며, K_s 는 형상 이방성을 나타내는데 박막의 경우 $2\pi M^2$ 이다. θ 와 ϕ 는 Fig. 1에 도식된 것처럼 자화용이축에서 측정했을 때의 자화방향과 자장방향의 각도를 각각 나타낸다.

$(K_u - K_s)$ 를 유효이방성 에너지 상수 K 라 하면 식(1)과 식(2), 그리고 평형상태에서의 조건 $(\partial E / \partial \theta) = 0$ 에서 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\tau = -K \sin 2\theta \quad (3)$$

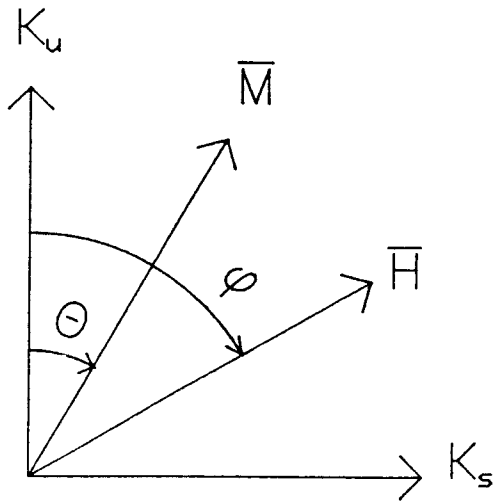


Fig. 1. Coordinates in the torque magnetometry. Here, K_u represents the uniaxial anisotropy, K_s the shape anisotropy, and M the magnetization.

먼저 토크를 인가자장의 방향의 함수로 측정하여 자성체의 자화용이축 방향을 구한다[5]. 이제 Fig. 2(a)에 도식된 것 처럼 시편의 보자력보다 큰 인가자장을 측정된 자화용이축 방향으로 가해준 후, 자장의 세기를 0으로 하고 Fig. 2(b)처럼 자화용이축에 수직($\phi = 1/2\pi$)한 인가자장 방향에서 자장의 세기를 증가시켜가며 토크곡선을 얻는다. 이때 식(2)는 전개하면

$$\tau/H = -M(1 - 1/2\theta^2 + \dots) \quad (4)$$

로 나타낼 수 있다. 따라서 이방성 자장보다 상대적으로 낮은 자장 영역에서는 $\theta \ll 1$ 이므로 저자장에서 토크 곡선의 기울기가 1차 근사적인 자화값임을 알 수 있다. 진짜 자화값 M 과 1차 근사적인 근사값 $-\tau/H$ 의 차이는 (3)식과 (4)식으로부터 자화와 $-\tau/H$ 값의 차이는 다음과 같이 주어진다.

$$M + \tau/H \approx 1/2 M (H/H_k)^2 \quad (5)$$

로 주어지는데, 여기서 H_k 는 이방성 자장으로 그 크기는 $2K/M$ 이다. 따라서 1차 근사적인 자화량 측정값의 정확도는 이방성 자장의 크기에 대한 측정자장 영역의 크기에 의존한다. 예로서 $H/H_k \leq 0.1$ 인 경우 1차 근사법에 의한 자화량 측정오차는 0.5% 이내이다. 이방법의 장

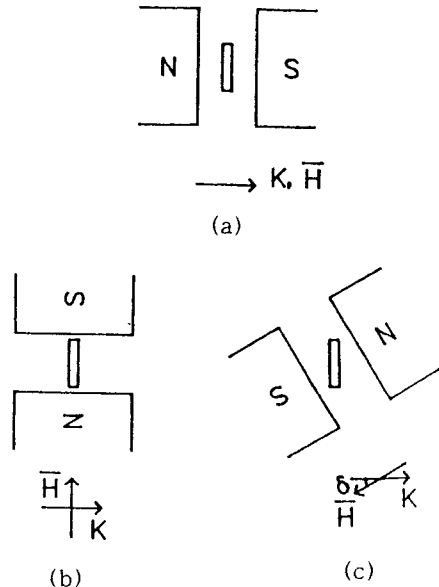


Fig. 2. Top views of the configurations (a) to initially saturate, (b) to measure the magnetization, (c) to measure the coercivity.

점중 하나는 M 이 기울기로부터 구해지므로 H 와 τ 측정시 일정한 편차가 존재해도 단지 토크의 원점만 이동하므로 M 의 측정에는 관계가 없다.

측정에 쓰인 토크마그네토미터의 분해능이 2×10^{-3} dyne·cm임을 고려하면 시편의 이방성자장이 H_k 일 경우, 본 측정에 의한 자화량 측정은 측정오차가 0.5%에서 분해능은 $2 \times 10^{-2} / H_k$ dyne·cm/Oe 로 추산되었다. 이는 다른 자화 측정방법[2-4]의 경우 이방성이 클수록 자화곡란축으로 포화시키기 어려워 측정이 부정확해짐에 반하여 본 측정법은 그정확도가 높아짐을 알 수 있다. 예를 들어 이방성 자장이 20 kOe일 경우 분해능은 1×10^6 emu이상이다.

