

다결정 자화곡선을 이용한 콘이방성물질의 스핀재배열각 결정법 : Nd₂Fe₁₄B에의 적용

김윤배 · Jin Han-min*

한국표준과학연구원, *Jilin University

김만중 · 김택기

충남대학교 공과대학 금속공학과

(1998년 3월 12일 받음, 1998년 6월 10일 최종수정본 받음)

자장중에서 정렬시킨 다결정 분말의 자화곡선을 이용하여 콘이방성의 스핀재배열각을 결정할 수 있는 새로운 방법을 제시하였다. 이 방법을 이용하여 Nd₂Fe₁₄B 다결정시료의 스핀재배열각을 구한 결과 단결정과 일치하는 결과를 얻었다. 4.2K에서의 Nd₂Fe₁₄B의 스핀재배열각을 결정함에 있어서 저면이방성효과가 무시될 경우 약 9%의 낮은 값이 얻어질 것으로 예상된다.

1. 서 론

Nd₂Fe₁₄B [1, 2]는 상온에서 정방정의 c-축을 자화용이축으로 하는 일축결정자기이방성을 보이거나 135 K 이하로 냉각하면 자화용이축이 c-축으로부터 벗어나 {110} 면상을 따라 기울어지는 스핀재배열(spin reorientation)을 일으키게 된다[3]. 즉, Nd₂Fe₁₄B는 스핀재배열에 의하여 4개의 용이축을 갖는 콘이방성(cone anisotropy)을 나타내게 되며 스핀재배열각(spin reorientation angle; 스핀재배열에 의하여 새로이 형성된 자화용이축이 원래의 용이축과 이루는 각도)은 온도가 감소할수록 증가하여 4.2 K에서 약 30°[3]에 이르게 된다.

스핀재배열각은 결정자기이방성에 관한 정보를 갖고 있어 이의 정확한 측정은 자기이방성을 이해하는데 많은 도움을 주며 단결정을 이용한 토크측정법을 통하여 직접적인 측정이 가능하다[4, 5]. 간접적인 측정 방법으로는 단결정의 자화곡선으로부터 계산하는 방법이 있다. 예를들어 Nd₂Fe₁₄B의 경우 [001] 방향과 [110] 방향을 따라 자화곡선을 측정된 후 외삽을 통하여 H=0일때의 자화를 구하고 $\theta = \tan^{-1}(M_{[110]}/M_{[001]})$ 의 관계를 이용하여 스핀재배열각을 구할 수 있다[4, 5]. 이 외에 결정자기이방성상수를 아는 경우 스핀재배열각의 계산이 가능하나 이방성상수를 결정하는 오차가 포함되고 고차이방성상수를 포함시킬수 없어 근사적인 결과가 얻어지게 되는 문제점이 있다.

이상에서 언급한 바와같이 정확한 스핀재배열각의 측정을 위해서는 단결정을 사용하여야 하며 다결정시료를 이용할 수 있는 방법은 아직 알려져 있지 않다. 그러나, 임의의 결정축을 배향시킨 다결정분말에서 결정축분포에 대한 정량적 취급이 가능할 경우 자화곡선을 분석함으로써 정확한 스핀재배열각의 결정이 가능할 수 있다. 본 연구에서는 정방정(tetragonal)계에서 [001] 결정축을 배향시킨 분말을 예로하여 자화곡선으로부터 스핀재배열각을 결정하는 방법을 제시하고 Nd₂Fe₁₄B의 스핀재배열각 계산에 적용한 결과를 기술하고자 한다.

2. 이론적 계산

Nd₂Fe₁₄B는 정방정구조를 갖고며 상온에서 [001]축(c-축)을 자화용이축으로하는 일축결정자기이방성을 보인다. 따라서, 이들 분말에 자장을 가하면 각 분말의 c-축은 자장방향으로 정렬되게 된다. 지금 Nd₂Fe₁₄B와 같이 상온에서는 c-축을 자화용이축으로 하는 일축결정자기이방성을 보이거나 저온에서 스핀재배열을 일으키어 콘이방성을 나타내는 정방정계의 자성체를 생각하자. 상온에서 이 자성체의 분말에 자장을 가하면 앞서 언급한 바와같이 c-축이 정렬된 시료가 얻어지게 된다. 지금 Fig. 1과 같이 정렬방향을 z-축으로 하는 직교좌표계에서 각 θ 만큼 어긋나게 정렬된 임의의 분말을 생각하자. 이 분말을 스핀재배열온도 이하로 냉각시키

