

일축이방성 다결정의 자화곡선을 이용한 포화자화 및 결정자기이방성상수 결정에서의 오차분석

김만중 · 허 진 · 김윤배

한국표준과학연구원 자기연구실, 대전광역시 유성구 도동동 1번지, 305-340

김택기

충남대학교 금속공학과, 대전광역시 유성구 궁동 220, 305-764

(1999년 3월 25일 받음, 1999년 6월 10일 최종수정본 받음)

자장 중에서 정렬된 일축이방성 다결정분말의 자화곡선을 이용하여 포화자화와 결정자기이방성상수를 결정하는 방법의 오차를 분석하였다. 분말의 정렬도가 10° 일 때 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 의 경우의 M_s 및 K_1 오차는 각각 1% 및 13%이었으며, Ba-ferrite의 경우 1% 및 17%이다. 이 방법으로 계산하여 M_s 는 매우 정확하게 구할 수 있으며 정확도를 높이기 위해서는 분말의 정렬도를 증가시켜야함을 알았다.

I. 서 론

포화자화(M_s)와 결정자기이방성상수(K)는 자성재료의 물질상수이다. 그러나 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 등의 희토류-천이금속화합물[1, 2]이나 $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ 등의 경자성 페라이트[3, 4] 들은 큰 일축결정자기이방성으로 인해 자화곡선 방향으로 포화시 높은 인가자장을 필요로 하므로 포화자화나 결정 자기이방성상수의 측정이 곤란한 경우가 많다. 그래서 자 장 중에서 정렬시킨 다결정분말을 측정된 자화곡선으로부터 포화자화와 결정자기이방성상수를 구하는 방법이 보고 되었다[5-7]. 이 방법은 $H=0$ 에서의 수직, 수평자화의 비 ($M_0(\perp)/M_0(\parallel)$)를 이용하여 분말의 정렬도(θ_0)를 구한 후 수평자화 및 수직자화율($\chi_i^p(\perp)$)로부터 각각 M_s 및 K_1 을 결정한다. 그러나 실험 자화곡선의 특정자장에서 $H=0$ 으로 외삽하여 자화 및 자화율을 결정하므로 이 때 참 값들과 편차가 발생하고 따라서 분말의 정렬도, 포화자화 및 결정자기이방성상수의 결정에도 오차가 발생한다.

본 연구에서는 다결정분말의 자화곡선을 이용하여 포화 자화 및 결정자기이방성상수를 결정하는 방법의 신뢰도를 조사하기 위해 임의의 자화곡선에서 외삽으로 $M_0(\perp)$, $M_0(\parallel)$ 및 $\chi_i^p(\perp)$ 을 구한 후 M_s 와 K_1 을 결정하고 이를 계산값과 비교하여 오차를 구하였다.

II. 포화자화 및 결정자기이방성상수의 오차 결정법

일축 자기이방성을 갖는 자성분말의 자화가 자기모멘트

의 회전에 의해서만 진행된다고 가정하면 임의의 자장 H 에 대한 자화의 크기는 식 (1)에 의한 최소에너지조건으로부터 구할 수 있다.

$$E = K_1 \sin^2 \theta + K_2 \sin^4 \theta - \vec{M}_s \cdot \vec{H} = f(\theta_0) \quad (1)$$

식 (1)에서 K_1 및 K_2 는 각각 제 1차 및 제 2차 자기이방성 상수이고 θ 는 자화용이축과 M_s 가 이루는 각도이며 $f(\theta_0)$ 는 분말의 정렬도(θ_0)와 관련된 함수이다.

예를 들어, $f(\theta_0)$ 를 가우스함수로 가정한 후 식 (1)에 임의의 θ_0 , M_s , K_1 및 K_2 을 적용하면 인가자장에 대하여 수평 및 수직으로 정렬된 분말의 자화를 계산할 수 있다[5]. 또한 이 자화곡선에서 $M_0(\perp)$, $M_0(\parallel)$ 및 $\chi_i^p(\perp)$ 를 구한 후 식 (2), 식 (3) 및 식 (4)에 적용하여 M_s 및 K_1 을 역산 할 수 있다.

