

돌림힘 자력계를 이용하여 자기 이력곡선 측정의 최적 조건 연구

한국과학기술원 물리학과 허진*, 신성철

Optimization of torque magnetometric method for measuring magnetic hysteresis loops

KAIST Jeon Hur*, Sung-Chul Shin

1. 서론

본 논문에서는 돌림힘 자력계를 이용하여 일축 비등방성 자성체의 자기 이력곡선을 측정하는 방법[1]을 최적화한다. 이를 위해 비등방성은 돌림힘을 기술하는 닫힌형태의 양함수들 (explicit functions)[2] 및 Levenberg-Marquart algorithm을 이용하여 측정한다[3]. 한편, 용이축과 자기마당이 이루는 사이각이 약 $\frac{\pi}{6}$ 정도에서 자기모멘트를 측정하는 것이 유리함을 이론적으로 보인다.

2. 본론

자기화량이 M 인 시료의 단위 부피당 총 에너지 E 는 $E = K \sin^2(\theta - \theta_0) - MH \cos(\phi - \theta)$ 로 나타낼 수 있다. 여기서, K 는 형상비등방성과 고유비등방성을 함께 고려한 일축 비등방성 에너지 상수이고, θ, θ_0 및 ϕ 는 각각 자기화, 양의 용이축, 자기마당 방향들이다. 유효 비등방성 자기마당 H_K 는 $H_K = 2K/M$ 로 정의되었다. 한편, 돌림힘 $\tau (= \vec{M} \times \vec{H})$ 는 $\tau = MH \sin(\phi - \theta)$ 로 나타낼 수 있다. 이제, 무차원 자기마당 $h (= H/H_K)$, 무차원 돌림힘 $t (= \tau/K)$ 를 도입하고, 시료의 부피가 V 인 경우 시료의 비등방성 및 자기 이력곡선을 측정하는 방법을 고려한다. 먼저, 시료의 보자력보다 높은 세기의 인가 자기마당에서 측정된 돌림힘 곡선에서, 기울기가 양이고 돌림힘의 값이 0이 되는 인가 자기마당의 방향을 ϕ_0 라 하면 $\theta_0 = \phi_0$ 가 성립함을 알 수 있다. 한편, 시료가 받는 돌림힘 L 은 $L = \tau V$ 로 표현되고, 시료의 자기모멘트 (magnetic moment)는 자기화량과 부피의 곱 ($M \times V$)임을 상기하면, 자기모멘트 M' 을 다음 식으로 간단히 표현할 수 있다[1].

$$M' = \frac{L}{H \sin(\phi - \phi_0 - \frac{1}{2} \arcsin(\frac{L}{Kt}))} \quad (1)$$

여기서, K' 은 비등방성 에너지로 비등방성 에너지 상수와 부피의 곱 ($K \times V$)이다. 본 연구에서는

돌림힘을 기술하는 이론적인 식[2]의 맞춤인수들을 실험 $L-\phi$ 곡선에 맞추는 기법[3]을 사용하여 K' 및 θ_0 를 정확하게 측정한다[1]. 본 연구에서 쓰인 맞추기 기법은 인가 자기마당 세기가 시료의 비등방성 자기마당 세기보다 낮은 경우에도 정확한 K' 와 θ_0 의 값을 준다. 예로서, (2-Å Co/9-Å Pd)₂₇ 시료의 실험 돌림힘 곡선과 이론적인 돌림힘 곡선과 본 방법에 의한 자기 이력곡선 측정의 예를 그림 1에 도식하였다. 인가 자기마당의 세기가 이 시료의 비등방성 자기마당의 세기보다 낮아 90° 및 270° 근처에서 급격하게 자기화가 역전됨을 볼 수 있다. 그림 1에 도식된 두 돌림힘 곡선의 비교는 자기화 역전이 급격히 일어나는 경우일지라도 맞추기 함수로서의 돌림힘 함수가 잘 적용됨을 명백히 알 수 있다[1].

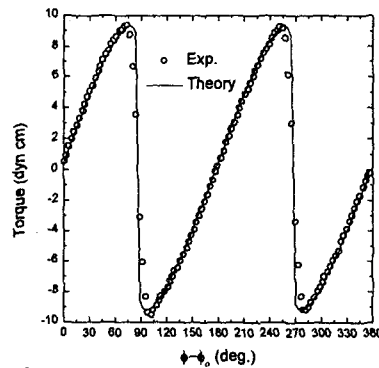


그림 1. The experimental and theoretical torque curves of a (2-Å Co/9-Å Pd)₂₇ multilayer when $H = 11.89$ kOe.

