

## 일축 비등방성 자성체의 회전 이력에너지 연구

한국과학기술원 물리학과 허진\*, 신성철

### Theoretical Study on Rotational Hysteresis Energy in Uniaxial Materials

KAIST Jeon Hur\*, Sung-Chul Shin

#### 1. 서론

자기마당의 세기를 고정하고 그 방향을 변화시키는 자기화 과정에서도 회전 이력현상을 보이는데, 회전 이력 현상은 모터, 자기클러치와 같은 회전하는 자기마당안의 강자성체에서 매우 중요하다. 결맞음회전 이론에 따르면 비등방성 자기마당세기의 50%보다 높은 세기의 자기마당을 인가했을 때만 자기화가 역전되어 회전 이력현상이 나타난다. 그러나, 실제 시료에서는 매우 낮은 자기마당세기에서도 자기화가 역전되어 회전 이력현상이 나타나고, 회전 이력에너지의 자기마당세기에 대한 의존성도 결맞음회전 이론과는 일치하지 않는 경우가 매우 많다. 본 논문에서는 자기화 역전을 기술하는 결맞음회전 및 자벽이동 이론들을 통합한 새 이론을 기반으로 회전 이력에너지의 자기마당세기에 대한 의존성을 이론적으로 연구하였다.

#### 2. 본론

그림 1에서와 같은 좌표계에서  $K \sin^2 \theta$ 로 표현되는 일축 비등방성 에너지를 갖는 시료를, 무차원 자기마당세기  $h$ 로 고정하고 그 방향을 반시계 방향으로 회전시킨 후 시계 방향으로 회전시키며, 자기화하는 과정을 고려하였다. 여기서  $h$ 는 자기마당세기를 비등방성 자기마당세기로 나눈 값이다. 그림 2는 통합이론에 의해 예측되는 자기화 역전 자기마당방향  $\phi_c$ 를 보여주고 있다. 그림 3은 무차원 보자력  $h_0$ 와 자기마당세기  $h$ 에 따른 자기화 역전메카니즘을 설명하기 위한 그림이다. 그림 3에서 일축 비등방성 단자구(single domain) 자성체는  $h < h_0$ 인 A영역에서는 역전되지 않아 이력 현상이 없고,  $h_0 \leq h \leq h_x$ 인 B영역에서는 자벽이동에 의해 역전된다. 한편, 높은 세기의 C 영역에서는  $h_x \leq h$ 이면 결맞음회전에 의해 역전되어 이력 현상이 나타나고,  $h > 1$ 이면 이력 현상이 사라지게 된다.

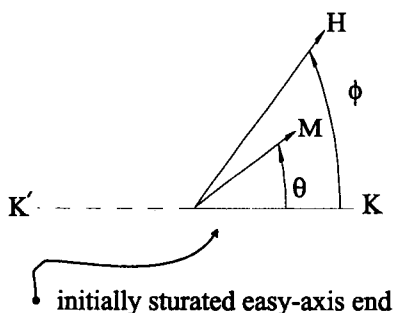


그림 1. 본연구에서 쓰인 좌표계.

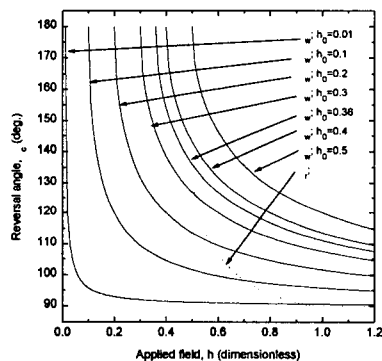


그림 2.  $\phi_c$ 의 좌위는  $h \leq h_x$ 이면 실선을,  $h \geq h_x$ 이면 점선을 따른다.

이제  $t = \sin 2\theta$ 로 정의된 무차원 돌림힘을 도입하여  $h_0 = 0.1$ 인 시료의  $t-\phi$  이론이력곡선들을 그림 4에 나타내었다. 특이할 만한 점은 자기화가 역전되는 방향이 결맞음회전 이론에 의해 예측되는 최대값보다 클 수도 있는 것이다. 특히,  $h = 0.1$ 일 때  $\phi = 180^\circ$ 에서 자기화가 역전되는데, 이 경우 반시계 방향으로  $t-\phi$ 곡선을 측정