$$\frac{M_0(\perp)}{M_0(\parallel)} = \frac{2 \int_{\theta_c=0}^{\pi/2} \sin^2 \theta_c \exp(-\theta_c^2/2\theta_0^2) d\theta_c}{\pi \int_{\theta_c=0}^{\pi/2} \cos \theta_c \sin \theta_c \exp(-\theta_c^2/2\theta_0^2) d\theta_c} \quad (2)$$

$$M_0(\parallel) = (M_s) \frac{\int_{\theta_c=0}^{\pi/2} \int_{\varphi_c=0}^{\pi/2} \cos \theta_c \exp(-\theta_c^2/\theta_0^2) \sin \theta_c d\varphi_c d\theta_c}{\int_{\theta_c=0}^{\pi/2} \int_{\varphi_c=0}^{\pi/2} \exp(-\theta_c^2/\theta_0^2) \sin \theta_c d\theta_c d\varphi_c} \quad (3)$$

$$K_1 = \frac{M_s^2}{2\chi_i^p(\perp)} \quad (4)$$

$$P = \frac{\int_{\theta_c=0}^{\pi/2} \int_{\varphi_c=0}^{\pi/2} (1 - \sin^2 \theta_c \cos^2 \varphi_c) \exp(-\theta_c^2 / \theta_0^2) \sin \theta_c d\theta_c d\varphi_c}{\int_{\theta_c=0}^{\pi/2} \int_{\varphi_c=0}^{\pi/2} \exp(-\theta_c^2 / \theta_0^2) \sin \theta_c d\theta_c d\varphi_c}$$

그러나 실제의 경우 $H=0$ 근처에서 자벽이동이 일어나므로 실험자화곡선으로부터 $M_0(\perp)$, $M_0(\parallel)$ 을 정확히 결정할 수 없는 문제점이 있다.

본 연구에서는 반자장보다 큰 인가자장 영역에서는 자화가 회전에 의해서만 진행된다고 가정하여 이론 자화곡선을 $H \geq 4\pi M_S$ 에서 $H=0$ 으로 외삽하여 $M_0(\perp)$, $M_0(\parallel)$ 및 $\chi_i^p(\perp)$ 를 구하였다. M_S 및 K_1 의 분석오차는 이들값을 이용하여 계산한 결과를 이론값과 비교하여 결정하였다.

III. 결과 및 토의

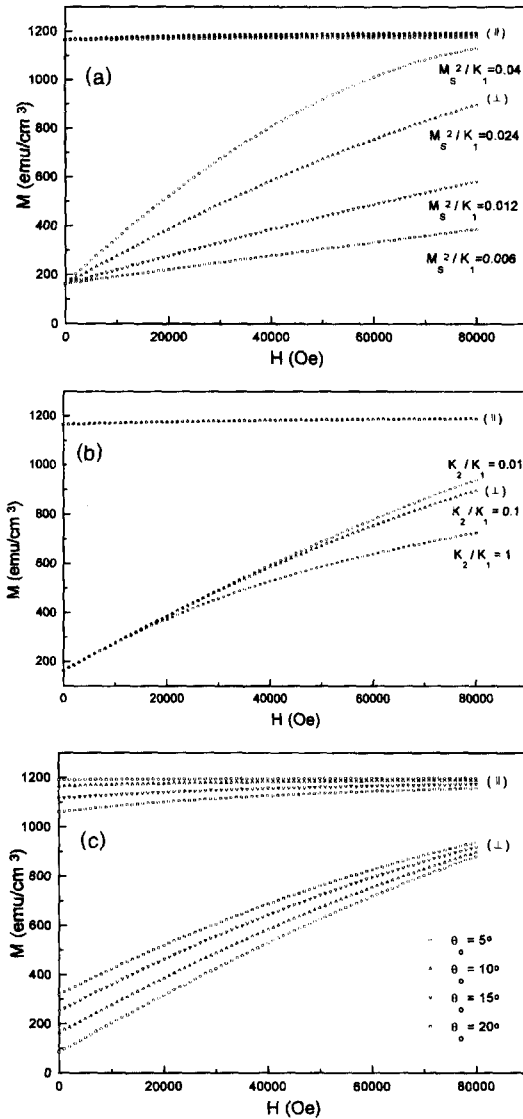


Fig. 1. Changes of magnetization curves calculated along parallel (\parallel) and perpendicular (\perp) to alignment direction as a function of M_s^2/K_1 , K_2/K_1 and θ_0 (at $M_S = 1200 \text{ emu/cm}^3$) (a) at $\theta_0 = 10^\circ$ and $K_2/K_1 = 0.1$, (b) at $\theta_0 = 10^\circ$ and $M_s^2/K_1 = 0.024$ and (c) at $M_s^2/K_1 = 0.024$ and $K_2/K_1 = 0.1$).

