

단순 일축 비등방성 자성체의 돌림힘 곡선의 개형

허진 · 신성철

한국과학기술원 물리학과, 대전 305-701

(1998년 1월 26일 받음, 1998년 2월 20일 최종수정본 받음)

본 연구에서는 비가역 자벽이동 및 걸맞음회전 이론을 함께 고려하여 단순 일축 비등방성 자성체의 돌림힘 곡선에서 등근(미분가능한) 정점들이 존재하기 위한 조건을 구하고 돌림힘 곡선의 개형을 이론적으로 연구하였다. 일축 비등방성 자성체의 돌림힘 곡선을 인가 자기마당이 변화함에 따라, 이력현상의 유무 및 자기화 역전기구의 종류와 미분 가능한 정점의 갯수에 의해 8가지의 유형들로 구별할 수 있었다. 비등방성 자기마당 세기가 같은 시료라도 자벽의 생성 및 이동에 필요한 최저 임계자기마당 세기가 다르다면 상이한 모양의 돌림힘 곡선을 보였다. 한편, 미분 가능한 정점의 높이를 활용하여 포화 자기화량 및 비등방성 에너지 상수를 측정하는 기존의 돌림힘 곡선 해석법들은 인가 자기마당 세기가 비등방성 자기마당 세기의 약 77% 이상일 때 정확한 측정이 가능함을 알 수 있었다.

I. 서 론

일축 비등방성 자성체는 자기 및 광자기 기록매체, 기록 및 재생 헤드, 자속 증폭기(magnetic flux multiplier), 센서(sensor) 및 영구자석등 거의 모든 자기응용 분야에서 매우 중요한 역할을 하여 일축 비등방성 자성체에 대한 연구는 매우 활발히 진행되어 왔다 [1-3]. 일축 비등방성 자성체의 자기 비등방성 및 자기화량과 같은 중요한 자기적 특성에 대한 연구에서 자기마당의 함수로 돌림힘(torque)을 측정하는 방법은 매우 신뢰할 만하다고 알려져 있다 [4]. 특히, 돌림힘 τ 를 자기마당 방향 ϕ 의 함수로 측정하여 얻을 수 있는 $\tau-\phi$ 곡선은 용이축의 방향에 대한 정확한 정보를 주므로 널리 활용되고 있는데 [5-7], 통상 돌림힘 곡선이라 함은 $\tau-\phi$ 곡선을 일컫는다.

기존의 $\tau-\phi$ 곡선의 개형과 회전 이력현상에 대한 연구는 주로 Stoner와 Wohlfarth의 걸맞음회전 이론을 기반으로 전개되었다 [8, 9]. 일반적으로 $\tau-\phi$ 곡선의 개형은, Fig. 1에서와 같이, 비등방성 자기마당 세기와 비교했을 때, 자기마당 세기가 충분히 높을 때는 $\sin 2\phi$ 에 비례하고, 충분히 낮을 때는 $\sin \phi$ 에 비례함이 알려져 있다. 여기서 ϕ 는 용이축으로부터 측정된 자기마당 방향이다. 따라서, $0 \leq \phi < \pi$ 에서 자기마당 세기가 충분히 높을 때는 등근 2개의 양정점 A와 음정점 B를 얻을 수 있고, 자기마당 세기가 충분히 낮을 때는 등근 1개의 양정점 C만을 얻을 수 있다. 여기서 등근 정점이란 미분 가능한 정점들의 의미이다. 실험 $\tau-\phi$ 곡선에서 등근 정점의 좌표는 비등방성 에너지상수 및 포화 자기화량과 직접적인 관계를 갖

으므로 돌림힘 곡선 해석에 매우 중요하다. 그러나 중간 세기의 자기마당에서는 자기화가 역전되어 연속성이 없어지고, 비가역 자벽이동에 의해 자기화가 역전되는 경우에는 등근 정점이 존재하지 않을 수도 있다. 따라서, 기존에 등근 정점의 좌표를 활용하여 비등방성 에너지를 측정하는 해석법들 [5-7]은 낮은 자기마당 세기에서 얻어진 $\tau-\phi$ 곡선에 적용할 수 없으나, 그 적용 기준은 아직 명확하지 않다. 결론적으로 비등방성 자기마당 세기에 비해 상대적으로 낮은 세기의 자기마당에서 얻어지는 $\tau-\phi$ 곡선의 개형에

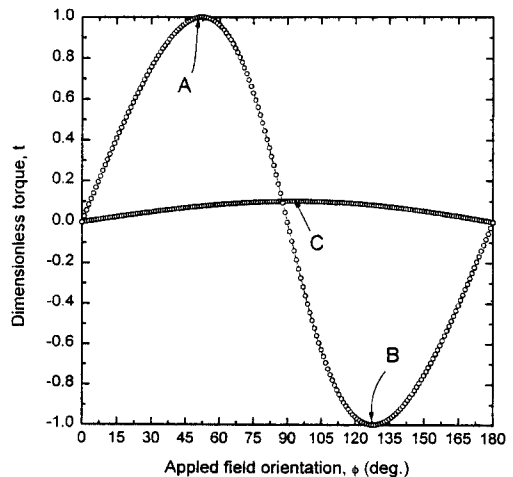


Fig. 1. 충분히 높거나 낮은 자기마당 세기에서 얻어지는 이론적인 무차원 돌림힘곡선들. 정점 B, C의 좌표는 알려져 있다. (Ref. 8)

대한 체계적 연구는 새로운 τ - ϕ 곡선 해석법 개발에 필수적일 뿐만 아니라, 기존의 등근 정점 좌표들을 활용하는 τ - ϕ 곡선 해석법들의 명확한 적용 범위를 알아야 필요하다. 본 논문에서는 자기화 역전을 기술하는 새이론을 근거로 τ - ϕ 곡선의 정점들의 존재 조건을 구하여 τ - ϕ 곡선의 개형에 대한 체계적인 연구를 하였다.

