

## 엑스선-광전자현미경을 이용한 자기소용돌이 동역학 연구 (Magnetic Vortex Dynamics Studied by X-PEEM)

서울대학교 물리학과 최석봉\*

### 1. 서론

자기소용돌이(magnetic vortex) 구조는 스핀트로닉스 소자 크기의 자성구조체에서 흔히 볼 수 있는 바닥상태의 하나이다. 자기소용돌이 구조에 대한 이론적 예측은 이미 오래전에 이루어졌음에도 불구하고, 최근에서야 첨단자성현미경에 의해 실험적으로 검증되었다. 그러나, 아직까지의 연구는 모두 정역학적인 구조의 관찰로만 이루어져 왔다. 본 연구에서는 자기소용돌이 구조의 동역학적 성질을 관찰하였다 [1].

### 2. 실험방법

자기소용돌이 구조의 동역학적 성질을 관찰하기 위해서 높은 공간분해능 및 시간분해능이 필요하다. 높은 공간분해능을 갖는 엑스선-광전자현미경(X-PEEM)을 시간분해능을 제공하는 펄초 레이저와 결합하여 그림 1과 같은 실험장비를 제작하였다. 실험은 미국 버클리국립연구소의 Advanced Light Source beamline 7.3.1에서 이루어졌다. 제작된 실험장비는 100 나노미터 이하의 공간분해능과 100 피코초 이하의 시간분해능을 제공하며, 30 마이크로미터 넓이의 자기구역 영상을 측정할 수 있다.

자기소용돌이 구조를 구현하기 위해, 이온빔식각(FIB)장비를 이용하여 20-나노미터 연자성 CoFe 합금박막에 다양한 구조를 만들었다. 평면상 flux closure 자기구역 구조의 중앙에 자기소용돌이 구조가 존재한다. 자기소용돌이의 위치는 Co의 L3와 L2의 엑스선-자기원형쌍색성(XMCD)효과를 이용하는 엑스선-광전자현미경의 높은 신호대 잡음비에 의해, 공간분해능의 한계보다 더 정밀하게 측정할 수 있었다.

### 3. 실험결과 및 고찰

관찰된 자기소용돌이 동역학은 1) 외부자기장에 의한 초기 가속과 2) 여기된 자기소용돌이 내부에서 발생하는 정자기장에 의한 자이로(gyro)운동의 두 가지 단계로 나눌 수 있다. 초기가속과 자이로운동의 방향은 자기소용돌이의 평면상 자화상태와 직접적인 상관관계가 없고, 3차원적인 손지기(chirality)에 의해 정해진다. 이때, 3차원적인 손지기는 평면상 자화상태와 자기소용돌이 중심의 수직자화상태에 의해 정해진다. 그림 2는 오른손과 왼손 손지기의 자기소용돌이 구조를 보여준다. 외부에서 인가된 자

