

## 미소자기학 전산모사를 이용한 준 연속박막에서의 소용돌이/반-소용돌이 쌍에 의한 자기 동역학 연구

(Vortex-antivortex assisted magnetization dynamics in a semi-continuous thin-film system studied by micromagnetic simulations)

이 기 석,\* 김 상 국

서울대학교 재료공학부 나노스핀트로닉스 연구실

### 1. 서 론

최근 학문적 관심뿐만 아니라 초고밀도 메모리 소자와 스핀트로닉스 소자의 응용 가능성 때문에 주목을 받기 시작한 자기 소용돌이(magnetic vortex)는 마이크로미터 크기의 패터닝 수십 나노미터 두께의 자성 박막에서 주로 발견되는 박막상태 구조로써 박막 면에 평행한 방향의 스핀들이 서로간의 쌍극자-쌍극자(dipole-dipole)에너지를 줄이기 위해 소용돌이와 같은 형상의 배열상태를 하고 있으며 약 10나노미터 정도 크기의 중심부에 존재하는 스핀들은 교환(exchange)에너지를 줄이기 위해 박막 면에 수직으로 향하고 있다. 이러한 자기 소용돌이는 마이크로 크기의 패터닝 자성 박막[1]뿐만 아니라 연속 박막에서도[2] 관측되고 있으며 최근에는 이것의 동역학적 거동에 대한 연구가 실험적[3]으로 이루어지고 있다. 하지만 지금까지의 연구는 주로 마이크로미터 크기의 패터닝 자성 박막에서 형성되는 자기 소용돌이의 정적인 구조에 대해 이루어져 왔으며, 반-소용돌이(antivortex)와 소용돌이 구조간의 상호작용에 대한 동적 연구는 미흡했다. 최근에 와서야 본 연구실이 소용돌이/반-소용돌이 간의 상호작용이 패터닝 자기 박막의 자화반전에 매우 중요한 동적 역할을 한다는 것을 미소자기학 전산모사를 통해 발견하였다[4]. 본 연구에서는 Fe 박막에서 측정된 스핀벡터의 공간 분포 이미지[2]를 이용하여 준 연속박막에서 소용돌이/반-소용돌이 간의 상호작용을 통한 자화반전 양상을 인가한 자기장의 세기와 감소계수에 따라 동역학적으로 살펴보았다[5].

### 2. 전산모사 방법

본 연구에서는 준 연속박막 모델에 서로 다른 자기장 ( $H=0, -10, -30$  Oe)을 인가하며 새로운 평형상태를 찾아가는 자화반전의 동역학적 거동을 조사하기 위해 OOMMF[6]를 이용하여 미소자기학 전산모사를 실시하였다. 이용한 모델은  $143 \mu\text{m} \times 89.5 \mu\text{m} \times 33 \text{nm}$  크기의 Fe 박막으로 다음과 같은 물리 상수를 사용하였다. 교환 상수는  $A=4.2 \times 10^{-11}$  (J/m), 포화 자화는  $M_s=1.7 \times 10^6$  (A/m), 감소 계수는  $a=0.5, 0.01$ , 자기 이방성 상수는  $K=0$  이며 셀의 크기는  $100 \text{nm} \times 100 \text{nm} \times 33 \text{nm}$  이다. 스핀 방향의 초기 공간 분포로써 33nm 두께의 Fe 박막에서 연 X-선 투과현미경을 이용하여 실험적으로 관측한 이미지(Fig. 1의 region I)[2]와 이를 확장한 영역(region II, III)을 사용하였으며 가장자리 영역(region III)의 스핀들은 시간에 대하여 고정하였다. 이러한 준 연속박막 모델은 자화 반전시 모델 경계의 형상에 의한 효과를 배제하거나 현저히 줄일 수 있어 제한된 크기의 모델에 대한 전산모사로부터 실제 연속 박막에 대한 전산모사와 흡사한 결과를 얻을 수 있게 한다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 감소 계수  $a=0.5$ ,  $H=0, -10$  Oe 인 경우의 시간에 따른 스핀방향의 분포변화를 나타낸 것이다.  $H=0$  Oe 의 경우, 스핀방향의 초기 공간분포에서 발견되는 작은 바늘형태의 자구와 물결모양의 스핀구조, 지그재그로 접힌 형상의 스핀구조(Fig. 2(a)의 스핀방향에 대한 유선(streamline)표현 참조)는 시간이 지남에 따라 그 주위에 존재하는  $180^\circ$  자구로 성장해가는 것을 확인할 수 있었다. 특히  $t=438 \text{ns}$  에 이르면 지그재그로 접힌 형상의 스핀구조는 서로 마주보고 있는 두 개의 크로스-타이자벽(cross-tie wall, 소용돌이/반-소용돌이가 규칙적으로 나열된 형태)과 두 자벽을 경계로 초기 지배적인 스핀방향과 반대방향을 가지는 자구의 형태로 발전되며 이후의 자화반전은 이 두 크로스-타이자벽의 이동을 통한 자구의 확장으로 이루어진다는 것을 발견하였다.  $H=-10$  Oe 인 경우에는 크로스-타이 자벽의 형성과 소멸을 통한 자화반전을 발견하였는데, Fig. 3(a)에서 확인할 수 있듯이 이러한 크로스-타이 자벽의 동적인 전개는 소용돌이/반-소용돌이 쌍의 생성, 진행, 소멸의 과정을 통하여 일어나고 있었다. 소용돌이/반-소용돌이 쌍의 생성, 진행, 소멸의 과정을 통한 자화반전은 감소 계수가 0.01인 Fig. 3(b)에서도 발견할 수 있다. 다만 이 경우에는 감소 계수가 0.5인 경우 발견되지 않던 스핀과동과 같은 미세한 구조를 관찰할 수 있었다.