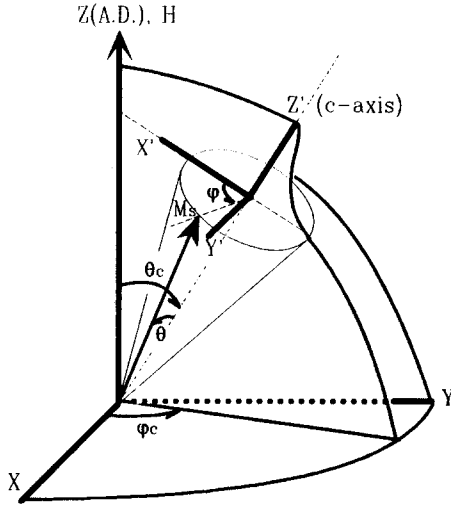


Fig. 1. Coordinate system which shows the position M_s and the relations of θ , θ_c , φ and φ_c when applied field is parallel to alignment direction, A.D. (for this case basal plane anisotropy is considered).

면 c -축을 향하고 있던 자기모멘트는 $\{100\}$ 면 혹은 $\{110\}$ 면을 따라 스핀재배열각 θ 만큼 기울어지게 된다. 여기에서, 자기모멘트가 콘면내에서 회전할수 있을만큼 충분히 큰 자장을 z -축으로 가한 다음 자장을 제거하면, 반자장효과를 무시할 경우, 자기모멘트 M_s 는 자장방향과 가장 작은 각을 이루는 용이축상에 놓이게 된다. 여기에서 분말의 c -축을 z' 으로 하고 z - z' 면상에 있으면서 z' 과 수직인 방향을 x' 으로 하는 직교좌표계를 취하고, x' , y' , z' 으로의 단위벡터를 각각 \vec{i}' , \vec{j}' , \vec{k}' 이라고 할 경우 분말 자화의 단위벡터 \vec{m} 은 다음과 같이 표시된다.

$$\vec{m} = \sin\theta\cos\varphi \vec{i}' + \sin\theta\sin\varphi \vec{j}' + \cos\theta \vec{k}' \quad (1)$$

여기에서, $\vec{i}' = -\cos\theta_c \cos\varphi_c \vec{i} - \cos\theta_c \sin\varphi_c \vec{j} + \sin\theta_c \vec{k}$,

$$\vec{k}' = -\sin\theta_c \cos\varphi_c \vec{i} + \sin\theta_c \sin\varphi_c \vec{j} + \cos\theta_c \vec{k},$$

$$\vec{j}' = \vec{k}' \times \vec{i}' = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \sin\theta_c \cos\varphi_c & \sin\theta_c \sin\varphi_c & \cos\theta_c \\ -\cos\theta_c \cos\varphi_c & -\cos\theta_c \sin\varphi_c & \sin\theta_c \end{vmatrix}$$

이고 \vec{i} , \vec{j} , \vec{k} 는 각각 x , y , z 축으로의 단위벡터이다.

\vec{m} 의 z -축 방향 성분을 m_z 라 할 경우

$$m_z = \vec{m} \cdot \vec{k} = (\sin\theta\cos\varphi \vec{i}' + \sin\theta\sin\varphi \vec{j}' + \cos\theta \vec{k}') \cdot \vec{k} \quad (2)$$

$$= \sin\theta\cos\varphi\sin\theta_c + \cos\theta\cos\theta_c$$

가 된다. 각 분말의 c -축이 정렬방향을 중심으로 가우스분포를 이룬다고 가정할 경우 z -축 방향으로 관찰되는 자화 $M_0(\parallel)$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{M_0(\parallel)}{M_s} = \frac{\int_{\varphi=0}^{\pi/4} \int_{\theta_c=0}^{\pi/2} A G_{\theta_c} d\varphi d\theta_c}{\int_{\varphi=0}^{\pi/4} \int_{\theta_c=0}^{\pi/2} G_{\theta_c} d\varphi d\theta_c} \quad (3)$$

식 (3)에서, $A = \sin\theta\cos\varphi\sin\theta_c + \cos\theta\cos\theta_c$ 이 것이며 G_{θ_c} 는 $\sin\theta_c \exp(-\theta_c^2/2\theta_0^2)$ 로 표현되는 가우스분포함수이고 θ_0 는 정렬도인자이며, 각도 φ 에 대한 적분은 저면이방성(basal plane anisotropy)을 고려한 것으로 정방정의 경우 $\varphi=0 \sim \pi/4$ 사이의 값을 취할 수 있다.

