C5

임의의 구조에서 정자기 에너지의 수치적 계산

한국과학기술원 최석봉*, 신성철

Numerical calculation of magnetostatic energy for arbitrary shape

KAIST S. -B. Choe*, S. -C. Shin

1. 서론

정자기(magnetostatic) 에너지는 자성체의 자기 에너지 및 자화 상태의 고려에 있어서 필수적인 요소이다. 정자기 에너지는 자기 쌍극자의 상호교환작용에 의해 발생하며, 자기 쌍극자의 먼거리 상호작용의 성질 때문에 매우 복잡한 수식으로 유도되어, 자기 에너지의 근본적인 에너지의 하나임에도 불구하고 최근까지도 계속 연구가 진행되고 있다. 특히, 최근 활발하게 연구되고 있는 자성박막[1]에서의 정자기 에너지는 자성박막의 구조적인 특이성 때문에 덩어리(Bulk)상태에서의 정자기 에너지와 많이 다른 값으로 알려져 있다. 자성 박막에서의 정자기 에너지는 박막의 구조 및 상태에 의해 크게 변화하므로 정량적인 연구방법의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 임의의 자성체 구조에서의 정자기 에너지를 수치적으로 계산할 수 있는 새로운 계산 방법을 개발하였다. 이러한 수치계산 방법으로 거친 표면을 갖는 자성박막에서의 자기지움 에너지를 계산하여, 표면 거칠기에 따라 급속히 감소하는 자기지움 에너지를 정량적으로 연구하였다.

2. 정자기 에너지의 수치적 계산방법

오른쪽의 순서도에서 보는 바와 같이, 자성체의 구조 즉, surface equation $z(x,y)$가 식(1)과 같이 주어져 있을 경우에 표면에서의 surface normal vector $\hat{n}$을 식(2)와 같이 계산할 수 있고 따라서 정해진 자화상태 $\vec{M}$에 대한 surface magnetism σ_M을 식(3)을 이용하여 얻을 수 있다. 이와 같이 구해진 σ_M을 이용하여, magnetic scalar potential ϕ_M을 식(4)를 통하여 계산할 수 있고, 따라서 식(5)를 이용하여 정자기 에너지 γ_M을 구할 수 있다.

$$\boxed{z = z(x,y)} \quad (1)$$

$$\downarrow$$

$$\boxed{\hat{n}(x,y) = -\hat{x}\frac{\partial}{\partial x}z(x,y) - \hat{y}\frac{\partial}{\partial y}z(x,y) + \hat{z}} \quad (2)$$

$$\downarrow$$

$$\boxed{\sigma_M(x,y) = \hat{n}(x,y)\cdot\vec{M}(x,y)} \quad (3)$$

$$\downarrow$$

$$\boxed{\phi_M(r) = \int_{S'}\frac{\sigma_M(x,y)}{|r-r'|}ds} \quad (4)$$

$$\downarrow$$

$$\boxed{\gamma_M = \frac{1}{2}\frac{\int_v \phi_M(r)\sigma_M(r)dv}{\int_v dv}} \quad (5)$$

이와 같은 계산 과정은 전자기학에서 일반적으로 사용되는 계산의 방법으로서 일괄적이고 순차적인 방법으로 최종값을 얻을 수 있다. 그러나, 식(4)와 식(5)에 있는 적분식의 해가 반드시 존재하는 것이 아니므로, 특수한 몇 가지의 자성체 구조 즉, ellipse나 flat surface 등의 경우에만 그 수식적 해가 계산되었다[2].

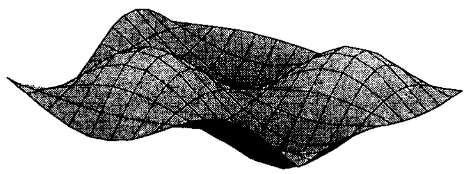
본 연구에서는 수치적 적분을 이용하여 임의의 자성체 구조에 대한 정자기 에너지를 계산할 수 있는 방법을 개발하였다. 수치적 적분에 있어서 식(4)에 존재하는 $1/r$ 형태의 singularity의 적분값의 계산이 가장 어려운 문제인데, 이를 부분구적법의 cell 크기를 singularity 주변에서 exponential 형태로 감소시켜 더해주는 방법으로 해결하였다[3]. 이러한 수치적 적분의 검증을 위해 수식으로 해가 존재하는 ellipse나 flat surface에 대한 정자기 에너지를 계산하여, 수식 이론값과 99.7 %이상의 정확도로 계산됨을 확인하였다.