II. 이론적 배경

Fig. 2과 같이 자기화 용이축을 포함하는 평면위에서 시료에 세기가 H 인 자기마당을 인가할 때, 균질한 포화 자기화량 M 을 갖는 시료가 갖는 단위 부피당 총 에너지 E 는 다음과 같은 식 (1)로 나타낼 수 있다.

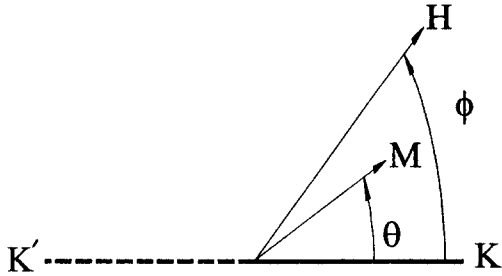


Fig. 2. 본연구에서 쓰인 좌표계. $\overrightarrow{K'K}$ 의 방향은 초기에 포화된 용이축 방향을 나타내며, 방향 측정의 기준이 된다.

$$E = K \sin^2 \theta - MH \cos(\phi - \theta) \quad (1)$$

여기서, K 는 형상비등방성과 고유비등방성을 함께 고려한 일차 일축 비등방성 에너지 상수이고, θ 와 ϕ 는 각각 초기에 포화된 용이축 방향으로부터 반시계 방향으로 측정된 자기화와 자기마당의 방향들이다. 평형상태에서 자기화는 식 (1)의 E 를 최소화하는 방향을 갖으므로 평형 상태의 조건 ($\partial E / \partial \theta = 0$)은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\frac{\partial E}{\partial \theta} = K \sin(2\theta) - MH \sin(\phi - \theta) = 0 \quad (2)$$

한편, 돌림힘 τ 는 자기화 및 자기마당의 벡터곱이므로 다음과 같이 표현된다.

$$\tau = MH \sin(\phi - \theta) \quad (3)$$

통상, 유효 비등방성 자기마당(1st-order effective ani-

sotropy field, H_K)은 $H_K = 2K/M$ 으로 정의된다. 여기서, $t = \tau/K$ 로 정의된 무차원(dimensionless) 돌림힘 t 를 도입하면, (2)와 (3)로부터 t 는 다음 식들 (4) 및 (5)로 나타낼 수 있다.

$$t = 2h \sin(\phi - \theta), \quad (4)$$

$$= \sin 2\theta. \quad (5)$$

여기서, 무차원 자기마당세기 h 는 $h = H/H_K$ 로 정의되었다. 이론 t - ϕ 곡선은 주어진 ϕ 와 h 에 대해 식들 (4) 및 (5)를 만족하는 수학적 해집합에서 자기화 역전을 고려하여 물리적으로 합당한 해집합을 선택하면 얻을 수 있다.

이제, 자기마당의 세기를 고정하고 그 방향을 변화시키며 자기화하는 과정을 고려한다. $\phi = \pi$ 일 때 한 자벽이 생성 및 이동에 필요한 자기마당의 최저 세기를 H_0 라 하면, 자기화가 역전되는 자기마당의 방향 ϕ_c 는 다음과 같이 표현된다 [10].

$$\phi_c = \begin{cases} \text{Not exist} & \text{for } h < h_0, \\ \frac{\pi}{2} + \sin^{-1}\left(\frac{h_0}{h}\right) & \text{for } h_0 \leq h \leq h'_x, \\ \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2}\sin^{-1}\left(\frac{2}{h^2}\left(\frac{1-h^2}{3}\right)^{\frac{3}{2}}\right) & \text{for } h'_x \leq h < 1, \\ \frac{\pi}{2} & \text{for } h \geq 1. \end{cases} \quad (6)$$

여기서, $h_0 = H_0/H_K$ 로 정의되었고, h'_x 은 다음과 같이 정의 되었다.

