

일축 비등방성 자성체의 돌림힘 곡선에서 등근 정점들의 존재 조건들

한국과학기술원 물리학과 허진*, 신성철

Conditions for round peaks to exist in torque curves of magnetic uniaxial materials

KAIST Jeon Hur*, Sung-Chul Shin

1. 서론

돌림힘 곡선에서 등근 정점이 존재할 조건들은 비등방성 자기마당 세기에 비해 상대적으로 낮은 세기의 자기마당에서 돌림힘 곡선 개형에 대한 체계적 연구에 필수적일 뿐만 아니라, 기존의 등근 정점 좌표들을 활용하는 돌림힘 곡선 해석법들[1-3]의 명확한 적용 범위를 아는 데 필요하다. 본 논문에서는 일축 비등방성 자성체의 자기화 역전기구가 결맞음회전에서 자벽이동으로 또는 그 반대로 전환됨을 요지로 하는 자기화 역전기구 전환 이론[4]을 근거로 하여, 일축 비등방성 자성체의 돌림힘 곡선에서 미분 가능한 등근 정점의 존재 조건들을 보고한다.

2. 본론

일축 비등방성 에너지가 $K \sin^2 \theta$ 로 표현되는 시료를 자기마당 세기 H 를 고정하고 방향 ϕ 를 변화시키며 자화시킬 때, 시료가 받는 돌림힘 τ 를 고려한다. 본 논문에서는 선행된 자기화 역전기구 전환 이론에서와 같은 좌표계와 기호 체계를 따른다. 일반적으로, 일축 비등방성 시료가 받는 무차원 돌림힘은 그림 1에서와 같이, h 가 충분히 낮으면 $2h \sin \phi$ 로 표현되고, h 가 충분히 높으면 $\sin 2\phi$ 로 표현된다. 이때, $0 < \phi < \pi$ 에서 높이가 ± 1 인 정점들 A, B가 나타나는 자기마당 방향들을 $\phi_{hp\pm}$, 높이가 $2h$ 인 정점 C가 나타나는 자기마당 방향을 $\phi_{ip\pm}$ 라 정하였다. 정점이 나타나는 자기마당 방향은 인가한 자기마당 세기에 의존하는데, 이 의존성을 그림 2에 도식하였다. 그런데, 중간 자기마당 세기에서는 이력현상 때문에 등근 (미분 가능한) 정점들이 나타나지 않을 수도 있다. 여기서, 미분 가능한 정점이 존재하기 위해서는 정점(들)이 나타나는 자기마당 방향(들)이 역전 자기마당 방향보다 작아야 한다. 즉, $\phi_{ip+} < \phi_c$, $\phi_{hp+} < \phi_c$, 및 $\phi_{hp-} < \phi_c$ 를 만족해야 한다. 이 조건들은 각각 $h < h_1$, $h > h_2$, 및 $h > h_3$ 와 동등하다. 따라서, $h_1 < h < h_2$ 이면 등근 정점은 나타나지 않는다. h_1 , h_2 , h_3 의 수학적 표현은 다음 식들로 표현된다[5].

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

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

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

여기서, $h_0 > \frac{\sqrt{2}}{4}$ 일 때 $h \geq \frac{1}{2}$ 이면, 결맞음회전에 의해 자기화가 역전되므로 $h_1 = h_2 = \frac{1}{2}$ 로 정하였다. 자벽이 생성되거나 이동하기 위해 필요한 최저 무차원 자기마당 h_0 에 따른 h_1 , h_2 , h_3 를 그림 3에 도식하였다. $h_0 =$

0이면 $h_1 = 0$, $h_2 = h_3 = 0.71$ 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, $0.71 \approx \frac{1}{\sqrt{2}}$, $0.35 \approx \frac{\sqrt{2}}{4}$, $0.06 \approx \left(\frac{1-\sqrt{2\sqrt{3}-3}}{2}\right)^{\frac{2}{3}}$ 및 $0.77 \approx \sqrt{\frac{-4+3\sqrt{3}}{2}}$ 임을 이용하였다. 그림 4는 h 에 따라 등근 정점의 유무를 보이는 돌림힘 곡선들의 예를 도식한 것이다.

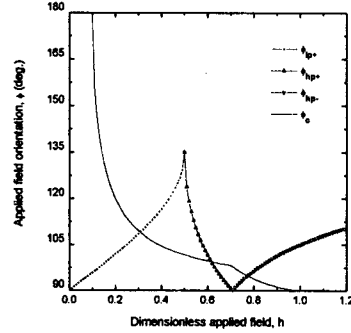
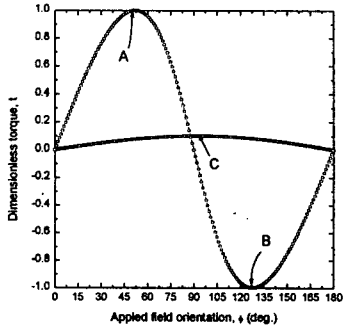


그림 1. 충분히 높거나 낮은 자기마당 세기에서 얻어지는 그림 2. 정점들이 나타나는 자기마당 방향들과 자기화각 역전되는 자기마당 방향. 여기서, $h_0 = 0.1$.

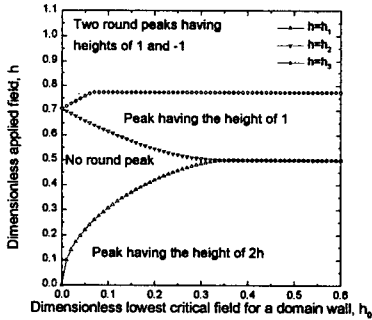


그림 3. h_1 , h_2 및 h_3 의 h_0 에 대한 의존성.

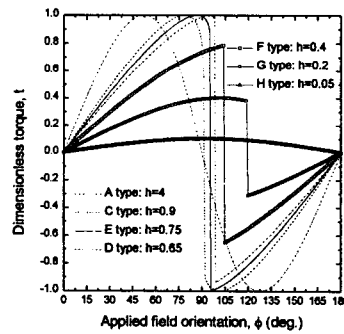


그림 4. 등근 정점의 유무를 보이는 돌림힘 곡선들의 예. 여기서, $h_0 = 0.1$.

3. 결론

요약하면 $h < h_1$ 이면 높이가 $2h$ 인 정점만 ϕ_{1p} 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. 따라서, 기존에 등근 정점의 높이를 활용하는 방법들[1-3]은 정확한 측정을 위해 비등방성 자기마당 세기의 77% 이상의 높은 인가 자기마당 세기가 필요하다.

4. 참고문헌

[1] T. Wielinga, J. Appl. Phys. **50**, 4888 (1979).
 [2] G. Pastor and M. Torres, J. Appl. Phys. **58**, 920 (1985).
 [3] S.-C. Shin and C.-S. Kim, IEEE Trans. on Magn. **27**, 4852 (1991).
 [4] 허진, 신성철, 응용물리, **10** (5), 463 (1997).
 [5] 허진, 신성철, 자기학회, **8** (1), 34 (1998).