한편, 본 방법의 자기 이력곡선 측정의 정확도와 감도는 시료의 비등방성 자기마당 및 외부 인가 자기마당 세기들의 함수이다. 자기 이력곡선 측정법에서 자기마당 및 돌림힘의 측정 오차나 측정 잡음이 자기화량 측정에 미치는 영향을 고려하기 위해, 다음 식 (2)를 얻었다.

$$\frac{\Delta M'}{M'} = \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta H}{H} + \alpha \frac{\Delta L}{K'} + \alpha \left(\Delta(\phi - \phi_0) + \frac{L}{K'} \frac{\Delta K'}{K'} \right) \quad (2)$$

여기서, α 는 다음 식 (3)으로 정의 되었다.

$$\alpha = \frac{1}{2|t|} \sqrt{\frac{4h^2 - t^2}{1 - t^2}} \quad (3)$$

Δx 를 x 의 불확정량에 대응 시키면, 본 방법의 측정 오차는 식 (2)에서 네번째 항에 해당하고, 잡음은 앞의 3개 항들에 해당하게 된다. 자기 이력곡선 측정중에 인가 자기마당 방향과 비등방성 에너지는 상수이므로 잡음을 초래하지 않는다. 따라서, 측정상의 상대 오차는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta M'}{M'} = -\alpha \left(\Delta(\phi - \phi_0) + \frac{L}{K'} \frac{\Delta K'}{K'} \right) \quad (4)$$

식 (4)으로 표현된 측정오차를 결정하는 α 를 그림 2에 도식하였다. 측정조건 $\frac{\pi}{8} < (\phi - \phi_0) < \frac{\pi}{4}$ 및 $h < 2$ 을 만족하는 방향과 세기를 갖는 인가 자기마당에 대해 α 의 값은 5 보다 작다. 이와같은 조건에서 대표적인 오차는 1%미만이 된다.

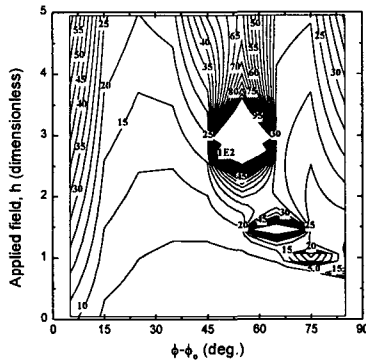


그림 2. Theoretical values of α depending on ϕ and h .

자기모멘트 측정 잡음에 미치는 자기마당이나 돌림힘 측정 잡음들의 효과는 식 (2)로부터 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta M' = 2 \left(\frac{1}{t} + \alpha \right) \frac{\Delta L}{H_K} + \frac{\Delta H}{H} M' \quad (5)$$

식 (5)로부터 자기모멘트 측정 잡음수준을 계산하기 위해 $2 \left(\frac{1}{t} + \alpha \right)$ 의 값을 여러가지 자기마당에 대해

계산하여 그림 3에 도식하였다. $\frac{\pi}{8} < (\phi - \phi_0) < \frac{\pi}{4}$ 이고 $0.2 < h < 2$ 이면 $2 \left(\frac{1}{t} + \alpha \right)$ 의 값은 10보다 작다. 예로서 시료의 비등방성 자기마당세기가 10^4 Oe라 하면 돌림힘 자력계의 돌림힘 측정 잡음이 10^{-3} dyne cm일 때, 식 (5)의 첫번째 항은 약 10^{-6} emu가 된다. 한편, 돌림힘 자력계의 자기마당 측정잡음 수준은 통상 $\Delta H/H < 10^{-4}$ 을 만족하므로, 식 (5)의 두번째 항에 의한 잡음 수준은 측정되는 자기모멘트에 비해 0.1% 미만으로 거의 항상 무시할 만 하다. 따라서, 자기모멘트 측정의 잡음수준은 비등방성 자기마당 H_K (Oe)가 클 수록, 돌림힘 측정잡음 수준 ΔL (dyne cm)이 작을 수록 낮아진다. 이 경우, 자기모멘트 측정잡음 수준은 근사적으로 $10 \times \Delta L/H_K$ (emu)에 해당함을 알 수 있다.

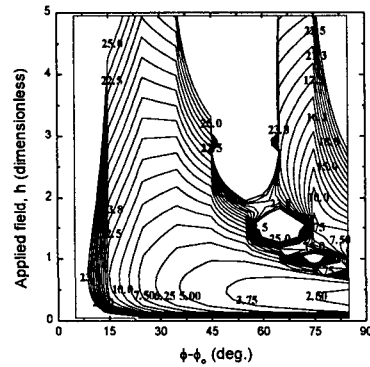


그림 3. Theoretical values of $2 \left(\alpha + \frac{1}{t} \right)$ depending on ϕ and h .

3. 결론

본 방법에 의한 자기모멘트 측정의 잡음수준은 비등방성 자기마당 H_K 가 클 수록, 돌림힘 측정잡음 수준 ΔL 이 작을 수록 낮아진다. 이 경우, 자기모멘트 측정잡음 수준은 근사적으로 $10 \times \Delta L/H_K$ (emu)에 해당함을 알 수 있다. 예로서, 2×10^{-3} dyne cm의 돌림힘 측정 감도를 갖는 돌림힘 자력계를 이용하여 비등방성 자기마당이 약 10 kOe 인 수직자성 박막의 자기모멘트 측정에서 10^{-6} emu 이상의 고감도를 얻었다.

4. 참고문헌

- [1] 허진, 신성철, 한국자기학회지, 5, 900 (1995).
- [2] 허진, 신성철, 한국자기학회지, 투고중 (1998).
- [3] 허진, 신성철, 응용물리, 투고중 (1998).