외삽에 의해 구한 $M_0(\perp)$, $M_0(\parallel)$ 및 $\chi_i^p(\perp)$ 로부터

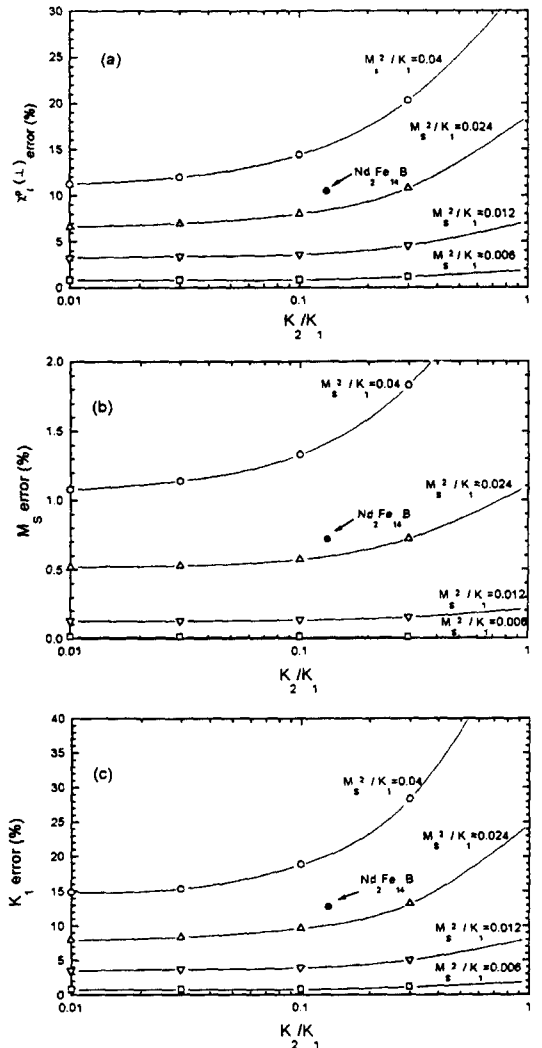


Fig. 2. Changes of $\chi_i^p(\perp)$ error, (M_S) error and (K_1) error as a function of M_s^2/K_1 and K_2/K_1 (at $M_S = 1200 \text{ emu/cm}^3$, $\theta_0 = 10^\circ$).

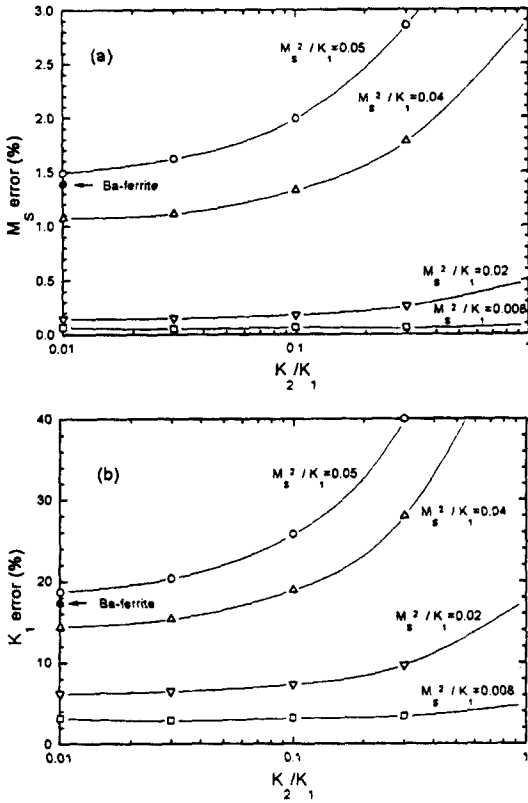


Fig. 3. Changes of (M_S) error and (K_1) error as a function of M_S^2/K_1 and K_2/K_1 (at $M_S=400$ emu/cm³, $\theta_0=10^\circ$).

