

## 미소자기학을 이용한 강자성 나노튜브의 자기적 특성 예측

이제현<sup>1\*</sup>, Dieter Suess<sup>2</sup>, Thomas Schrefl<sup>3</sup>, 오규환<sup>1\*</sup>, Josef Fidler<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>서울대학교 재료공학부, 서울시 관악구 신림9동 산 56-1번지

<sup>2</sup>Institute of Solid State Physics, Vienna University of Technology, Wiedner Hauptstraße 8-10, 1140 Vienna, Austria

<sup>3</sup>Department of Engineering Materials, University of Sheffield, Western Bank, Sheffield, United Kingdom.

### 1. 서론

지름이 수 나노미터에서 수백 나노미터에 이르는 강자성 나노구조는 자성을 이용한 생체소자의 자기장 센서, 약품수송, 촉매 등의 넓은 생체재료 분야의 응용가능성, 그리고 MEMS, NEMS 소자 내에서의 자기장 생성물질로 과학적, 공학적 측면에서 많은 주목을 받고 있다[1]. MRAM에서 사용될 수 있는 얇은 반지형태의 소자에서부터 화학적 방법으로 제조한 수십 마이크로미터 크기의 나노튜브 다발에 이르기까지 많은 연구자들이 강자성 나노튜브에 관한 연구를 수행하고 그 결과를 보고하고 있으며[2], 해석해를 이용해 지름과 길이에 따른 평형상태를 예측하기도 하였다[3]. 하지만 MRAM 소자로서의 시스템을 제외하면 정자기적 에너지와 교환결합 에너지 등 자기적 에너지의 기여도를 알 수 있고 자구형성상태를 알 수 있는 미소자기학 계산은 보고된 바가 많지 않다. 본 연구에서는 미소자기학 전산모사 계산을 통하여 비교적 큰, 마이크로미터 크기의 자화거동과 평형상태를 예측하였다.

### 2. 실험방법

기존에 발표된 강자성 나노튜브는 AAO template 등을 이용한 화학적 제법을 통해 지름이 수십 나노미터, 지름이 수~수십 마이크로미터인 경우가 많다[2]. 본 연구에서는 MEMS 등에서 사용하기 위한 소자를 상정하여 FIB나 photolithography 등을 이용하여 안정적으로 제조할 수 있는 외경 500 nm, 내경 300 nm, 길이 1  $\mu\text{m}$ 의 비교적 큰 시편을 상정하고 Landau-Lifshitz-Gilbert 방정식을 이용한 유한요소 미소자기학(finite element micromagnetics) 시뮬레이션을 이용하여 이 시편의 자화거동을 예측하였다. 물질은 형상에 따른 효과를 가장 선명하게 볼 수 있도록 결정이방성을 가지고 있지 않은 permalloy로 설정하였으며 물성값은 다음과 같이 할당하였다 : saturation polarization  $J_s = 1.76 \text{ T}$  (1400 emu/cm<sup>3</sup>), exchange coefficient  $A = 8 \times 10^{-12} \text{ J/m}$ , mesh size (surface) = 5 nm, mesh size

(volume) = 15 nm. 이 때 주어진 mesh의 크기는 교환결합거리 =  $\sqrt{\frac{2\mu_0}{J_s^2}} = 2.55 \text{ nm}$ 의 약 두 배에서

여섯 배가 되는 값이다. 이와 같이 절점간 거리를 교환결합거리보다 크게 한 것은 시편의 크기가 충분히 크고 형태가 비교적 단순하여 절점간 거리를 정구크기보다 다소 크게 설정하여도 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 것이라 판단했기 때문이다. 실제 이를 검증하는 계산을 실시한 결과 이와 같은 메쉬 크기는 본 모델에서는 결과에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다(not shown).

강자성 나노튜브의 평형 자화상태와 자화거동을 알아보기 위해 초기자화값을 임의로 설정하고 100 ns 동안 외부자장에 노출시키지 않고 평형상태를 찾아가도록 하는 계산을 수행하였으며 이렇게 얻은 평형상태에  $\pm 0.4 \text{ T}$ 를 길이방향에 평행하게, 그리고 수직으로 인가하여 이 때의 자화양상을 관찰하였다. 또한 각 상태에서의 AMR (anisotropic magnetoresistance)를 계산하여 소자로서의 응용가능성을 타진하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

본 계산에서 사용한 시스템에서는, 튜브 형태의 시편에서 발생한다고 알려져있는 세 가지 상태[3], 즉 내경과 외경의 비에 따라 길이방향으로 자화되는 F1(Ferromagnetic 1) state, 면에 평행하게 자화되는 F2(Ferromagnetic 2) state, 옆면을 따라 평행하게 자화되는 V(Vortex) state 중에서 vortex state가 관찰되었다. 또 하나의 가능성인 F1 state와의 에너지 비교를 통해 F1 state 대신 vortex state를 만드는 이유를 알아보았다. 주어진 모델에서 V state는 F1 state에 비해 정자기적 에너지가 다소 감소하지만 교환결합 에너지가 크게 줄어 V state가 더욱 안정한 상태임을 알 수 있었다.

또한 시편에 자기장을 튜브의 길이방향에 평행하도록, 그리고 수직이 되도록 인가하며 자기이력곡선을 얻었다. 그 결과 두 경우가 보자력은 비슷하면서 튜브 길이방향에 수직으로 인가했을 때가 평행하게 인가했을 때에 비해 잔류자화가 적은 모습을 보여 실험결과와 잘 일치하였다[2].

자기이력곡선을 얻으며 전류를 튜브의 길이방향으로 인가하여 이 때의 이방성 자기저항(AMR : anisotropic magnetoresistance) 특성을 평가하였다. 이방성 자기저항은 전류방향과 자화방향 사이의 각도를  $\theta$ 라고 했을 때 저항  $R = R_0 + \Delta R \cos^2 \theta$ 로 주어지고  $R_0$ 와  $\Delta R$ 은 물질상수라는 점을 고려하여 본 연구에서는  $\cos^2 \theta$ 만을 계산하여 AMR 특성을 평가하였다. 자장을 튜브에 평행하게 인가할 때는  $M_z/M_s=0$  부분에서 최소값으로 0.04를 가지고 인가자장을 증가/감소시킴에 따라 증가하여  $M_z/M_s=\pm 1$  일 때 최대값으로 1을 가지며, 자장을 튜브에 수직으로 인가할 때는  $H_x = 0$  부분에서 최대값으로 0.55을 가지지만 인가자장을 증가/감소시킴에 따라 감소하여  $M_x/M_s=\pm 1$  부분에서 최소값으로 0을 보여주었다.

### 4. 결론

본 연구에서 다루어진 강자성 나노튜브는 평형상태에서 중앙부분에 자구벽을 하나 끼고 있는, 서로 다른 방향으로 회전하는 vortex state를 보여주었다. 길이방향으로 전류와 자기장을 인가하며 AMR을 예측하였을 때, 물질이 가질 수 있는 최대한의 특성을 보일 것으로 기대된다. 또한 자기장을 인가하는 방향에 따라 반대되는 AMR 특성을 보임으로써 다양한 형태의 응용이 가능하리라 생각된다.

### 5. 참고문헌

- [1] S. Khizroev. et. al., Appl. Phys. Lett. 81 (2002) 2256.
- [2] Y. Sui. et. al., Appl. Phys. Lett. 84 (2004) 1525
- [3] P. Landeros. et. al., Phys. Rev. B 71 (2005) 094435