$$h'_x = \begin{cases} \sqrt{1 - 3h_0^{\frac{3}{2}} + 3h_0^{\frac{3}{4}}} & \text{for } h_0 \leq \frac{\sqrt{2}}{4}, \\ \frac{1}{2} & \text{for } h_0 \geq \frac{\sqrt{2}}{4}. \end{cases} \quad (7)$$

h_0 의 함수인 h'_x 의 물리적 의미는 자기화 역전기구가 자벽이동에서 결맞음회전으로 바뀌는 기준으로 $h \leq h'_x$ 이면 비가역 자벽이동에 의해, $h \geq h'_x$ 이면 결맞음회전에 의해 자기화가 역전된다. 여기서 $h_0 \geq \sqrt{2}/4$ 이면 비등방성 자기마당세기의 50%보다 높은 자기마당세기 ($h > 0.5$)에서는 항상 결맞음회전에 의해 자기화가 역전되기 때문에 $h_0 \geq \sqrt{2}/4$ 일 때는 $h'_x = 0.5$ 로 정하였다. ϕ_c 는 $h_0 \leq \sqrt{2}/4$ 이면 $\pi/2$ 에서 π 까지 연속적인 값을 갖는 반면, $\sqrt{2}/4 < h_0 < 0.5$ 이면 $\pi/2 + \sin^{-1}(h_0/h)$ 에서 $3\pi/4$ 까지의 값을 갖지 않고 $h_0 \geq 0.5$ 이면 결맞음회전 이론과 같이 $3\pi/4$ 에서 π 까지의 값을 갖지 않는다.

III. 돌림힘 곡선 개형에 대한 논의

1. 미분 가능한 정점들의 좌표와 존재 조건

먼저 h 가 충분히 작으면 ($h < h_0$), $\theta \approx 0$ 이고 자기화는 역전되지 않으므로, $(\phi - \theta)$ 의 값은 연속적으로 변화한다. 식 (4)로부터 Fig. 1에서와 같이 높이가 $2h$ 인 정점이 나타나고, 주기가 2π 이고, 이력현상이 없는 $t-\phi$ 곡선이 얻어진다. 정점 C 가 나타나는 자기마당 방향을 ϕ_{lp} 라 하고, 이때의 자기화 방향을 θ_{lp} 라 하면, 식 (4)로부터 $\phi_{lp} - \theta_{lp} = \pi/2$ 이고, 식들 (4)와 (5)로부터 $2h = \sin 2\theta_{lp}$ 임을 알 수 있다. 여기서, θ_{lp} 값은 $0.5 \sin^{-1}(2h)$ 로 나타낼 수 있으므로, 높이가 $2h$ 인 정점이 나타나는 자기마당방향 ϕ_{lp} 는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\phi_{lp} = \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} \sin^{-1}(2h) \quad (8)$$

한편, h 가 충분히 높으면 ($h \geq 1$), $\phi - \theta \approx 0$ 이고 θ 의 값은 연속적으로 변화하여 $\pi/2$ 를 지난다. 식 (5)로부터 주기가 π 이고, 높이가 각각 1과 -1인 등근 정점들을 갖고, 이력현상이 없는 $t-\phi$ 곡선이 얻어짐을 알 수 있다. Fig. 1에서와 같이 높이가 1인 양정점 A 가 나타나는 자기마당의 방향을 ϕ_{hp+} 라 하고, 높이가 -1인 정점 B 가 나타나는 자기마당의 방향을 ϕ_{hp-} 라 정하였다. 이때 양정점 및 음정점에 해당하는 자기화 방향들을 각각 θ_{hp+} 및 θ_{hp-} 라 정하였다. 식 (5)로부터 $\theta_{hp+} = \pi/4$ 및 $\theta_{hp-} = 3\pi/4$ 이 성립함을 알 수 있는데, 식들 (4)와 (5)로부터 높이가 1인 정점이 나타나는 자기마당 방향 ϕ_{hp+} 은 다음과 같이 주어짐이 알 수 있다 [6].

$$\phi_{hp+} = \frac{\pi}{4} + \sin^{-1}\left(\frac{1}{2h}\right) \quad (9)$$

여기서 $t-\phi$ 곡선의 대칭성을 고려하면 높이가 -1인 정점이 나타나는 자기마당방향 ϕ_{hp-} 는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\phi_{hp-} = \frac{3\pi}{4} - \sin^{-1}\left(\frac{1}{2h}\right) \quad (10)$$

ϕ_{lp} , ϕ_{hp+} , 및 ϕ_{hp-} 를 Fig. 3에 $h_0 = 0.1$ 인 시료의 ϕ_c 와 함께 도식하였다.

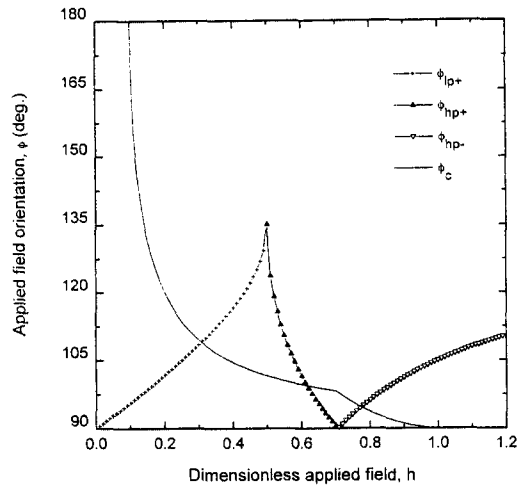


Fig. 3. 높이가 $2h$, 1 및 -1인 정점들이 나타나는 자기마당 방향들 (ϕ_{lp} , ϕ_{hp+} , 및 ϕ_{hp-})과 자기화가 역전되는 자기마당 방향(ϕ_c)을 도식하였다. 여기서, $h_0 = 0.1$ 이다.