이번에는 충분히 큰 자장을 분말의 정렬방향에 대하여 수직(x -축 방향)으로 가한 다음 자장을 제거한 경우를 생각하자. 이 경우 자기모멘트 M_s 는 역시 자장방향과 가장 작은 각을 이루는 용이축상에 놓이게 된다. Fig. 2와 같이 c -축을 z' 으로 하고, z' - x 면상에 있으면서 z' 에 수직인 방향을 x' 으로 하는 직교좌표계를 취할 경우 단위벡터 \vec{i}' , \vec{j}' , \vec{k}' 와 \vec{i} , \vec{j} , \vec{k} 와의 사이에는 각각 다음과 같은 관계가 주어지게 된다.

$$\vec{k}' = \sin\theta_c \cos\varphi_c \vec{i} + \sin\theta_c \sin\varphi_c \vec{j} + \cos\theta_c \vec{k},$$

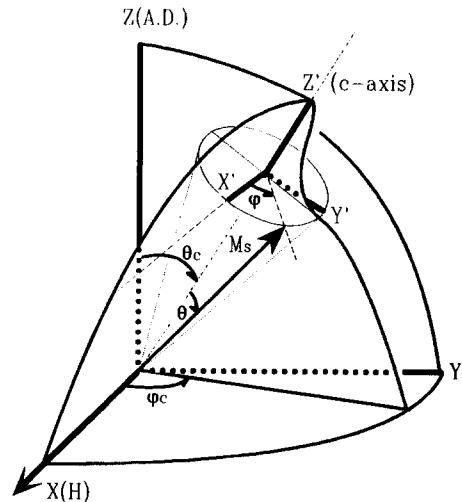


Fig. 2. Coordinate system which shows the position M_s and the relations of θ , θ_c , φ and φ_c when applied field is perpendicular to alignment direction, A.D. (for this case basal plane anisotropy is considered).

$$\vec{j}' = \frac{\vec{k}' \times \vec{i}'}{\sin(\vec{i}', \vec{k}')} = \frac{1}{\sin\{\cos^{-1}(\sin\theta_c \cos\varphi_c)\}} \begin{vmatrix} \vec{i}' & \vec{j}' & \vec{k}' \\ \sin\theta_c \cos\varphi_c & \sin\theta_c \sin\varphi_c & \cos\theta_c \\ 1 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

$$= \frac{(\cos^2\theta_c + \sin^2\theta_c \sin^2\varphi_c)\vec{i}' - \sin^2\theta_c \sin\varphi \cos\varphi \vec{j}' - \sin\theta_c \cos\theta_c \cos\varphi_c \vec{k}'}{\sin\{\cos^{-1}(\sin\theta_c \cos\varphi_c)\}}$$

여기에서, \vec{m} 의 x-축 방향 성분을 m_x 라 할 경우

$$m_x = \vec{m} \cdot \vec{i}' = (\sin\theta \cos\varphi \vec{i}' + \sin\theta \sin\varphi \vec{j}' + \cos\theta \vec{k}') \cdot \vec{i}' \quad (4)$$

$$= \sin\theta \cos\varphi \frac{(\cos^2\theta_c + \sin^2\theta_c \sin^2\varphi_c)}{\sin\{\cos^{-1}(\sin\theta_c \cos\varphi_c)\}} + \cos\theta \sin\theta_c \cos\varphi_c = \sin\theta \cos\varphi \frac{1 - \sin^2\theta_c \cos^2\varphi_c}{\sin\{\cos^{-1}(\sin\theta_c \cos\varphi_c)\}} + \cos\theta \sin\theta_c \cos\varphi_c$$

가 되며, 각 분말의 c-축이 정렬방향을 중심으로 가우스분포를 이룬다고 가정할 경우 x-축 방향으로 관찰되는 자화 $M_0(\perp)$ 은 다음과 같이 표현되게 된다.

