

## Vortex 유도 자화 반전 : 핵 생성과 전파 ( Vortex Driven Magnetization Reversal : Nucleation and Propagation )

강병우\*(서울대), 이경진(삼성 종합기술원), 김상국(서울대)

### I. 서론

직사각형(Rectangular)이나 원형(circular)의 점으로 패턴된 자성박막에서 스핀간의 장거리 상호작용인 쌍극자-쌍극자 결합(dipole-dipole coupling)에 기인하여 자성 vortex가 형성됨은 최근에 잘 알려져 있다. 뿐만 아니라, 자성박막에서 cross-tie wall은 근본적으로 자성 vortex의 규칙적인 배열로 이루어진 자벽(domain wall)이다. 하지만 자성 박막의 자화 반전(magnetization reversals)기구에서 magnetic vortex의 역할은 잘 알려져 있지 않다. 최근 STXM(Scanning Transmission X-ray Microscope)을 이용한 자구 벡터 이미지 관찰기법으로 33 nm 두께의 Fe 박막에서 180 자구의 경계 부분과 다른 180 자구로 성장하고 있는 자구의 작은 끝부분(Needle tip)에 vortex가 존재함을 관찰하였다. 이 결과로 인해 vortex의 핵 생성(nucleation)과 전파(propagation)가 자화 반전에 미치는 동적인 역할에 관심이 고조되고 있다. 그러므로 본 연구에선 미소자기구조(micromagnetic structure)를 시뮬레이션 할 수 있는 공개 소프트웨어인 OOMMF를 이용하여 Fe 박막에서 vortex가 형성 되는 과정과 전파 되어 지는 방법에 대하여 알아보고, 이것을 통해서 자화 반전 기구로서 vortex의 역할에 대하여 알아보았다. 또한, 이러한 시뮬레이션 실험 결과를 미소자기학 이론을 통해서 이론적으로 고찰 및 분석해 보고자 한다.

### II. 실험 방법

본 시뮬레이션 실험은 자화 반전이 vortex와 antivortex쌍의 상호 작용에 의해서 유도된다는 것을 알아보기 위해서, 공개 소프트웨어인 OOMMF를 이용해서 실험 했고, 또한 STXM을 이용한 자구 벡터 이미지 관찰법으로 33nm 두께의 Fe박막에서 관찰된 자료를 이용해서 시뮬레이션 실험을 했다. 우선 패턴화된 원형점을 이용해서 vortex와 antivortex 쌍이 생성되는 과정과 소멸되는 과정을 시뮬레이션 실험 했다. 이 실험에서는 시편의 두께와 크기를 변화 시켜 vortex와 antivortex쌍이 생성, 소멸되는 과정을 관찰하였다. 또한, 자구의 벡터 이미지 방법을 통해 관찰된 needle tip의 vortex와 antivortex 쌍을 시뮬레이션 초기조건으로 이용해서 vortex와 antivortex 쌍이 자화 반전에 어떠한 영향을 주는지에 대해서 자세히 관찰하였다. 특히 자구 벡터 이미지 방법에 의해서 얻어진 실험 데이터를 초기조건으로 취할 때에는 경계의 정자기력의 영향을 최소화해야 한다. 따라서 이 실험에서는 경계 정자기력을 최소화하기 위해서 시편의 경계 부분의 스핀과 동일한 방향을 가지고, 시간에 따라서 초기의 스핀 방향을 그대로 유지하는 스핀들을 배열해 주었다.