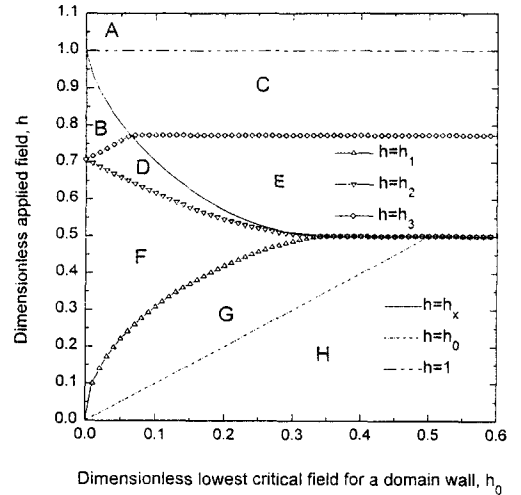


Fig. 4. 이력현상의 유무, 등근정점들의 유무, 자기화 역전기구의 종류에 의해 구별되는 $t-\phi$ 곡선의 8가지 유형들을 설명하는 그림.

일반적으로 중간 자기마당 영역에서 측정된 $t-\phi$ 곡선은 이력 현상 때문에 등근 정점들이 나타나지 않을 수 있다. 등근 정점들이 존재하기 위해서는 등근 정점들이 자기화가 역전되기 전에 나타나야 한다. 즉, ϕ_{lp} , ϕ_{hp+} , 및 ϕ_{hp-} 가 존재하기 위해서는 이들이 각각 ϕ_c 보다 작아야 한다. 이 조건들은 각각 $h < h_1$, $h > h_2$, $h > h_3$ 들과

$$h_1 = \begin{cases} \sqrt{\frac{2^{\frac{1}{3}} h_0^2}{(-27 h_0^4 + 3 h_0^3 \sqrt{-12 + 81 h_0^2})^{\frac{1}{3}}} + \frac{(-27 h_0^4 + 3 h_0^3 \sqrt{-12 + 81 h_0^2})^{\frac{1}{3}}}{3 \cdot 2^{\frac{1}{3}}}} & \text{for } h_0 \leq \frac{\sqrt{2}}{4}, \\ \frac{1}{2} & \text{for } h_0 > \frac{\sqrt{2}}{4}. \end{cases} \quad (11)$$

$$h_2 = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{4} + \left(\frac{1}{2} - \sqrt{2} h_0\right)^2} & \text{for } h_0 \leq \frac{\sqrt{2}}{4}, \\ \frac{1}{2} & \text{for } h_0 > \frac{\sqrt{2}}{4}. \end{cases} \quad (12)$$

$$h_3 = \begin{cases} \sqrt{2 h_0^2 + \sqrt{2} h_0} + \frac{1}{2} & \text{for } h_0 \leq \left(\frac{1 - \sqrt{2\sqrt{3} - 3}}{2}\right)^{\frac{3}{2}}, \\ \sqrt{\frac{-4 + 3\sqrt{3}}{2}} & \text{for } h_0 \geq \left(\frac{1 - \sqrt{2\sqrt{3} - 3}}{2}\right)^{\frac{3}{2}}. \end{cases} \quad (13)$$

동등하다. 따라서, 둥근 정점이 나타나지 않을 조건은 $h_1 \leq h \leq h_2$ 이다. 여기서, h_1, h_2, h_3 를 각각 $\phi_c = \phi_{lp}, \phi_c = \phi_{hp+}, \phi_c = \phi_{hp-}$ 를 만족하는 무차원 자기마당 세기들이다. 식 (6)과 (8), (9), (10)들로부터 h_1, h_2, h_3 들의 수학적 표현들은 다음 식들로 표현된다.

여기서, $h_0 > \sqrt{2}/4$ 일 때, $h \geq 0.5$ 이면 결맞음회전에 의해 자기화가 역전되므로 $h_1 = h_2 = 0.5$ 로 정하였다. Fig. 4에 h_0 와 h_1, h_2, h_3 의 관계들을 기호들로 나타냈다. $h_0 = 0$ 이면 $h_1 = 0, h_2 = h_3 = 0.71$ 이다. 한편, h_0 가 증가하면 h_1 는 증가하고 h_2 는 감소하여, $h_0 = 0.35$ 일 때 $h_1 = h_2 = 0.5$ 이다. 즉, 시료의 h_0 가 높을 수록 낮은 자기마당 세기에서 높이가 $2h$ 인 정점을 얻을 수 있는 최고 자기마당 세기(h_1)가 높아지고, 높은 자기마당 세기에서 높이가 1인 정점을 얻기 위한 최저 자기마당 세기(h_2)가 낮아진다. 한편, h_0 가 증가하면 h_3 는 증가하다가, $h_0 > 0.06$ 일 때 약 0.77이 된다. 여기서, $0.71 \approx 1/\sqrt{2}, 0.35 \approx \sqrt{2}/4, 0.06 \approx (1 - \sqrt{2\sqrt{3} - 3})^{3/2}/2^{3/2}$ 및 $0.77 \approx \sqrt{-4 + 3\sqrt{3}}/\sqrt{2}$ 임을 이용하였다. 요약하면 $h < h_1$ 이면 높이가 $2h$ 인 정점만 ϕ_{lp} 에서 나타나고, $h_2 < h < h_3$ 이면 높이가 1인 정점만 ϕ_{hp+} 에서 나타나고 $h_3 < h$ 이면 높이가 1 및 -1인 정점들이 각각 ϕ_{hp+} 와 ϕ_{hp-} 에서 나타난다.