M_S 및 K_1 을 결정할 경우에 발생하는 오차는 자화곡선 모양에 민감하다. 이때 수평 및 수직자화곡선이 Fig. 1(a), (b) 및 (c)에 나타난 바와 같이 M_S^2/K_1 , K_2/K_1 및 θ_0 에 민감하므로 이들 인자에 의해서 M_S 및 K_1 을 결정할 경우에 발생하는 오차의 영향이 검토되어야 한다.

Fig. 2(a), (b) 및 (c)는 $M_S=1200$ emu/cm³, $\theta_0=10^\circ$ 의 조건에서 $M_S^2/K_1=0.006\sim 0.04$ 및 $K_2/K_1=0.01\sim 1$ 로 변화시킬 때 각각 $\chi_i^p(\perp)$, M_S 및 K_1 의 오차를 나타내고 있다. M_S^2/K_1 의 값이 증가할수록 $\chi_i^p(\perp)$, M_S 및 K_1 의 오차가 증가하게 된다. 이는 Fig. 1(a)에 나타난 것처럼 M_S^2/K_1 가 증가하면 수직자화곡선이 곡선화 되어 외삽과 계산에 의하여 구한 $M_0(\perp)$ 및 $\chi_i^p(\perp)$ 값의 차이가 증가하기 때문이다. 또한 K_2/K_1 의 값이 증가하면 M_S 및 K_1 의 오차는 초기에 큰 변화가 없다가 그 후에는 크게 증가하는 모양을 나타낸다. 이는 Fig. 1(b)와 같이 K_2/K_1 가 증가함에 따라 자화곡선이 직선형태에서 점차 곡선형태로 변화함에 따라 외삽과 계산으로 구한 $M_0(\perp)$ 및 $\chi_i^p(\perp)$ 값의 편차가 증가하기 때문이다. Nd₂Fe₁₄B는 상온에서 결

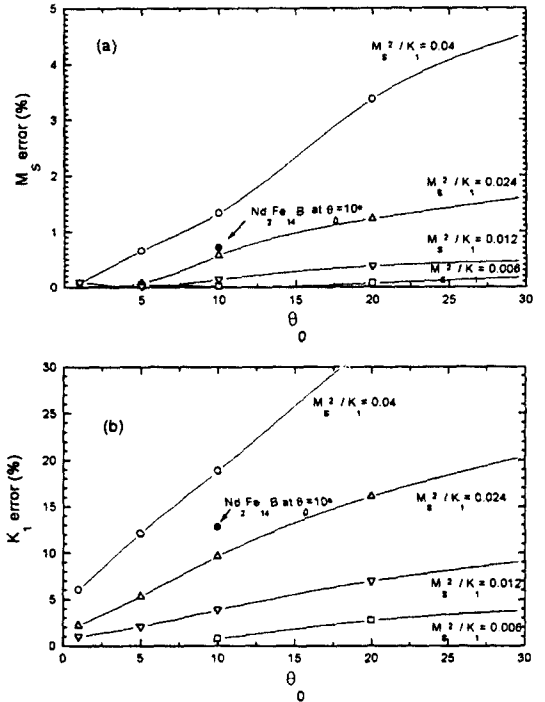


Fig. 4. Changes of (M_S) error and (K_1) error as a function of θ_0 and M_S^2/K_1 (at $M_S=1200$ emu/cm³, $K_2/K_1=0.1$).

정자기이방성상수가 $K_1=5\times 10^7$ erg/cm³, $K_2=6.6\times 10^6$ erg/cm³[8] 이므로 이때 이 방법으로 결정되는 M_S 및 K_1 의 오차는 각각 1% 및 13%이다.

Fig. 3(a) 및 (b)는 $M_S=400$ emu/cm³, $\theta_0=10^\circ$ 의 조건에서 $M_S^2/K_1=0.008\sim 0.05$ 및 $K_2/K_1=0.01\sim 1$ 로 변화시킬 때 M_S 및 K_1 의 오차를 나타내고 있다. Fig. 2와 마찬가지로 M_S^2/K_1 및 K_2/K_1 가 증가함에 따라 외삽영역의 자화곡선이 직선형태에서 곡선형태로 변화하여 외삽과 계산에 의해 구한 $M_0(\perp)$ 및 $\chi_i^p(\perp)$ 의 값의 편차가 증가하고 M_S 및 K_1 의 오차가 커진다. Ba-ferrite는 상온에서 결정자기이방성상수가 $K_1=3.2\times 10^6$ erg/cm³[9] 이므로 이때 M_S 및 K_1 의 오차는 각각 1% 및 17%로 예상된다.