만약 측정시 인가자장의 방향이 자화용이축에 수직으로 정확히 정렬되지 않고 ϵ 만큼 잘못 정렬되었다면, 이로 인한 진짜 자화값과 측정자화값 $-\tau/H$ 의 차이는 $1/2 M (H/H_k - \epsilon)^2$ 로 주어진다. 그러므로 ϵ 이 5°인 경우 이로 인해 약 3%의 오차가 야기된다.

보자력(H_c) 측정의 원리는 다음과 같다. 시편을 Fig. 2(a)처럼 자화용이축 방향으로 포화시킨 후, Fig. 2(c)처럼 자장의 세기를 영으로 하여 인가자장의 방향 ϕ 를 $\pi + \delta$ 로 고정하고 자장의 세기를 증가시켜 가며 토크를 측정한다. 이때 측정되는 토크 τ 는 식(2)로부터 $H M \sin(\delta - \theta)$ 인데 인가자장의 세기가 증가함에 따라 결국 자화

의 방향이 반대가 될 것이므로 토크의 값은 결국 양의 값에서 0을 지나 음의 값을 가지게 된다. 토크가 0인 경우 영과 $\pm 1/2\pi$ 가 아닌 임의의 δ 에 대해 $H \sin(\delta - \theta)$ 의 값은 영이 될 수 없으므로 결국 M 이 영이다. 따라서 이때의 자장의 세기가 인가 자장의 방향 $\pi + \delta$ 에 따른 보자력이다.

III. 실험 및 결과

측정에 사용한 null type 토크마그네토미터로는 본 실험실에서 제작한 것으로 [6] 측정범위는 ± 5 dyne·cm와 ± 50 dyne·cm로 조절 가능하며 감도는 full scale의 400 ppm으로 고감도를 가지고, 분해능은 각 측정범위에서 0.002 dyne·cm와 0.02 dyne·cm이며, 정확도는 1% 이내이었다.

측정된 시편은 Co/Pd 초격자 다층박막으로 총 두께가 300 Å이며 Co층과 Pd층의 두께 조합이 각각 2Å/6Å, 2Å/9Å, 4Å/9Å, 6Å/9Å 이었는데, 시편 제작 방법에 관해서는 다른 논문에서 보고되었다 [7]. 토크측정 후 기관 및 시료받침대의 영향을 제거함으로써 순수한 박막의 토크 값만을 얻었다. 한 예로서 4Å/9Å 시편의 자화를 측정하기 위한 토크곡선의 결과를 Fig. 3에 도식하였다. 그림에서 보는 바와같이 저자장영역에서는 토크 τ 가 H 에 선형적으로 증가하다가 점차 자화벡터가 회전함에 따라 감소하여 H_k 에서는 0이 됨을 볼 수 있다. 만약 자화벡터가 coherent rotation을 하는 Stoner-Wohlfarth 모델을 가정하면 정점에서의 토크값 τ_p 와 자장의 세기 H_p 로부터

$$M = \sqrt{2} \tau_p / H_p \quad (6)$$

$$H_k = \sqrt{2} H_p + 4\pi M$$

인 관계가 있는데 [8] 4Å/9Å 시편의 경우 Fig. 3에서 이를 잘 만족함을 볼 수 있다.

자화용이축 방향의 보자력은 δ 가 작을 경우에 해당하므로 본 실험에서는 δ 가 9°일 때 얻은 토크곡선으로부터 토크가 영이 되는 자장의 세기를 측정하여 자화용이축 방향의 보자력을 얻을 수 있었다. 보자력 측정의 한 예를 Fig. 4에 나타냈는데 보자력보다 작은 자장영역에서 자화벡터의 변화가 작은 반면 자장이 증가하기 때문에 τ 는 자장의 세기에 따라 증가하다가 자장의 세기가 H_c 에 가까워짐에 따라 감소하여 H_c 이상에서는 자화벡터의 역전으로 음의 값을 갖음을 알 수 있다.

측정시에 정렬상의 오차에 의해서 토크값의 원점이 이

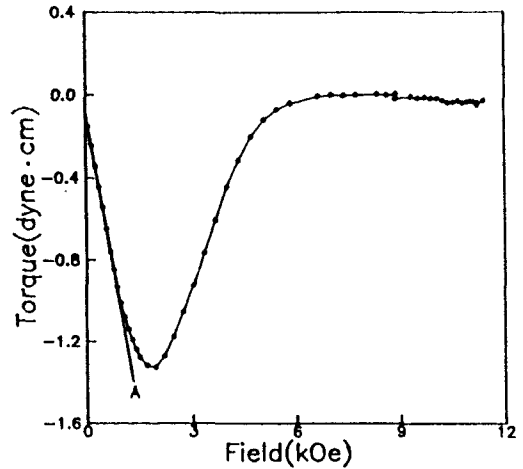


Fig. 3. A plot of the torque vs. the applied field for the measurement of the magnetization of a (4-Å Co/9-Å Pd) multilayer. The magnetization was obtained from a slope of the linear curve 'A'.

