

강자성 나노선에서 스핀 전달 토크에 의한 자벽에 대한 강자성 자기 공명의 변화

윤정범*, 유천열, 조영훈¹, 박승영¹, 정명화²

인하대학교 물리학과, ¹한국기초과학지원연구원 물성과학연구부, ²서강대학교 물리학과

1. 서론

최근 차세대 메모리로서 가능성을 보여주고 있는 자기 race-track 메모리에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 자기 race-track 메모리는 강자성 나노선에 각각 반대 방향의 자구를 만들어서 이동시킴으로 정보를 저장하고 판독할 수 있다. 각각 다른 방향의 자구가 강자성 나노선에 생성되기 위해 자구 사이에 자벽이 생기게 된다. 여기서 정보 전달을 위한 자구의 이동은 곧, 자벽의 이동을 의미한다. 강자성 나노선에서 자벽을 이동시키기 위해 불균일한 자기장이나 스핀 전달 토크(spin-transfer torque ; STT)를 이용하기 위한 전류, GHz 영역의 스핀 파동을 이용할 수 있다. 그 중에서 STT에 의한 자벽 이동에 관한 연구는 매우 활발히 진행되고 있다. 그러나 기존의 연구는 자벽 이동을 통해서 STT를 관측하고 분석했기 때문에 STT가 자벽에 미치는 본질적인 영향만을 분석하기에 어려움이 있다. 실제로 STT 현상에 의해서 자벽이 이동할 때, 나노선의 가장자리가 완벽하지 않거나 중간에 불순물이 있으면 자벽의 이동에 영향을 주는 요소들이 생긴다. 결과적으로 강자성 나노선에서 자벽 이동에 의한 STT의 연구는 본질적인 요소와 비본질적인 요소를 구분해서 분석하기가 매우 힘들다. 반면에 본 연구는 미세자기 동역학으로 고정된 자벽에 대한 STT의 효과를 강자성 자기 공명(ferromagnetic resonance ; FMR)으로 분석하였다. 강자성 나노선의 중앙에 작은 notch를 만들고 자벽을 고정시킨 후 전류를 인가할 경우 자벽의 이동은 없지만 STT의 효과에 의해 자벽의 FMR 신호가 변화함을 확인하였다.

2. 미세자기 동역학

중앙에 자벽이 있는 강자성 나노선에서 STT에 의한 FMR 신호의 변화를 연구하기 위해 미세자기 동역학을 기반으로 하는 object oriented micromagnetic framework (OOMMF)를 이용하여 시뮬내기를 하였다[1]. 기존 OOMMF의 계산식인 Landau-Lifshitz-Gilbert 방정식에 스핀-전류 항을 추가하여 STT에 대한 동역학을 계산한 식 (1)으로 시뮬내기를 하였다[2,3].

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma|\vec{M} \times \vec{H}_{eff} + \frac{\alpha}{M_s}(\vec{M} \times \frac{d\vec{M}}{dt}) + u \cdot \vec{M} \times (\vec{M} \times \frac{\partial \vec{M}}{\partial x}) + \beta \cdot u \cdot \vec{M} \times \frac{\partial \vec{M}}{\partial x} \quad (1)$$

위 식에 대해서 시뮬내기를 위한 NiFe(permalloy ; Py)의 기본적인 변수는 다음과 같다. 포화 자화(M_s)는 8.6×10^5 A/m이고 교환 뺏뺏함 상수는 13×10^{-12} J/m이며 Landau-Lifshitz 자기회전비율(γ)은 221000 m/(A·s)이다. 그리고 감쇠 계수(α)는 0.02으로 설정하였고 β 는 1보다 매우 작으며 α 와 비슷한 차수를 갖는다고 가정하였다. 속도(u)는 0부터 400 m/s까지 100 m/s 간격으로 계산하였다. 여기서 $u(= JPg\mu_B/2eM_s)$ 는 전류 밀도(J)와 비례하는 값이다. 시뮬내기 cell의 크기는 $5 \times 5 \times 5$ nm³이다. FMR 신호를 주파수에 대하여 분석하기 위해 0.01 nsec 간격으로 각각의 cell의 M_y 성분을 100 nsec 동안 저장하였다. 그리고 저장한 결과를 시간에 대하여 fast Fourier transform 하였다. 0에서 45 GHz까지의 마이크로파를 적용하여 자벽에 대한 FMR을 확인하기 위해 ‘sinc’ 함수인 $H_y = H_0 \sin(2\pi f_h(t - t_{f/2}))/2\pi f_h(t - t_{f/2})$ 형태의 자기장을 시료 전체에 인가하였다[4]. f_h 는 45 GHz, H_0 는 10 mT를 적용하였다. 시뮬내기를 위한 Py 나노선의 모형은 그림 1과 같다. Py 나노선의 길이, 폭,

두께는 각각 2 μm , 80 nm, 10 nm이다.

