

계면 Dzyaloshinskii-Moriya 상호작용과 궤도 자기 모멘트의 상관관계 연구

Sanghoon Kim^{1**}, Kohei Ueda¹, Kihiro Yamada¹, Motohiro Suzuki², Yoshinori Kotani²,
Tetsuya Nakamura², Gyungchoon Go³, Peong-Hwa Jang³, Kyung-Jin Lee³,
Abderrezak Belabbes⁴, Aurelien Manchon⁴, Kohji Nakamura⁵, Tomohiro Koyama⁶,
Daichi Chiba⁶, Takahiro Moriyama¹, Kab-Jin Kim¹ and Teruo Ono^{1*}

¹Institute for Chemical Research, Kyoto University

²Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/SPring-8)

³Department of Materials Science & Engineering, Korea University

⁴Science and Engineering Division, King Abdullah University of Science and Technology

⁵Department of Physics Engineering, Mie University

⁶Department of Applied Physics, Faculty of Engineering, The University of Tokyo

*Correspondence to: makuny80@gmail.com, ono@scl.kyoto-u.ac.jp

1. 서론

최근 Å 두께의 자성 박막과 스핀-궤도 결합이 강한 중금속 물질의 계면에서 Dzyaloshinskii-Moriya 상호작용(DMI)에 의한 카이럴리티를 갖는 독특한 스핀 구조가 실험적으로 발견되고 있다. 대표적인 예로 스켈미온의 형성이나 나노 와이어에서의 Neel 자벽 구조가 있다[1,2]. 이들 모두 DMI에 의한 카이럴리티를 갖고 있어야만 형성되는 독특한 스핀 구조로 저전류 동작 혹은 고속 신호 처리의 장점을 갖고 있어 차세대 기록 저장 장치 혹은 논리소자에 응용이 기대되고 있다. 그러나 계면의 스핀-궤도 결합에 의한 현상임에도 불구하고 아직까지 미세 전자구조와 디엠아이의 관계가 명확히 규명되지 않고 있다. 본 발표에서는 Pt과 Co의 계면에서 발생하는 DMI의 크기를 자구벽 이동 속도 측정으로 확인한다. DMI 크기는 DMI에 의한 유효 자기장(H_{DMI})으로 구할 수 있으며, H_{DMI} 의 변화를 유도하기 위해 300 K에서 100 K까지 온도를 변화시켜가며 자구 벽 이동속도를 측정하고 그것의 온도의존성을 관찰한다. 자기 이색성 측정(x-ray magnetic circular dichroism, XMCD)을 이용한 궤도 자기 모멘트의 크기를 구하여 DMI의 온도 의존성과의 비교를 통해 두 물리량의 관계를 증명한다.

2. 실험방법과 결과

나노 와이어에서의 자구벽 이동 속도 측정을 위한 시편 구조는 Ta (4)/Pt (2)/[Co 0.3/ Ni 0.6]₂/Co 0.3/MgO (1)/ Pt (4)(nm)이다. DMI에 의한 유효 자기장은 나노 세선과 평행한 방향으로 알려져 있다. 자구벽을 이동 시키는 구동력이 자기장일 경우 H_{DMI} 에 의해 자구벽의 자화는 평균적으로 고정되어 soliton과 같은 거동을 보이고 결과적으로 자구벽 이동속도를 증가시킨다. 만약 H_{DMI} 가 나노 와이어와 평행한 방향으로 가해진 외부 자기장에 의해 상쇄되면 솔리톤 특성이 사라져 자구벽 이동속도가 최저가 된다. 이같은 원리를 이용하여 외부자기장 크기에 의한 자구벽 이동속도의 변화를 통해 H_{DMI} 를 온도별(100, 150, 200 그리고 300 K)로 측정하였다. 관측된 온도에 따른 H_{DMI} 의 크기는 표 1에 정리하였다. 흥미롭게도 100 K에서 측정된 H_{DMI} 는 300 K에서 측정된 것보다 약 2배가량 큰 값을 갖고 있음을 확인하였다. 동일한 온도조건에서 오비탈 모멘트의 변화를 관찰하기 위해 일본 Spring-8의 25번과 39번 빔라인에서 Co와 Pt의 자기 이색성 측정이 진행되었다. 궤도 모멘트의 이방성을 확인하기 위해 원형 편광된 x선의 입사각을 0, 70도로 하여 각도 의존성을 측정하였다. 표 1에 정리된 바와 같이 수직방향 궤도 모멘트의 변화가 수평방향보다 더 큰 것을 확인할 수 있다. 두 모멘트의 비율은 명확한 온도의존성(100K에서 약 64% 증가)을 보였다.

3. 고찰

DMI에너지 상수는 아래와 같이 표현된다 [3].

$$H_{DMI} = \frac{D}{M_s \Delta}$$

위 식에서 D , M_s , 그리고 Δ 는 각각 DMI 에너지 밀도, 나노 와이어의 포화 자화, 그리고 자구벽 두께이다. 자구벽 두께가 $\Delta = \sqrt{A/K_{eff}}$ (A 는 교환결합 에너지상수, $K_{eff} \propto M_s$ 는 유효 자기 이방성 에너지)이므로 H_{DMI} 는 $\sqrt{M_s}$ 과 반비례 한다. 따라서 저온에서의 H_{DMI} 는 포화자화 값의 증가로는 설명하기 어렵다. 한편, DMI는 Rashba 에너지 상수(α_R)와 비례한다고 알려져 있는데 [4], 역대칭 구조가 깨져있는 계면에서는 α_R 와 수직 및 수평 궤도 모멘트의 비 ($m_o^{\uparrow}/m_o^{\downarrow}$)가 서로 선형 비례하는 것으로 보고된 바 있다[5]. 본 연구결과는 자구벽 이동 속도로 부터 얻어진 H_{DMI} 와 XMCD로 부터 얻어진 $m_o^{\uparrow}/m_o^{\downarrow}$ 이 서로 비슷한 온도 의존성을 갖는 다는 것을 보여 준다. 한편, S.S. Parkin 그룹에서 보고한 DMI와 Pt의 유도자기 모멘트와의 연관성은 관측되지 않았다[6]. 위 결과들은 궤도 자기 모멘트의 이방성, 즉 물질의 궤도 전자구조가 DMI의 미세구조 관점에서의 근원이 될 수 있음을 보여준다.

4. 결론

최근 실험적으로 발견되는 스핀 홀 효과나 DMI와 같은 스핀-궤도 결합에 의한 물리적 현상들은 궤도 전자 구조와 밀접한 관계가 있다고 보고되어 왔으나, 궤도 자기 모멘트의 실험적 측정이 어려운 관계로 많은 연구가 되어있지 않다. 본 연구는 DMI가 큰 물질의 설계를 위한 초석이 될 뿐만 아니라 궤도 전자 구조의 실험적 측정에 대한 방법적인 해결책을 마련하는 중요한 디딤돌이 될 것이다.

5. 참고문헌

- [1] Emori, S. *et al. Nat. Mater.* **12**, 611-616 (2013).
- [2] Fert, A. *et al. Nat. Nanotech.* **8**, 152 (2013).
- [3] Thiaville, A. *et al. Europhys. Lett.* **100**, 57002 (2012).
- [4] Kim, K.-W. *et al. Phys. Rev. Lett.* **111**, 216601 (2013).
- [5] Nistor, C. *et al. Phys. Rev. B* **84**, 054464 (2011).
- [6] Ryu, K.-S. *et al. Nat. Commun.* **5**, 3910 (2014).