2. t - ϕ 곡선의 8가지 개형

Fig. 4는 한 자벽이 생성되거나 이동하기 위해 필요한 최저 무차원 자기마당 h_0 와 자기마당세기 h 에 따른 이력 현상의 유무, 미분 가능한 정점의 갯수, 자기

화 역전기구로 구별되는 8개의 영역들을 설명하기 위한 그림이다. h_0 및 h 로 이루어지는 공간에서 8개의 영역들은 일축 비등방성 자성체의 t - ϕ 곡선 형태가 8가지 유형들을 갖음을 의미한다. 각 유형의 특징은 다음과 같다. A 영역($h > 1$)과 H 영역($h < h_0$)에서는, t - ϕ 곡선이 이력현상이 없이 연속적이다. B, D, F, G 영역들($h_0 \leq h \leq h'_x$)에서는 자기화 역전이 비가역 자벽이동에 의해 일어나고, 높은 세기의 C, E 영역들($h'_x \leq h$)에서는 결맞음회전에 의해 일어나는데, $h_0 \leq h < 1$ 이면 항상 이력현상이 나타난다. B와 C 영역들은 자기화 역전기구가 서로 다르지만 높이가 ± 1 인 두개의 정점들이 나타나는 공통점을 갖는다. B 영역은 자벽이동에 의해 자기화가 역전되며 $h_0 < 0.06$ 인 연자성체에서만 나타나고, C 영역에서는 결맞음회전에 의해 자기화가 역전되며 $h_0 > 0$ 이기만 하면 나타난다. D와 E 영역들도 자기화 역전기구는 서로 다르지만, 높이가 1인 정점만이 나타나는 공통점을 갖는다. D 영역은 $h_0 > 0.35$ 인 시료에서는 나타나지 않고, E 영역은 $h_0 < 0.06$ 인 시료에서는 나타나지 않는다. $h_0 > 0.35$ 인 시료에서는 나타나지 않는 F 영역에서는 미분 가능한 정점이 존재하지 않는다. G 영역에서는 자벽이동에 의해 자기화가 역전되지만, 높이가 $2h$ 인 정점이 나타난다. 한편, 본 연구 결과는 h_0 및 비등방성의 세기와 방향이 분포되어 있는 복잡한 자성체의 돌림힘 곡선 해석에도 활용될 수 있다. 예를 들어, 두개의 단순 일축 비등방성 자성체들로 이루어진 계에서는 8×8 개의 서로 다른 t - ϕ 유형을 얻을 수 있을 것이다.

3. 단순 일축 비등방성 자성체의 5가지 유형

일축 비등방성 자성체는 h_0 에 따라 서로 다른 $t-\phi$ 곡선의 개형을 갖는 5가지 시료들로 분류된다. 분류의 기준이 되는 h_0 의 값들은 0, 0.06, 0.35, 0.5 이다. 이제, 5가지 시료에서 나타나는 $t-\phi$ 곡선의 개형을 살펴보자. 첫번째 $h_0 \approx 0$ 인 이상적인 연자성체의 돌림힘 곡선의 개형은 자벽이동에 의해 항상 $\phi \approx \pi/2$ 에서 자기화가 갑자기 역전되어, 이력현상이 매우 작은 것이 특징이다. 이 경우 양정점과 음정점의 절대값이 항상 같은데, $t-\phi$ 곡선의 개형은 A, B, F의 3가지 유형들로 구성된다(Fig. 5). 두번째, 보자력이 작은 연자성체에 해당하는 $0 < h_0 < 0.06$ 인 시료에서는 A, B, C, D, F, G, H의 구역들에 해당하는 7가지 유형들로 구성되는 $t-\phi$ 곡선의 개형을 갖는다(그림 6). 여기서, B, C 영역에 해당하는 $t-\phi$ 곡선의 유형들은 자기화 역전기구가 다르지만 등근 정점의 갯수가 2로 서로 같기 때문에 정성적으로는 구별하기 어렵다. 세번째, $0.06 \leq h_0 < 0.35$ 인 시료는 가장 흔히 접할 수 있는 경자성체에 해당하는데, 이 시료는 A, C, D, E, F, G, H 구역들에 해당하는 7가지 유형들로 구성되는 $t-\phi$ 곡선의 개형을 갖는다(Fig. 7). 여기서, 등근 정점의 갯수가 1인 D, E 형태들도 정성적으로는 잘 구별되지 않는다. 따라서 두번째 및 세번째 유형의 개형은, h_0 및 h 에 따라, 정성적으로도 잘 구별되는 6가지 $t-\phi$ 곡선 형태들을 갖는다. 한편, $h_0 \approx 0.35$ 인 시료에서는 등근 정점이 나타나지 않는 자기마당 세기 구간이 매우 작은