3. 거친 표면을 갖는 박막에서의 자기지움 에너지

박막의 거친 표면을 그림 1 과 같이 sinusoidal 형태로 모형화하였다. 이러한 표면이 위아래로 coherent 하게 존재하는 경우의 박막(Type I)과 anti-coherent 하게 존재하는 경우의 박막(Type II)에 대하여 정자기 에너지를 계산하였다. 그림 2 는 Type I 박막에서 수직으로 포화된 자화상태에서의 정자기 에너지 γ_z와 수평으로 포화된 자화상태에서의 정자기 에너지 γ_x, 그리고 그 둘의 차이로 주어지는 자기지움 에너지 $N_d(=\gamma_z - \gamma_x)$를 k(=표면거칠기의 진폭 A/표면거칠기의 주기 d)의 함수로 계산한 그래프이다. 수직 자화의 경우에는 표면의 거칠기가 증가하면 표면의 표면자화량값이 감소하게 되므로, 정자기 에너지는 감소한다. 반면에 수평자화의 경우에는 표면의 거칠기가 증가함에 따라 표면의 표면자화량 값이 증가하게 되므로, 정자기 에너지는 증가하게 된다. 따라서, 표면의 거칠기가 증가함에 따라 자기지움 에너지가 감소한다는 사실은 쉽게 예측할 수 있고, 그림 2 와 같이 정량적인 값으로 구해진다.

그림 3 은 여러 가지 α(=표면거칠기의 진폭 A /박막의 두께 D)값에 대한 N_d의 함수를 k에 대해 그림 그래프이다. α 값이 작은 경우에는 N_d의 감소가 느리고 최종적으로 수렴되는 값 또한 큰 값으로 나타난다. 반면에, α 값이 큰 경우에서 N_d의 감소가 빠르며 최종적으로 수렴되는 값 또한 작은 값으로 나타난다. 그러나, α 값의 크기와는 상관없이 N_d의 감소는 $0.1 < k < 10$ 의 범위에서 일어난다. α=10, k >0.5 의 경우에는 자기지움 에너지가 음수로 나타나는데, 이는 수직자성을 선호하는 형상이방성이 존재함을 의미한다.

Type II 박막에서의 자기지움 에너지는 그림 4 에서 보는 바와 같이 Type I 의 자기지움 에너지보다 조금 크지만 거의 비슷한 값으로 나타난다. 즉, 박막의 위 표면과 아래 표면의 coherency 는 정자기 에너지에 큰 영향을 미치지 않는다.



$z = A\sin(2\pi x/d)\sin(2\pi y/d)$

그림 1. 거친표면의 모

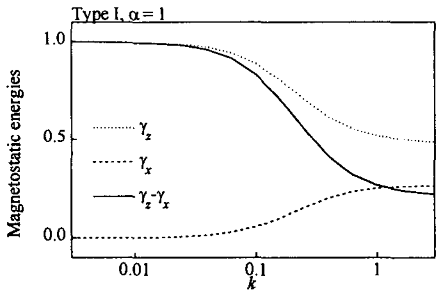


그림 2. k 값에 따른 정자기 에너지

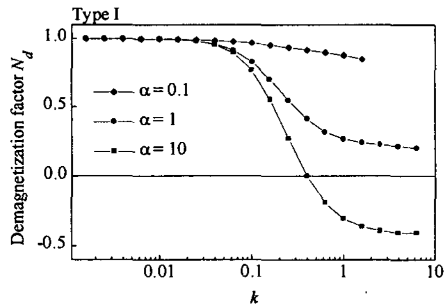


그림 3. k 값에 따른 자기지움 에너지

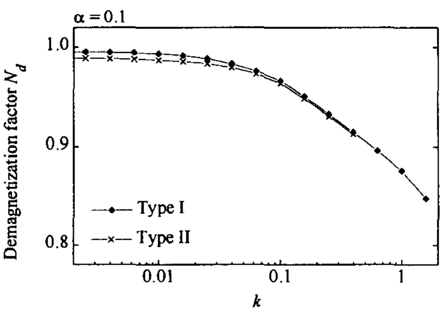


그림 4. Type I 과 Type II 의 자기지움 에너지 비교

4. 결론

본 연구에서는 수치적 적분을 이용하여 임의의 자성체 구조에 대한 정자기 에너지를 계산할 수 있는 방법을 개발하였다. 이러한 계산 방법을 이용하여 거친 표면을 갖는 자성박막에서의 자기지움 에너지를 계산하여, 표면 거칠기가 증가함에 따라 자기지움 에너지가 감소하는 사실을 정량적으로 분석하였다.

5. 참고문헌

[1] S.-B. Choe and S.-C. Shin, J. Appl. Phys., **81(8)**, 5743(1997).
[2] B. D. Cullity, Introduction to Magnetic Materials, (Addison-Wesley publishing company, Massachusetts, 1972),Chap. 2.
[3] W. H. Press *et al.*, Numerical Recipe in C 2nd ed., (Cambridge university press, Cambridge, 1992), Chap 4.