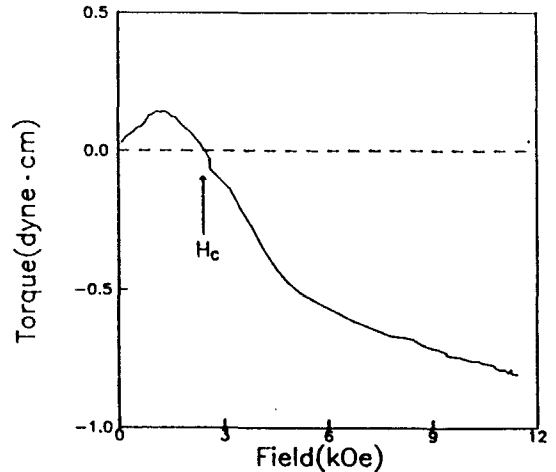


Fig. 4. A plot of the torque vs. the applied field for the measurement of the coercivity of a (4-Å Co/9-Å Pd) multilayer.

동하여 생기는 오차는 토크곡선에서 초기 직선부분의 절편을 원점으로 만드는 평행이동을 한 토크곡선으로부터 H_c 를 구하므로써 이를 제거할 수 있다.

본 연구에서 제시한 토크마그네토미터를 이용한 새로

Table I. Comparisons of the magnetization and the coercivity measured by our new method and VSM.

Sample ID	Present Method		VSM	
	M (emu/cc)	H_c (kOe)	M (emu/cc)	H_c (kOe)
2-Å Co / 6-Å Pd	275	3.24	279	3.23
2-Å Co / 9-Å Pd	311	3.05	306	3.12
4-Å Co / 9-Å Pd	351	2.78	348	2.75
6-Å Co / 9-Å Pd	168	0.77	378	0.78

운 측정방법과 VSM 측정에 의한 여러 시료의 자화값 및 보자력값을 Table I에 제시하였다. 여기서 VSM 측정에 의한 자화값은 모두 포화자화값이다. 6Å/9Å 시편의 자화값만을 제외하고는 본 논문에서 제시된 측정방법의 실험값이 VSM의 측정결과와 2%이내에서 일치함을 볼 수 있다. 6Å/9Å 시편의 경우 본 측정방법에 의한 자화값은 잔류자화값에 해당됨이 VSM으로 확인되었다. 고로 이 시편의 경우 demagnetization 상태에서 single domain이 아닌 multi domain 구조를 가지고 있음이 예측된다.

V. 결 론

본 연구에서는 토크마그네토미터를 이용하여 일축이방성 자성체의 자화량 및 보자력을 측정할 수 있는 새로운 방법을 개발하였다. 자화 측정시의 정확도는 측정자장의 범위가 이방성자장보다 작을수록 증가하는데 demagnetization 상태에서 single domain이 아닌 경우는 잔류자화값이 측정되어 진다.

한편 본 연구에 사용된 토크마그네토미터의 고감도에 의해 기존의 VSM에 의한 측정보다 정밀한 자화 측정이 가능하였고, 2차이상의 이방성 상수를 고려해도 측정결과는 큰 영향이 없으리라 사려된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 연구비 지원으로 수행되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] H. Zijlstra, Experimental Methods in Magnetism, (North-Holland, New York, 1987), Vol. 2, Chap. 3.
- [2] H. Miyajima, K. sato, and T. Mizoguchi, J. Appl. Phys. **47**, 4469 (1976).
- [3] T. Wielinga, J. Appl. Phys. **50**, 4888 (1979).
- [4] G. Pastor and M. Torres, J. Appl. Phys. **58**, 920 (1985).
- [5] S. Chikazumi, Physics of Magnetism, (Jhon Wiley & Sons, Inc., 1964), Chap. 7.
- [6] 허진, 신성철, 응용물리, **5**, 363 (1992).
- [7] S. -C. Shin, J. -H. Kim, and D. -H. Ahn, J. Appl. Phys. **69**, 5664 (1991).
- [8] J. Hur and S. -C. Shin, To be published.

New Methods of Measuring Magnetization and Coercivity by Torque Magnetometer

J. Hur and S.-C. Shin

*Department of Physics, Korea Advanced Institute of
Science and Technology, Taejon 305-701*

(Received 7 September 1992)

We have developed new techniques to measure the magnetization and coercivity of a uniaxial magnetic material using a torque magnetometer. The magnetization could be measured from the slope of the linear region in a plot of the torque τ versus the applied field H , when the direction of the applied field was normal to the uniaxial orientation. While, the coercivity could be obtained by taking the value of applied field where the torque was zero, when the direction of the applied field was $(180+\delta)$ degrees from the uniaxial orientation. The techniques were applied to determine the magnetizations and coercivities of several Co/Pd multilayer thin films and the results were confirmed to be similar within a 2 % difference to those obtained by a vibrating sample magnetometer.