

## Experimental Scheme based on Magneto-Optical Kerr Effect Microscope for Measurement of Dzyaloshinskii-Moriya Interaction

Dae-Yun Kim<sup>1</sup>, Duck-Ho Kim<sup>1,2</sup>, Min-Ho Park<sup>1</sup>, and Sug-Bong Choe<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics and Astronomy, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

<sup>2</sup>Present address: Institute for Chemical Research, Kyoto University, Kyoto, Japan

(Received 15 September 2017, Received in final form 16 October 2017, Accepted 16 October 2017)

We report here an experimental scheme based on a magneto-optical Kerr effect microscope to measure asymmetric domain-wall (DW) speed induced by Dzyaloshinskii-Moriya (DM) interaction. In this scheme, the possible artifacts caused by the in- and out-of-plane electromagnets are analyzed and carefully removed. The present scheme is then applied to measure the asymmetric DW speed of two different Pt/Co/Pt magnetic films with different magnetic layer thicknesses. In thinner magnetic film, the DW speed is well characterized by the DW energy variation model, enabling us to determine the magnitude of the effective in-plane magnetic field induced by the DM interaction. On the other hand, in the thicker film, the DW speed shows additional asymmetry, which is possibly caused by the variation of physical parameters other than the DW energy.

**Keywords :** magneto-optical Kerr effect, magnetic domain-wall, Dzyaloshinskii-Moriya interaction

## 잘로신스키-모리야 상호 작용 측정을 위한 광자기 커르 효과 현미경 측정법 개발

김대연<sup>1</sup> · 김덕호<sup>1,2</sup> · 박민호<sup>1</sup> · 최석봉<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 물리천문학부, 서울시 관악구 관악로1 08826,

<sup>2</sup>현재 주소: Institute for Chemical Research, Kyoto University, 교토, 일본

(2017년 9월 15일 받음, 2017년 10월 16일 최종수정본 받음, 2017년 10월 16일 게재확정)

잘로신스키-모리야 상호 작용에 의한 비대칭 자구벽 속도 측정을 위한 광자기 커르 효과 현미경 측정법을 개발하였다. 이 측정법에서는 수평 및 수직 전자석에서 발생하는 오류를 분석하고 제거하였다. 이 측정법을 적용하여 자성층의 두께가 다른 두 가지 Pt/Co/Pt 자성 박막의 잘로신스키-모리야 상호 작용을 측정하였다. 얇은 자성층 두께의 박막에서는 자구벽 속도가 기존 자구벽 에너지 변화 모델로 잘 설명되었으며, 이를 통하여 잘로신스키-모리야 상호 작용에 의한 유효 자기장을 측정할 수 있었다. 반면, 두꺼운 두께의 박막에서는, 자구벽 에너지 이외의 다른 물리량 변화에 의한 추가적인 비대칭성을 관찰하였다.

**주제어 :** 광자기 커르 효과, 자구벽, 드잘로신스키-모리야 상호 작용

### I. 서 론

잘로신스키-모리야(Dzyaloshinskii-Moriya, DM) 상호 작용은, 하이젠베르크(Heisenberg) 교환 상호 작용과 더불어, 인접한 자기 모멘트 사이에 작용하는 근본적인 교환 상호 작용 중 하나이다[1]. 최근 DM 상호 작용이 전류에 의해 구동되는 자구벽 속도를 획기적으로 증가시킬 수 있고, 자성 스컬미온(skyrmion) 구조를 형성하는데 중요한 역할을 한다는 것

이 밝혀졌다[2, 3]. 따라서 DM 상호 작용에 대한 연구가 학계에서 활발히 진행되고 있다. 현재까지 다양한 방법으로 DM 상호 작용의 크기를 측정하는 기술이 개발되었으며, 대표적으로는 비대칭 자구벽 속도 측정법[4], 스핀-궤도 돌림힘 (spin-orbit torque) 측정법[5], 비대칭 자화 곡선(hysteresis loop) 측정법[6], 그리고 브릴루앙 산란(Brillouin light scattering) 측정법[7] 등이 있다. 이러한 다양한 측정법들 중 가장 많이 사용되는 방법 중 하나는 비대칭 자구벽 속도 측정법인데, 이는 추가적인 마이크로 소자 공정이 없이 박막 상태에서 측정이 가능하며, 또한 측정 장비 구성과 작동이 간단하기 때문이다[4]. 비대칭 자구벽 속도 측정법은 DM 상호