$$\frac{M_0(\perp)}{M_s} = \frac{\int_{\varphi=0}^{\pi^4} \int_{\varphi_c=0}^{\pi^2} \int_{\theta_c=0}^{\pi^2} BG_{\alpha} d\varphi d\varphi_c d\theta_c}{\int_{\varphi=0}^{\pi^4} \int_{\varphi_c=0}^{\pi^2} \int_{\theta_c=0}^{\pi^2} G_{\alpha} d\varphi d\varphi_c d\theta_c} \quad (5)$$

여기에서,

$$B = \sin\theta \cos\varphi \frac{1 - \sin^2\theta_c \cos^2\varphi_c}{\sin\{\cos^{-1}(\sin\theta_c \cos\varphi_c)\}} + \cos\theta \sin\theta_c \cos\varphi_c$$

이다.

식 (5)를 식 (3)으로 나누면 포화자화되는 무관한 스핀재배열각과 $M_0(\perp)/M_0(\parallel)$ 와의 관계식 (6)이 얻어지게 된다. 즉, 정렬방향에 수직, 수평으로 측정된 자화곡선에서 $M_0(\perp)/M_0(\parallel)$ 을 구하면 이로부터 스핀재배열각 θ 를 계산할 수 있음을 알게된다. 여기에서 $M_0(\perp)$ 및 $M_0(\parallel)$ 은 자화회전과정에서 $H=0$ 일때의 자화를 의미하는 것으로 실험적으로는 높은 자장영역으로부터의 외삽에 의하여 구할 수 있는 값들이다.

$$\frac{M_0(\perp)}{M_0(\parallel)} = \frac{\int_{\varphi=0}^{\pi^4} \int_{\varphi_c=0}^{\pi^2} \int_{\theta_c=0}^{\pi^2} BG_{\alpha} d\varphi d\varphi_c d\theta_c}{\int_{\varphi=0}^{\pi^4} \int_{\varphi_c=0}^{\pi^2} \int_{\theta_c=0}^{\pi^2} AG_{\alpha} d\varphi d\varphi_c d\theta_c} \quad (6)$$

이상은 저면이방성이 존재하는 경우에 대하여 기술한 것이나 저면이방성이 없는 경우 자기모멘트는 항상 인가자장과 가장 작은각을 이루도록 위치하게 되므로 보다 간단히 표현되게 된다. 예를들어, 각 θ_c 만큼 어긋나게 정렬된 입의 분말에 정렬방향으로 충분한 자장을

가한 다음 자장을 제거하면 자기모멘트는 Fig. 3과 같이 정렬방향에 가장 가까운곳에 위치하게 된다. 이 경우 z 방향으로의 자화성분은

$$m_z = \cos(\theta_c - \theta) \quad (7)$$

가 된다. 분말의 c-축이 정렬방향을 중심으로하여 가우스분포를 이룬다고 가정할 경우 정렬방향으로의 관찰되는 자화는 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{M_r(\parallel)}{M_s} = \frac{\int_{\varphi_c=0}^{\pi^2} \int_{\varphi_c=0}^{\pi^2} \cos(\theta_c - \theta) G_{\alpha} d\varphi_c d\theta_c}{\int_{\varphi_c=0}^{\pi^2} \int_{\varphi_c=0}^{\pi^2} G_{\alpha} d\varphi_c d\theta_c} \quad (8)$$

한편, 정렬방향에 대하여 수직으로 충분한 자장을

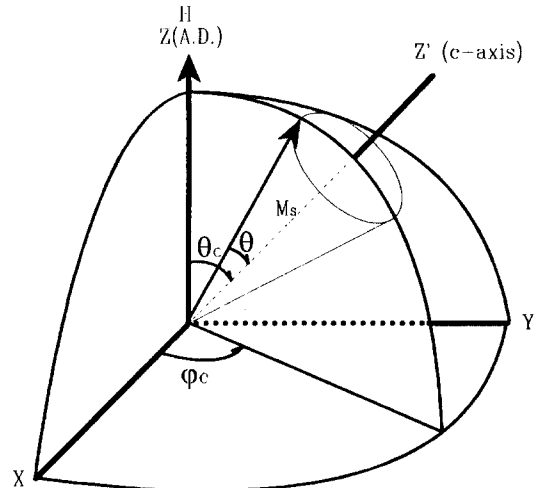


Fig. 3. Coordinate system which shows the position M_s and the relations of θ , θ_c and φ_c when applied field is parallel to alignment direction, A.D. (for this case basal plane anisotropy is neglected).