Fig. 4(a) 및 (b)는 $M_S=1200$ emu/cm³, $K_2/K_1=0.1$ 의 조건에서 $M_S^2/K_1=0.006\sim 0.04$ 및 $\theta_0=0^\circ\sim 30^\circ$ 로 변화시킬 때 예상되는 M_S 및 K_1 의 오차를 나타내고 있다. θ_0 가 증가함에 따라 M_S 및 K_1 의 오차가 증가하는 모양을 나타내는데 이는 Fig. 1(c)에서 나타난 것처럼 θ_0 가 증가함에 따라 수평자화곡선이 점차 곡선화되어 외삽과 계산에 의한 $M_0(\parallel)$ 값의 편차가 커지고 $\chi_i^p(\perp)$ 가 감소하기 때문이다.

IV. 결 론

다결정분말의 $M_0(\perp)$, $M_0(\parallel)$ 및 $\chi_i^p(\perp)$ 로부터 M_S 및 K_1 을 결정할 경우, M_S^2/K_1 , K_2/K_1 및 θ_0 가 증가할수록 수평 및 수직자화곡선이 직선형태에서 곡선화하여 외삽과 계산에 의한 $M_0(\parallel)$, $M_0(\perp)$ 및 $\chi_i^p(\perp)$ 의 오차가 증가하고 M_S 및 K_1 의 오차가 증가한다. $\theta_0 = 10^\circ$ 인 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 의 경우, M_S 및 K_1 의 오차는 각각 1% 및 13%이고 Ba-ferrite의 경우, 1% 및 17%로 예상된다. 이 방법은 M_S 의 경우 매우 정확하고 K_1 의 경우에도 비교적 신뢰할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] J. J. Croat, J. F. Herbst, R.W. Lee, F. E. Pinkerton, J.

Appl. Phys., **55**, 2078 (1984).
 [2] M. Sagawa, S. Fujimura, N. Togawa, H. Yamamoto, Y. Matsuura, J. Appl. Phys., **55**, 2083 (1984).
 [3] G. W. Rathenau, J. Smith and A. L. Stuyts, Z. Phys., **133**, 250 (1952).
 [4] B. T. Shirik and W. R. Buessem, J. Appl. Phys., **40**, 1294 (1969).
 [5] Y. B. Kim, Jin Han-min J. Magn. Magn. Mater., **169**, 114 (1997).
 [6] Y. B. Kim, Jin Han-min J. Magn. Magn. Mater., **182**, 55 (1998).
 [7] Y. B. Kim, Jin Han-min J. Magn. Magn. Mater., **189**, 241 (1998).
 [8] E. P. Wolfarth and K. H. J. Bushow(Eds.), Ferromagnetic materials vol 4, North-holland, Amsterdam (1988), pp. 20-21.
 [9] E. P. Wolfarth (Eds.), Ferromagnetic materials vol 3, North-holland, Amsterdam(1982), p. 332.

Determination Errors of Saturation Magnetization and Magnetocrystalline Anisotropy Constant from Magnetization Curves of Magnetically Aligned Uniaxial Powder

M. J. Kim, J. Hur and Y. B. Kim

Magnetic reserch group, KRISS, Taejon 305-340, Korea

T. K. Kim

Dept. of Metallurgical Engineering, Chungnam National Univ., Taejon 305-764, Korea

(Received 25 March 1999, in final form 10 June 1999)

Errors of saturation magnetization and magnetocrystalline anisotropy constant determined by magnetization curve of magnetically aligned uniaxial powder were analyzed. In case of alignment factor (θ_0) = 10° , magnetic constant errors of $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ were calculated to be error of $M_S \cong 1\%$ and error of $K_1 \cong 13\%$, respectively, and magnetic constant errors of Ba-ferrite were calculated to be error of $M_S \cong 1\%$ and error of $K_1 \cong 17\%$. In this method, M_S was found to be determined with high accuracy. High alignment is desirable for high accuracy.