작용이 만들어내는 유효 자기장  $H_{DMI}$  [8]를 측정하는 일종의 간접 측정 방법이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 비대칭 자구벽 속도 측정과정에서 발생할 수 있는 실험적 오류를 분석하고 제거하는 방법을 개발하였으며, 이를 통해 Pt/Co/Pt 구조의 자성 박막의 DM 상호 작용 측정법을 개발하였다.

## II. 실험 방법

### 1. 광자기 커르 효과 현미경 시스템 구축

광자기 커르 효과(Magneto-Optical Kerr Effect, MOKE) 현미경은 일반적으로 사용되는 광학 현미경을 기반으로 Fig. 1과 같이 제작되었다. 실험에 사용된 광학 현미경(Axiotech vario, Carl Zeiss)은 수직 방향으로 이동할 수 있는 거리가

길어서, 부피가 큰 전자석 장착이 용이하다. 다양한 크기의 자구벽 및 구조물 관측이 가능하도록 몇 가지 다른 배율 ( $\times 2.5, 20, 50$ , 그리고  $100$ )의 대물 렌즈가 장착되었다. 대물 렌즈는 편광 관찰이 가능한 제품으로 선정되었다. 접안 렌즈로 10배 배율의 렌즈가 사용되었다. 작은 광자기 커르 효과를 관측할 수 있도록, 100 W 전력의 수은등(HBO 100 illuminating system, Carl Zeiss)을 광원으로 사용하였다. 이 수은등은 대략 365와 436 nm의 파장에서 최대 출력을 발생시킨다. 실험에 사용된 CCD 카메라(SHC-745, Samsung Techwin)는 낮은 조도의 영상 촬영이 가능한 모델로 선정되었으며, 일반적으로 사용되는 시간 분해능(video rate,  $\sim 33$  ms)과 영상 크기(VGA,  $640 \times 480$ )를 제공한다. CCD 카메라에서 촬영된 영상 신호는 영상 변환기(AccuStream 205a, Foresight Imaging)를 통해 컴퓨터로 전송된다.

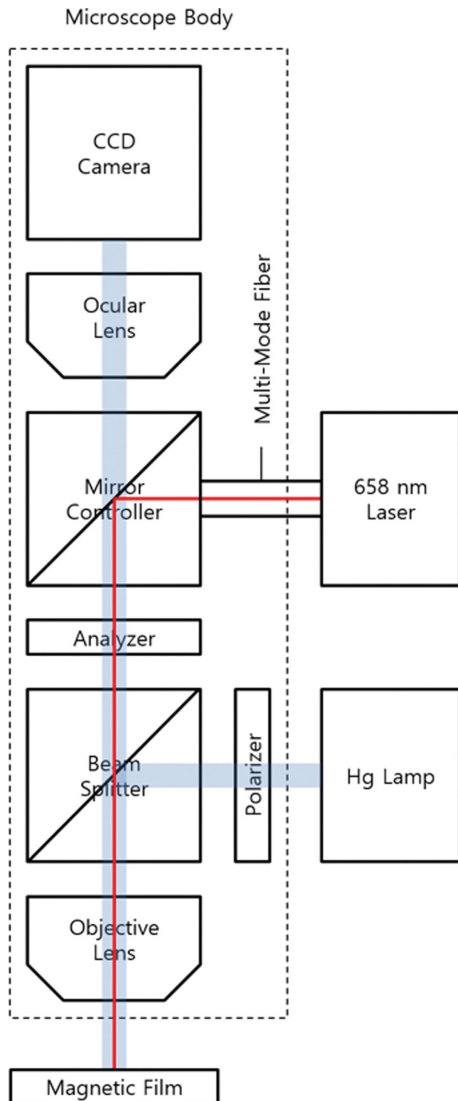
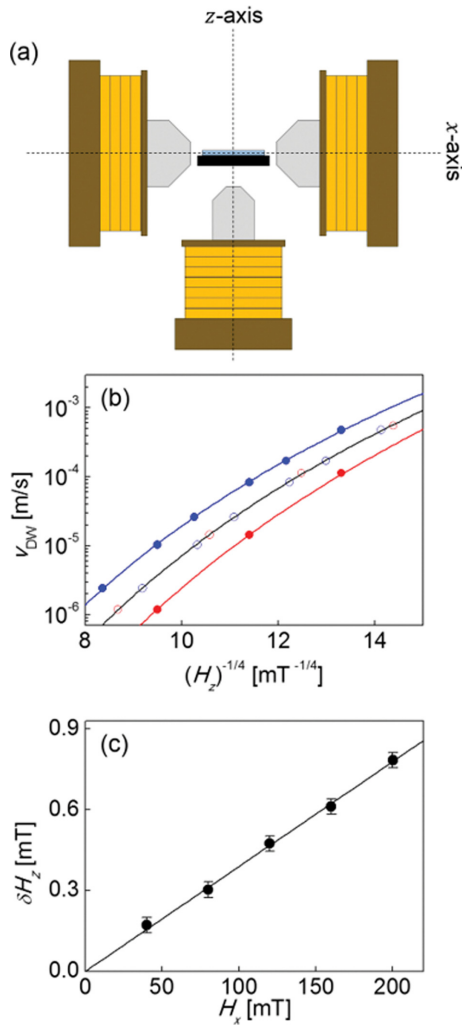