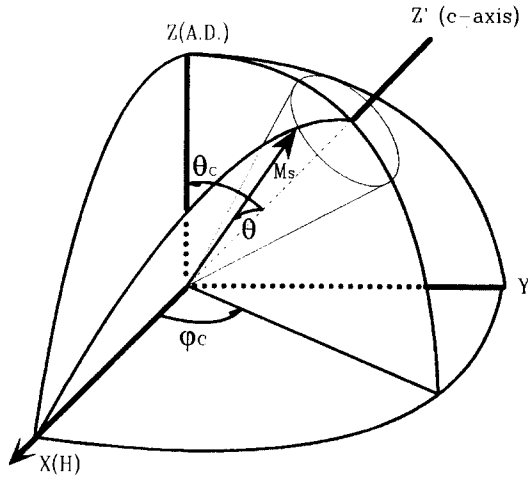


Fig. 4. Coordinate system which shows the position M_s and the relations of θ , θ_c and φ_c when applied field is perpendicular to alignment direction, A.D. (for this case basal plane anisotropy is neglected).

가한 다음 자장을 제거하는 경우 자기모멘트는 Fig. 4와 같이 인가자장방향에 가장 가까운 곳에 위치하게 된다. 이 경우 x 방향으로의 자화성분은

$$m_x = \cos\{\cos^{-1}(\sin\theta_c \cos\varphi_c) - \theta\} \quad (9)$$

가 되며 분말의 c-축이 정렬방향을 중심으로하여 가우스함수적 분포를 이룬다고 가정할 경우 인가자장방향으로 관측되는 자화는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{M_0(\perp)}{M_s} = \frac{\int_{\varphi_c=0}^{\pi/2} \int_{\theta_c=0}^{\pi/2} \{\cos^{-1}(\sin\theta_c \cos\varphi_c) - \theta\} G_{\theta_c} d\varphi_c d\theta_c}{\int_{\varphi_c=0}^{\pi/2} \int_{\theta_c=0}^{\pi/2} G_{\theta_c} d\varphi_c d\theta_c} \quad (10)$$

식 (8) 및 식 (10)로부터 포화자화와 무관한 관계식 (11)가 얻어지며 이를 이용하면 저면이방성이 없는 경우의 스핀재배열각 계산이 가능하다.

$$\frac{M_0(\perp)}{M_0(\parallel)} = \frac{\int_{\varphi_c=0}^{\pi/2} \int_{\theta_c=0}^{\pi/2} \{\cos^{-1}(\sin\theta_c \cos\varphi_c) - \theta\} G_{\theta_c} d\varphi_c d\theta_c}{\int_{\varphi_c=0}^{\pi/2} \int_{\theta_c=0}^{\pi/2} \cos(\theta_c - \theta) G_{\theta_c} d\varphi_c d\theta_c} \quad (11)$$

3. Nd₂Fe₁₄B의 스핀재배열각

앞서 유도한 스핀재배열각 계산공식 (6) 및 (11)의 타당성을 조사하기 위하여 단결정실험을 통하여 스핀재배열각이 잘 알려진 Nd₂Fe₁₄B를 대상으로 실험을 행하였다. Nd₂Fe₁₄B는 99.9%의 Nd와 Fe, 그리고 99.5%의 B를 사용하여 고주파유도로에서 용해한 다음 900 °C에서 7일간 균질화처리를 행함으로써 제조하였다. 이렇게하여 제조한 화합물을 X-선 회절시험 및 열자분석을 통하여 정방정의 단상임을 확인한 후 45 m 이하로 분쇄하여 파라핀과 섞은 다음 1.2 MA/m (15 kOe)의 자장을 가하여 자화용이축(c-축)을 정렬시킴으로써 자화곡선측정용 시료를 제작하였다.