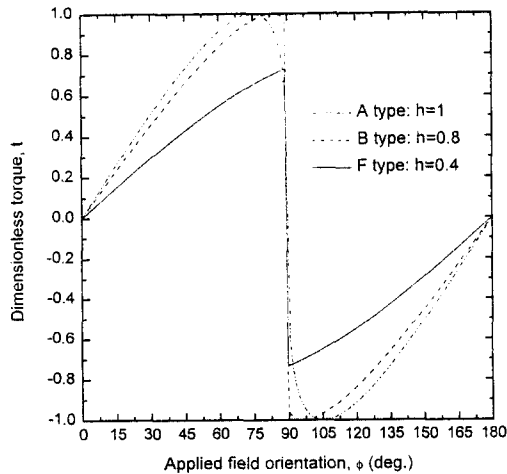


Fig. 5. $h_0 = 0$ 인 시료에서 나타나는 전형적인 3가지 $t-\phi$ 곡선 형태들.

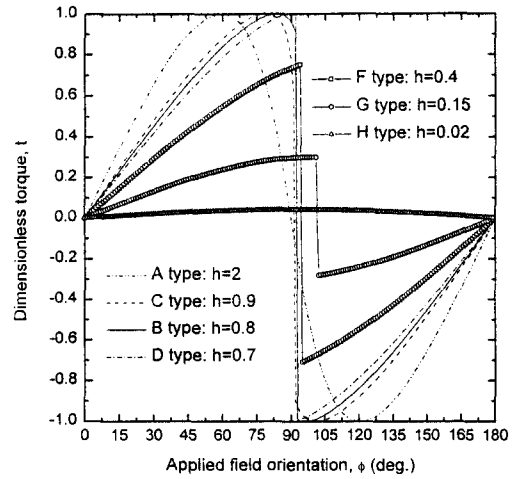


Fig. 6. $h_0 = 0.03$ 인 시료에서 나타나는 전형적인 7가지 $t-\phi$ 곡선 형태들. 여기서 B와 C 형태는 정성적으로는 구별하기 어렵다.

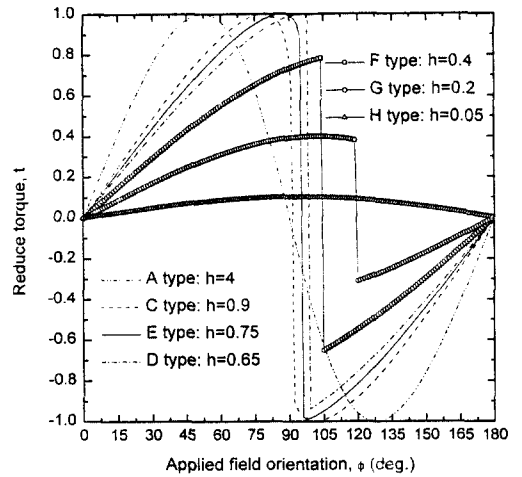


Fig. 7. $h_0 = 0.1$ 인 시료에서 나타나는 전형적인 7가지 $t-\phi$ 곡선 형태들. 여기서 D와 E 형태는 정성적으로는 구별하기 어렵다.

것이 특징이다. 두번째 시료와 세번째 시료의 공통된 특징중 하나는 인가하는 자기마당 세기가 변화함에 따라 자기화가 역전되는 자기마당 방향이 $\pi/2$ 에서 π 까지 연속적으로 나타나는 것이다. 뚜렷한 차이는 높이가 -1 인 정점이 나타나는 자기마당 세기가 두번째 시료에서는 인가하는 자기마당에 의존하지만 세번째 시료에서는 약 0.77으로 상수이다. 네번째, $0.35 \leq h_0$

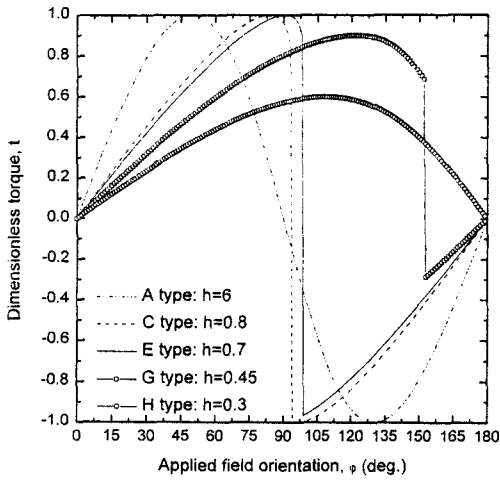


Fig. 8. $h_0 = 0.4$ 인 시료에서 나타나는 전형적인 5가지 $t-\phi$ 곡선 형태들.

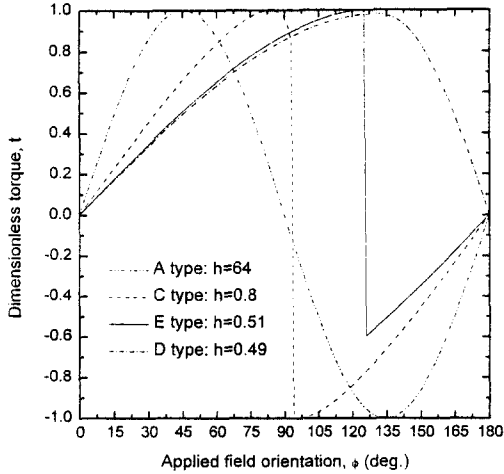


Fig. 9. $h_0 = 0.5$ 인 시료에서 나타나는 전형적인 4가지 $t-\phi$ 곡선 형태들.