### III. 실험결과 및 고찰

패턴화된 원형점에서 지름의 크기(1200 nm)가 일정한 상태에서 두께(5nm ~ 100nm)만을 변화 시킬 때에는 평형 상태가 모두 vortex상태를 가졌다. 그러나 두께의 차이에 따라서 vortex 중심부근에서 평면에 수직방향 자화량의 크기는 약간씩 달라졌다. 또한 두께(5nm)가 일정한 상태에서 크기의 변화에 따라서 두 가지 평형상태가 되었다. 크기가 작은 경우(약 120nm 이하)는 single domain상태가 되었으며, 어느 정도의 크기 이상에서는 중심에 vortex를 갖는 상태가 평형 상태가 되었다. 이러한 vortex의 상태는 4가지로 구분할 수 있다. Vortex상태는 시편 중심의 스핀 방향이 면에 대하여 수직인 경우이며, 이러한 성질을 central polarization으로 나타낸다. 즉 central polarization이 +이면 스핀이 면에 대하여 위(↑)로 향하고, -이면, 스핀이 면에 대하여 아래(↓)로 향한다는 것을 의미한다. 또한, vortex상태는 시편 면 위의 스핀들이 소용돌이를 이루고 있으며, 이러한 성질을 vorticity라 한다. 이러한 배열의 스핀 회전 방향에 따라서 right-handed 와 left-handed 방향으로 구분되어 진다.

패턴화된 원형점에서 크기와 두께를 달리한 실험에서 평형 상태의 도달은 vortex와 antivortex쌍의 생성과 소멸에 의해서 발생한다는 것을 볼 수 있다. 또한 자구 벡터 이미지 방법에 의해서 측정된 실험 데이터를 초기 조건으로 한 경우도 마찬가지로, vortex와 antivortex쌍의 생성과 전파, 소멸에 의해서 자화반전이 일어남을 알 수 있다. 이때 vortex의 중심과 antivortex의 중심 부근의 스핀 방향이 서로 반평행인 경우가 서로 평행인 경우보다 쉽게 소멸되어짐을 볼 수 있다. 또한 쌍을 이루지 않고 생성된 vortex의 경우에는 상호 작용에 의해서 소멸되는 것이 아니라, 시편 외부로 빠져 나가서 소멸됨을 알 수 있다.

#### IV. 결론

패턴화된 원형점에서 자화 반전은 vortex와 antivortex 쌍의 생성과 소멸에 의해서 평형 상태를 찾아 가면서 이루어지며, 이러한 과정에서 소멸은 초기에 생성된 vortex와 antivortex 쌍 사이의 상호 작용에 의해서 이루어진다는 것을 알 수 있다. 이러한 상호 작용은 vortex와 antivortex사이의 상호 작용에 의해서 이루어 짐을 알 수 있다. 즉, vortex와 antivortex의 중심 부근 스핀의 방향에 따라 서로 반평행인 경우가 서로 평행인 경우보다 쉽게 소멸됨을 알 수 있으며, 쌍을 이루지 못한 vortex의 경우에는 시편의 외부로 나감으로써 소멸되어짐을 이번 시뮬레이션 실험을 통해서 알 수 있다. 또한, 확장된 박막의 경우에는 vortex와 antivortex쌍의 생성에 의한 전파에 의해서 자화 반전이 일어남을 실험에서 알 수 있다. 그러므로 이 실험에서는 vortex와 vortex사이의 상호 작용에 의해서 vortex가 소멸, 생성, 전파가 일어나는 것이 아니라 vortex와 antivortex 쌍의 상호 작용에 의해서 vortex의 소멸, 생성, 전파가 이루어지고, 쌍을 이루지 못한 vortex는 외부로 빠져 나감으로써 소멸되어짐을 알 수 있다.

#### V. 참고 문헌

- 1) S.-K. Kim, J.B. Forthright, S.C. Shin, Appl. Phys. Lett. **78**, 2742 (2001)
- 2) *OOMMF User's Guide, Version 1.0*  
M. J. Donahue and D. G. Porter  
Interagency Report NISTIR 6376,  
National Institute of Standards and Technology,  
Gaithersburg, MD (Sept 1999)
- 3) R.P. Cowburn, D.K. Koltsov, A.O. Adeyeye, and M.E. Welland, Phys. Rev. Lett. **83**,1042(1999)
- 4) A. Hubert and R. Schfer, *Magnetic Domains* (Springer, Berlin,1998).
- 5) R. Hollinger, A. Killinger, U. Krey, J. Magn. Mater. 21 February 2003, online available