Fig. 5는 고자장진동시편마그네토미터를 이용하여 자장중정렬방향 (dline) 및 그 수직방향 (||)으로 측정된 Nd₂Fe₁₄B 분말의 자화곡선으로 (a) 및 (b)는 각각 250 K 및 4.2 K에서 측정된 것이다. Nd₂Fe₁₄B는 스핀재배열온도인 135 K 이상에서 일축결정자기이방성을 보이므로 250 K에서 측정된 자화곡선 (a)로부터 식 (6) 및 식 (11)에 사용된 분말의 정렬도인자 θ_0 를 구할 수 있다. 정렬도인자 및 스핀재배열각 계산에 필요한 값 $\sigma_0(\perp)$ 및 $\sigma_0(\parallel)$ 은 Fig. 5의 화살표와 같이 포화자화에 해당하는 크기의 자장 이상에서 부터 H=0으로 외삽하여 구하였다. 이렇게하여 구한 250 K에서의 자화비율 $\sigma_0(\perp)/\sigma_0(\parallel)=0.4211$ 로써 분말의 c-축이 가우스함수적 분포를 이룬다고 가정할 경우 식 (12)[6]에 의하여 $\theta_0 \sim 28.15^\circ$ 로 계산된다.

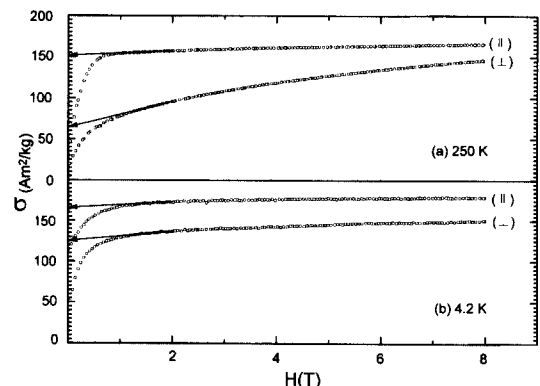


Fig. 5. Magnetization curves of Nd₂Fe₁₄B powder measured along parallel (||) and perpendicular (⊥) to alignment direction at 250 K (a) and at 4.2 K (b).

Table I. Magnetization $\sigma_0(\perp)$ and $\sigma_0(\parallel)$ obtained by extrapolation and the particle alignment factor σ_0 and spin reorientation angle θ calculated for $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$

T (K)	$\sigma_0(\perp)$ (Am ² /kg)	$\sigma_0(\parallel)$ (Am ² /kg)	$\sigma_0(\perp)/\sigma_0(\parallel)$	θ_0 (deg)	θ (deg)
250	152	64	0.4211	28.15	-
4.2	125	166	0.7530	-	30.2

$$\frac{M_0(\perp)}{M_0(\parallel)} = \frac{\sigma_0(\perp)}{\sigma_0(\parallel)} = \frac{2}{\pi} \frac{\int_{\theta=0}^{\pi/2} \sin^2\theta_c \exp(-\theta_c^2/2\theta_0^2) d\theta_c}{\int_{\theta=0}^{\pi/2} \cos\theta_c \sin\theta_c \exp(-\theta_c^2/2\theta_0^2) d\theta_c} \quad (12)$$

한편, $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 는 스핀재배열온도 이하의 저온에서 비교적 큰 저면이방성을 보인다. 따라서, 스핀재배열각의 계산에는 저면이방성이 고려된 식 (6)을 사용하여야 한다. Fig. 5(b)의 자화곡선으로부터 $\sigma_0(\perp)/\sigma_0(\parallel) = 0.7530$ 이므로 이값과 앞서 구한 정렬도인자값을 식 (6)에 대입하고 계산하면 Table I에 정리하여 나타낸 바와 같이 스핀재배열각 $\theta \approx 30.2^\circ$ 가 얻어진다.

Table II는 지금까지 보고된 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 에 대한 4.2 K에서의 스핀재배열각 측정결과를 정리하여 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와같이 단결정을 이용한 토크곡선의 측정 및 자화곡선의 측정결과들로 부터 직, 간접으로 구한 스핀재배열각은 $30 \sim 31^\circ$ 로 본 실험결과와 매우 잘 일치함을 볼 수 있다. 한편, Durst 등 [10]이 $\text{Nd}_{15}\text{Fe}_{77}\text{B}_8$ 소결자석의 자화곡선으로부터 결정자기이방성상수 K_1, K_2 를 구하고, $\theta = \sin^{-1}\sqrt{-K_1/2K_2}$ 의 관계를 이용하여 구한 스핀재배열각은 $\theta = 26^\circ$ 로 단결정에서 구한 값보다 약 15%가 작다. 이와같은 차이는 스핀재배열각의 계산에 있어서 저면이방성과 고차이방성상수가 고려되지 않고 자기이방성상수를 결정하는 오차가 포함되기 때문인 것으로 사료된다. 예를들어, 저면이방성이 무시된 식 (11)에 Fig. 5의 자화곡선 측정결과를 적용하면 저면이방성을 고려한 경우보다 약 9% 작은 $\theta = 27.5^\circ$ 가 얻어지게 된다.