했을 때에는 돌림힘이 음의 값을 갖지 않으며, 시계방향으로 측정했을 때에는 돌림힘이 양의 값을 갖지 않는다. 한편,  $w_r = \int_0^{2\pi+\delta} t(\phi, H) d\phi + \int_{2\pi+\delta}^0 t(\phi, H) d\phi$ 로 정의된 회전 이력에너지가 그림 5에 나타냈다. 여기서  $\delta$ 는 임의의 작은 양수이다. 결맞음회전 이론에 의하면 회전 이력에너지 의존성은  $h < 0.5$ 이면 0이고,  $h = 0.5$ 일 때 최대값을 갖는다. (원형 기호로 표시된 곡선) 반면, 통합이론에 따르면 회전 이력에너지는  $h = h_0$ 일 때 최대값  $8h_0$ 을 갖으며,  $h$ 가 증가함에 따라 감소하다가  $h \geq h_x$ 이면 비가역 결맞음회전 이론에 의한 것과 일치한다(실선으로 표시된 곡선들). 그림 6에 수직자성을 지나는 TbFeCo 다층박막의 회전 이력에너지를 무차원 자기마당의 함수로 측정하여 도식하였다. 측정에 사용된 시료의  $h_0$ 는 약 0.09이었는데 최대 회전 이력에너지의 값이 약 0.7로 자기마당세기에 대한 의존성이 통합이론에 의한 계산과 매우 잘 일치함을 그림 6에서 확인할 수 있다.

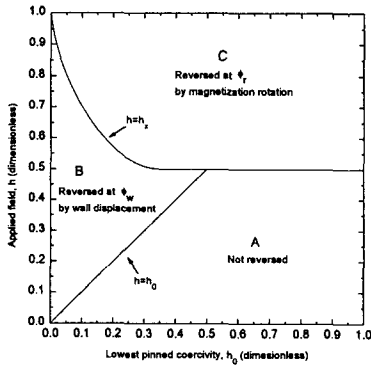


그림 3.  $h_0$ 와  $h$ 에 따른 자기화 역전메카니즘을 설명하기 위한 그림. 그림 4.  $h_0$ 가 0.1인 시료의 이론적인  $t-\phi$  이력곡선들.

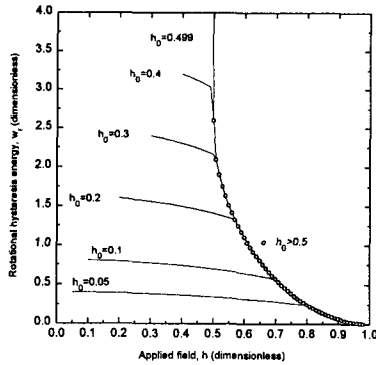
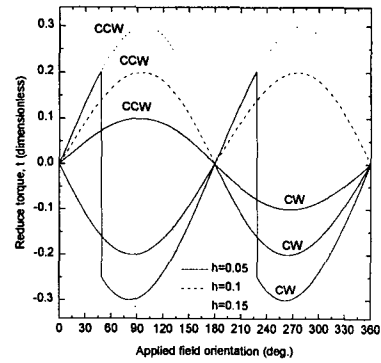
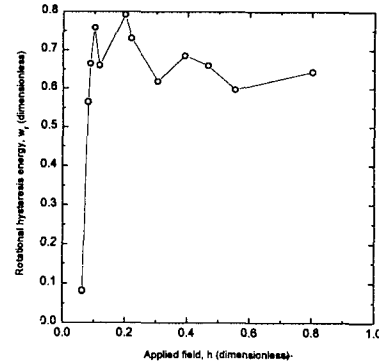


그림 5. 다른  $h_0$  값을 갖는 시료들의 이론적인 회전 이력 에너지의 의존성들. 그림 6. 수직자성을 지나는 TbFeCo 박막에서 자기마당세기에 대한 회전 이력에너지의 의존성.



### 3. 결론

통합된 자기화 역전 이론을 근거로 하여, 자기마당의 세기를 고정하고 그 방향을 변화시키는 자기화 과정에서 회전 이력현상 및 자기화 역전을 연구 하였다. 회전 이력에너지는  $h = h_0$ 일 때 최대값  $8h_0$ 을 갖으며 점차 감소하여  $h \geq h_x$ 이면 결맞음회전 이론의 결과와 일치한다. 통합된 자기화 역전 이론은 수직자성을 지나는 TbFeCo 박막에서 매우 낮은 자기마당( $h < \frac{1}{2}$ )에서 일어나는 자기화 역전뿐만 아니라, 회전 이력에너지의 자기마당세기에 대한 의존성도 잘 설명할 수 있었다.