3. 계산 결과

u 가 0일 때, 즉 STT에 의한 효과가 없을 때, 자벽을 포함하고 있는 강자성 나노선에서 FMR에 의한 공명 주파수가 그림 2 (a)와 같이 7.13과 10.03 GHz에서 나타났다. 추가로 국소적인 분석을 통해서 자벽과 자구에 대한 FMR 공명주파수가 다른 것을 확인하였고 자벽의 FMR에 의한 공명 주파수는 자구보다 낮음을 확인하였다. 다음으로 자벽에 대한 STT의 효과를 연구하기 위해 u 값을 변화시키며 계산하였다. u 가 증가함에 따라 자벽의 공명 주파수는 점차 낮아지는 결과를 그림 2 (b)로 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구는 Py 나노선에서 중앙에 고정된 자벽의 STT에 의한 FMR 변화를 연구하였다. 자벽에 대한 FMR의 공명 주파수는 GHz 영역에서 발생하였으며 STT에 대하여 자벽의 이동 없이 FMR 신호가 변하는 것을 확인할 수 있었다. 결과적으로 자벽에 인가되는 전류 밀도가 커짐에 따라 FMR의 신호는 낮아지는 것을 확인하였다. 실제로 실험을 통해 자벽을 이루고 있는 스핀들의 STT에 의한 FMR 신호를 측정하면 자벽의 스핀 동역학에 대한 이해를 더욱 높일 수 있을 것이다.



그림 1. 중앙의 notch에 자벽이 고정된 Py 나노선에서의 스핀 구조를 나타내는 OOMMF 결과.

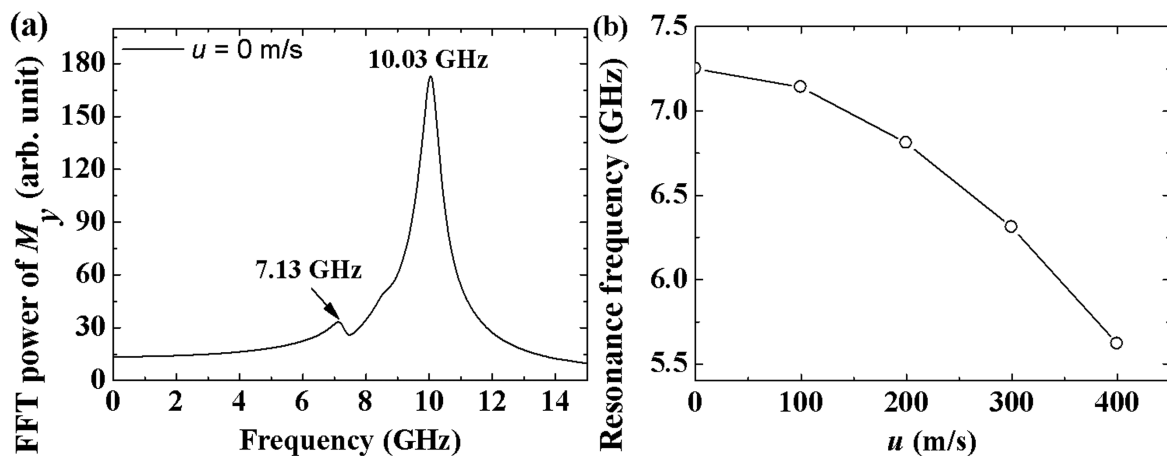


그림 2. (a) u 가 0일 때, Py 나노선의 FMR 신호. (b) 속도에 대한 자벽의 FMR 신호.

5. 참고문헌

- [1] <http://math.nist.gov/oommf>
- [2] <http://www.zurich.ibm.com/st/magnetism/spintevolve.html>
- [3] A. Thiaville, Y. Nakatani, J. Miltat and Y. Suzuki, Europhys. Lett., **69** (6), 990 (2005).
- [4] Sang-Koog Kim, Ki-Suk Lee, and Dong-Soo Han, Appl. Phys. Lett., **95**, 082507 (2009).