### 4. 결 론

준 연속박막 모델에 있어서의 자화반전은 소용돌이/반-소용돌이 쌍의 생성과 진행, 소멸의 과정을

통하여 진행되고 있음을 확인하였다. 이것은 연속박막의 자화반전과정에서 소용돌이/반-소용돌이 쌍이 동역학적으로 중추적인 역할을 함을 입증한다.

## 5. 참고 문헌

- [1] A. Wachowiak, J. Wiebe, M. Bode, O. Pietzsch, M. Morgenstern, and R. Wiesendanger, *Science* **298**, 577 (2002).
- [2] S.-K. Kim, J. B. Kortright, and S.-C. Shin, *Appl. Phys. Lett.* **78**, 2742 (2001).
- [3] S.-B. Choe, Y. Acremann, A. Scholl, A. Bauer, A. Doran, J. Stöhr, and H. A. Padmore, *Science* **304**, 420 (2004).
- [4] K.-S. Lee, B.-W. Kang, Y.-S. Yu, and S.-K. Kim, *Appl. Phys. Lett.* **85**, 1568 (2004).
- [5] S.-K. Kim, K.-S. Lee, B.-W. Kang, K.-J. Lee, and J. B. Kortright, *Appl. Phys. Lett.* **86**, 052504 (2005).
- [6] <http://math/nist.gov/oommf>.

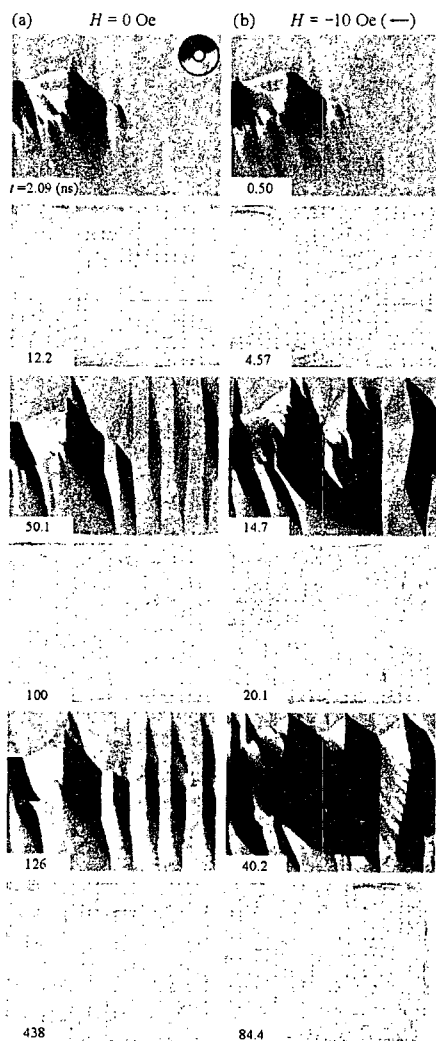


FIG. 2. Images of the temporal evolution of magnetic microstructures under  $H=0$  Oe in (a) and  $H=-10$  Oe in (b). Colors represent the in-plane orientations of local magnetization as indicated by a direction color wheel.

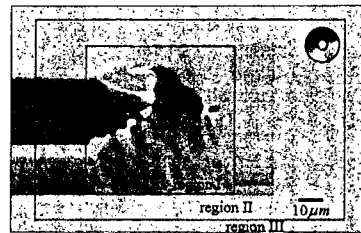


FIG. 1. An  $M$  configuration as a starting state for dynamic evolutions, displayed by colors representing the in-plane components of local  $M$ . The innermost region of a  $60 \times 60 \mu\text{m}^2$  field (region I) is experimental data observed at a frozen state of a demagnetized Fe film. The region II and III show possible orientations of local  $M$  in areas surrounding the  $60 \times 60 \mu\text{m}^2$  field. The local  $M$  in region I and II are allowed to be relaxed, while those in region III are kept to be fixed during the  $M$  dynamic evolutions in micromagnetic simulations.

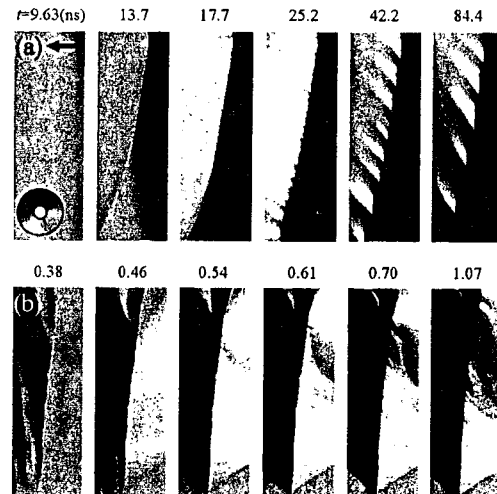


FIG. 3. The dynamic evolution of cross-tie walls at domain boundary in the semi-continuous Fe ultra-thin film system for two different damping parameters of  $a=0.5$  in (a) and  $a=0.01$  in (b) under a magnetic field  $H=-10$  Oe (the direction is indicated in (a)).