< 0.5 인 시료는 A, C, E, G, H 구역에 해당하는 5가지 유형들로 구성되는 $t-\phi$ 곡선의 개형을 갖는다(그림 8). 이 시료에서 나타나는 $t-\phi$ 곡선의 개형의 특징은 모든 자기마당 세기에서 동근 정점이 나타나는 것이다. 따라서 $h_0 \leq h < 0.5$ 이면 높이가 $2h$ 인 양정점을 얻을 수 있고 $0.5 < h$ 이면 높이가 1인 양정점을 얻을 수 있다. 한편 네번째 시료의 경우, 자기화가 역전되는 자기마당 방향이 $3\pi/4$ 부터 $\pi/2 + \sin^{-1}(h/h_0)$ 의 값을 갖지 않는다. 다섯번째, $0.5 \leq h_0$ 인 시료는 A, C, E, H의 4가지 유형들로 구성되는 $t-\phi$ 곡선의 개형

을 갖는 이 경우는 Stoner-Wohlfarth의 결맞음회전 이론에 의한 결과와 완전히 일치한다. 이 시료에서 나타나는 $t-\phi$ 곡선의 개형의 특징은 높이가 $2h$ 또는 1인 동근 정점이 모든 자기마당 세기에서 나타나며 자기화가 역전되는 자기마당 방향이 항상 $3\pi/4$ 보다 작다(그림 9). 한편, 주어진 h 에 대해서도 시료의 h_0 값에 따라 $t-\phi$ 곡선의 형태가 달라진다. 예를로서, $h = 0.4, 0.6, 0.75$ 인 경우들에 대해 얻을 수 있는 대표적인 $t-\phi$ 곡선들을 그림 10, 11와 12에 도식하였다. 이 그림들의 비교로부터, h 가 높아짐에 따라 $t-\phi$ 곡선에서 h_0 에 대한 정보량이 줄어들며 비등방성에 관한 정보만이 두드러지게 나타남을 알 수 있다.

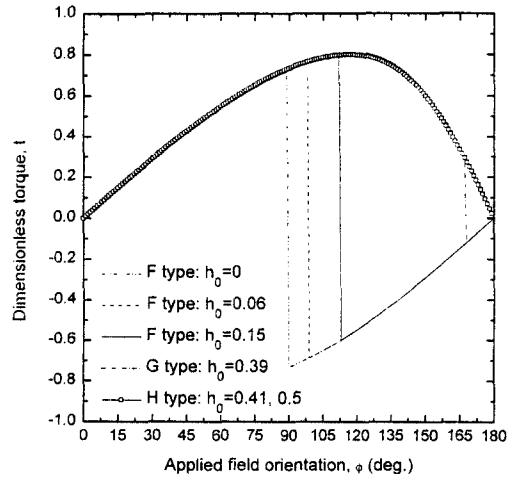


Fig. 10. $h = 0.4$ 일 때, 시료의 h_0 값에 따른 $t-\phi$ 곡선 형태들.

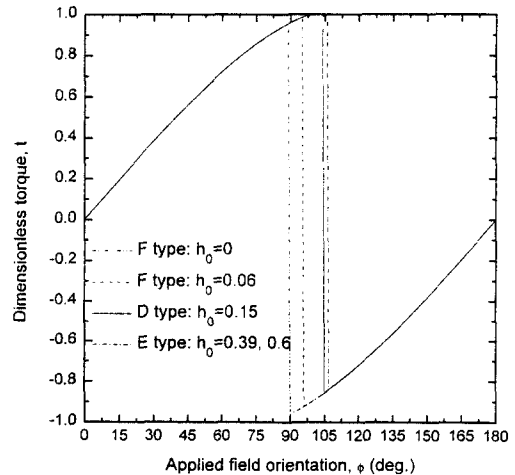


Fig. 11. $h = 0.6$ 일 때, 시료의 h_0 값에 따른 $t-\phi$ 곡선 형태들.

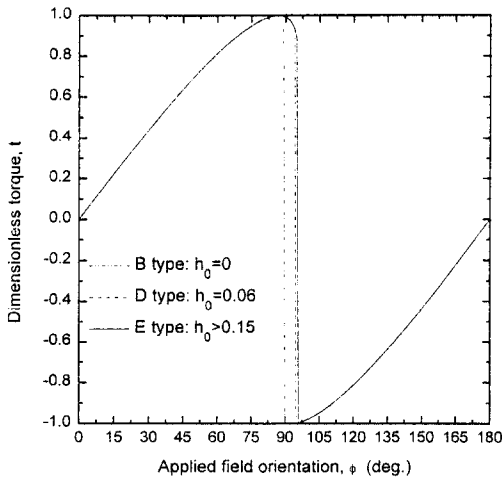


Fig. 12. $h=0.75$ 일 때, 시료의 h_0 값에 따른 $t-\phi$ 곡선 형태들.