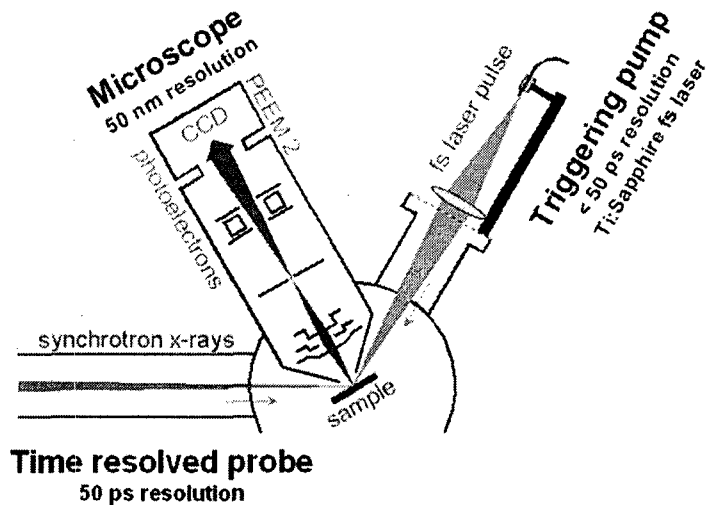


그림 1. 고초속 엑스선-광전자현미경 개략도

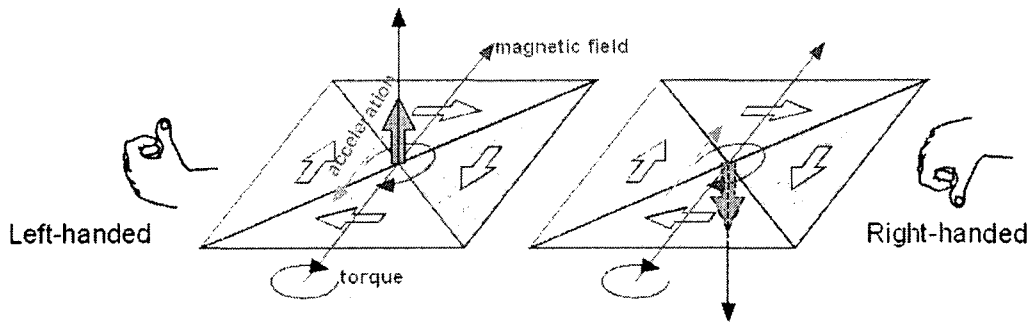


그림 2. 손지기에 따른 자기소용돌이 스핀구조

기장은 자기소용돌이 구조의 모든 스핀에 오른손 방향의 옆돌기 돌림힘(precessional torque)을 발생시킨다. 이때, 왼손 손지기 자기소용돌이 구조의 스핀구조는 외부자기장 축에 대해 오른손 나선의 정렬을 보이고 있고, 오른손 손지기 자기소용돌이 구조의 스핀구조는 왼손 나선의 정렬을 보이고 있다. 따라서 오른손 방향의 옆돌기 돌림힘에 대해 서로 반대방향으로의 운동을 발생시키고, 그 방향은 인가된 자기장의 방향에 대해 평행하거나 반평행하다.

한 방향으로 이동한 자기소용돌이 구조는 내부 정자기장에 의해서 자이로운동을 한다. 이때 내부 정자기장은 자기소용돌이 구조의 이동으로 flux closure를 이루는 4개의 자기구역 사이의 넓이가 달라짐으로써 발생한다. 정자기장의 방향은 항상 자기소용돌이 구조의 변위에 수직이므로, 자기소용돌이 구조는 접선방향으로 가속하게 되어 원형운동 또는 자이로운동을 한다. 이때, 자이로 운동의 회전방향은 자기소용돌이 구조의 중심 자화상태에 의해 결정된다.

자기소용돌이 구조의 위치를 시간에 대해 관찰할 수 있기 때문에, 자기소용돌이 구조의 속도를 직접 측정할 수 있었다. 측정된 자기소용돌이 구조의 속도는 초기에 대략 초속 100 미터이고 시간에 대해 서서히 감소하였다. 이때, 반감시간은 대략 17.7 나노초이고 이는 감쇠상수 0.015에 해당한다. 정역학적으로 구해진 자기소용돌이 구조에서 유도된 예측과 비교하였을 때, 자기소용돌이 구조의 속도는 10배 이상 빠른 것으로 나타났고, 이는 동역학 운동을 할 때 자기소용돌이 구조가 변형되어야 한다는 것을 의미한다.

#### 4. 결론

공간분해능과 시간분해능을 동시에 갖춘 초고속 자기현미경을 세계최초로 개발하여, 자기소용돌이 구조의 동역학을 관찰하였다. 자기소용돌이 구조의 동역학에 대한 기본적인 법칙을 발견하였고, 이러한 법칙은 자기소용돌이 구조의 3차원적 손지기에 의해 결정됨을 알 수 있었다.

#### 5. 참고문헌

- [1] Sug-Bong Choe, Yves Acremann, Andreas Scholl, Andreas Bauer, Andrew Doran, Joachim Sthr, and Howard A. Padmore, "Vortex-Core-Driven Magnetization Dynamics," Science **304**, 420 (2004).