4. 결 론

자장중에서 정렬시킨 다결정 자화곡선으로부터 콘

Table II. The spin reorientation angle θ of $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ at 4.2 K

specimen type	method	θ (deg.)	ref.
single crystal	torque	30.3	Tokuhara <i>et al.</i> [4]
	magnetization curve	30.7 ~30 ~30 32~33* ~30	Tokuhara <i>et al.</i> [4] Sagawa <i>et al.</i> [7] Givord <i>et al.</i> [3] Hirosawa <i>et al.</i> [8] N.C. Koon <i>et al.</i> [9]
poly crystal	anisotropy constant	26**	Durst and Kronmuller [10]
	magnetization curve	30.2	this work

* Read approximately from a figure.

** Data obtained from $\text{Nd}_{15}\text{Fe}_{77}\text{B}_8$ sintered magnet.

이방성의 스핀재배열각을 결정할 수 있는 새로운 방법을 제시하였다. 이 방법을 이용하여 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 다결정 시료의 스핀재배열각을 구한 결과 단결정과 일치하는 결과가 얻어졌다. 단결정에서만 가능 했던 스핀재배열각의 정확한 측정이 다결정에서도 가능해지므로써 강자성물질의 스핀재배열현상 및 결정자기이방성 연구에 기여하게 될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] M. Sagawa, S. Fujimura, N. Togawa, H. Yamamoto, and Y. Matsuura, *J. Appl. Phys.* **55**, 2083 (1984).
- [2] J. F. Herbst, J. J. Croat, F. E. Pinkerton, W. B. Yelon, *Phys. Rev. B* **29**, 4176 (1984).
- [3] D. Givord, H. S. Li, R. Perrier de la Bathie, *Solid State Commun.* **51**, 857 (1984).
- [4] K. Tokuhara, Y. Ohtsu, F. Ono, O. Yamada, M. Sagawa, and Y. Matsuura, *Solid State Commun.* **56**, 333 (1985).
- [5] O. Yamada, H. Tokuhara, F. Ono, M. Sagawa and Y. Matsuura, *J. Magn. Magn. Mater.* **54-57**, 585 (1986).
- [6] Y. B. Kim and Jin Han-min, *J. Magn. Magn. Mater.* **169**, 114 (1997).
- [7] M. Sagawa, S. Fujimura, H. Yamamoto, Y. Matsuura, and S. Hirosawa, *J. Appl. Phys.* **57**, 4094 (1985).
- [8] S. Hirosawa, Y. Matsuura, H. Yamamoto, S. Fujimura, and M. Sagawa, *J. Appl. Phys.* **59**, 873 (1986).
- [9] N. C. Koon, B. N. Das, M. Rubinstein, and J. Tyson, *J. Appl. Phys.* **57**, 4091 (1985).
- [10] K. -D. Durst and H. Kronmuller, *J. Magn. Magn. Mater.* **59**, 86 (1986).

A New Method to Determine the Spin Reorientation Angle of Cone Anisotropy from Polycrystalline Magnetization Curves : Application to Nd₂Fe₁₄B

Y. B. Kim and Jin Han-min*

*Korea Research Institute of Standards and Science
P.O. BOX 3, Taedok Science Town, Taejeon 305-606, Korea
Jilin University, Changchun, People's Republic of China

M. J. Kim and T. K. Kim

Department of Metallurgical Engineering, Chungnam National University, Taejeon 305-764, Korea

(Received 12 March 1998, in final form 10 June 1998)

A new method to calculate the spin reorientation angle of cone anisotropy from magnetization curves of magnetically aligned powder is suggested. The spin reorientation angle of polycrystalline Nd₂Fe₁₄B determined by this method coincided with the results obtained from torque magnetometry or magnetization measurements on single crystal. The underestimation of about 9% is expected if the basal plane anisotropy is neglected in determination of the spin reorientation angle of Nd₂Fe₁₄B at 4.2 K.