4. 둥근 정점의 좌표를 측정에 활용하기 위한 조건

실험 $\tau-\phi$ 곡선에서 얻어지는 정점의 높이를 활용하는 해석법들로 비등방성 에너지상수나 포화 자기화량을 측정하기 위해서 둥근 정점들의 존재 조건들이 매우 중요하다. 한 예로서, Weilinga는 그가 제안한 $\tau-\phi$ 곡선 해석법의 적용한계에 대해 언급하지 않았지만, 그의 논문에서 상당히 높은 자기마당세기에서 측정된 $\tau-\phi$ 곡선으로부터 얻어진 결과도 해석에서 제외하였는데, 그 이유를 자벽이동에 의한 자기화에 기인한다고 언급하였다 [5]. 여기서, 높이가 1인 양정점을 얻기 위한 조건은 $h > h_2$ 이고 높이가 -1인 음정점을 얻기 위한 조건이 $h > h_3$ 을 상기하면, 높이가 1인 양정점을 활용하는 방법과 높이가 -1인 음정점을 활용하는 방법은 각각 인가 자기마당 세기가 비등방성 자기마당 세기의 약 71% 및 77% 이상일 때만 적용 가능함을 알 수 있다. 한편, 시료의 h_0 가 낮을 수록 높이가 -1인 음정점을 낮은 자기마당 세기에서 얻을 수 있고, 시료의 h_0 가 높을 수록 높이가 1인 정점을 낮은 자기마당 세기에서 얻을 수 있다. 예를로서, $h_0=0$ 인 이상적인 연자성체의 경우 $h > 0.71$ 이면 높이가 -1인 정점을 얻을 수 있고, $h_0 > 0.35$ 인 경자성체의 경우 $h > 0.5$ 이면 높이가 1인 정점을 얻을 수 있다.

IV. 결 론

자기마당의 세기를 고정하고 그 방향을 변화시키며 자기화시킬 때 얻어지는 돌림힘 곡선에서, 둥근 정점이 존

재하기 위한 조건을 구하여 돌림힘 곡선의 개형을 체계적으로 연구하였다. 높이가 $2h$ 인 정점을 얻기 위한 조건은 $h < h_1$ 이고, 높이가 1인 양정점을 얻기 위한 조건은 $h > h_2$ 이고, 높이가 -1인 음정점을 얻기 위한 조건이 $h > h_3$ 이었다. 단순 일축비등방성 자성체의 돌림힘 곡선의 개형은 총 8개의 유형들로 구성되는데, h_0 의 값에 따라 단순 일축 비등방성 자성체를 5 유형으로 분류 가능하였다. 한편, 돌림힘 곡선의 정점들을 활용하는 해석법들의 적용 범위는 $h > 0.77$ 이다. 본 연구를 통해 얻은 $\tau-\phi$ 곡선의 개형에 대한 깊은 이해는 새로운 해석법들을 개발하는데 큰 기여를 할 것이라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술원 재료계면연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- [1] *Magnetic Materials: Microstructure and Properties*, edited by T. Suzuki, Y. Sugita, B. Clemens, K. Ouchi, and D. E. Laughlin, MRS symposium proceeding, Vol. 232. (1991).
- [2] *Magnetic Multilayer*, edited by L. H. Bennet and R. E. Watson, World Scientific Publishing Co. Ltd. Singapore, (1994).
- [3] C. D. Mee and E. D. Daniel, *Magnetic Recording* McGraw-Hill, New York, (1987), Vol. 1.
- [4] H. J. Williams, *Phys. Rev.* **71**, 646 (1947).
- [5] T. Weilinga, *J. Appl. Phys.* **50**, 4888 (1979).
- [6] G. Pastor and M. Torres, *J. Appl. Phys.* **58**, 920 (1985).
- [7] S. -C. Shin and C. -S. Kim, *IEEE Trans. on Magn.* **27**, 4852 (1991).
- [8] E. C. Stoner and E. P. Wohlfarth, *Philos. Trans. R. Soc. London Sect. A* **240**, 599 (1948).
- [9] R. A. McCurrie and S. Jackson, *IEEE Trnas. on Magn.* **16**, 1310 (1980).
- [10] 허진, 신성철, 응용물리, **10**, 463 (1997).

Torque Curve Shapes of Simple Uniaxial Magnetic Materials

Jeen Hur and Sung-Chul Shin

Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology,

Taejon 305-701

(Received 26 January 1998, in final form 20 February 1998)

We have theoretically investigated torque curve shapes of simple uniaxial magnetic materials by considering conditions for round peaks to exist. These conditions are functions of an applied field, anisotropy field, and lowest critical field h_0 for a domain wall to move or nucleate. The peak having a height of $2h$ appears when h is lower than h_1 , the peak having a height of 1 appears when h is higher than h_2 , and two peaks having heights of 1 and -1 appear when h is higher than h_3 . It was found that torque curves of simple uniaxial magnetic materials could be classified into 8 distinct types depending on the existence of hysteresis, the number of the round peaks, and the reversal mechanisms. Simple uniaxial magnetic materials also found to be classified into the 5 groups depending on h_0 .