Fig. 1. (Color online) Schematic diagram of the MOKE microscope and its beam path.

### 2. 전자석 설치, 정렬, 및 보정

시료에 자기장을 인가하기 위하여, 2축의 전자석이 장착되었다.  $x$ 축과  $z$ 축 전자석 모두 자체 제작되었으며, [Fig. 2(a)]와 같이 위치시켰다. 전류 인가에 의해 발생하는 열을 냉각시키기 위하여, 전자석 몸체는 열 전도율이 높은 비자성 물질인 구리로 구성하였고, 수냉식 구조로 제작되었다. 전자석 코일에 의해 발생하는 자기장을 증폭시키기 위해 열처리된 철심을  $x$ 축 전자석 중앙에 삽입하였다.  $z$ 축 전자석의 철심은 필요에 따라 탈착이 가능하도록 설계하였다. 양극성 전원 공급기가 각각의  $x$ 축과  $z$ 축 전자석에 전류를 공급한다. 실험에 사용된 전원 공급기(BOP 50-4M, Kepco)는 최대 50 V의 전압과 최대 4 A의 전류의 출력이 가능하며, 이 전압과 전류 비에 맞추어 전자석 코일의 저항을 대략  $12 \Omega$ 으로 설계하였다. 전류 인가에 따른 온도 증가에 의해 저항이 증가하는 효과에 대비하여, 코일의 저항은 최대 전압과 전류 비보다 조금 작게 선정되었다. 이러한 전자석을 이용하여,  $z$ 축 방향으로 최대 35 mT( $z$ 축 전자석의 철심이 있는 경우)와  $x$ 축 방향으로 최대 200 mT의 자기장을 시료에 인가할 수 있도록 하였다.

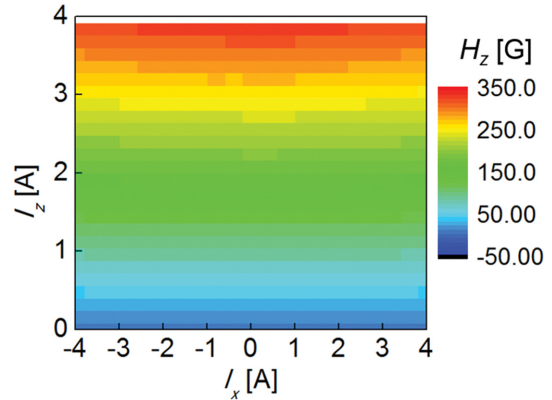
자구벽 속도의  $H_x$  의존성 측정 실험을 위해서,  $H_x$ 와  $H_z$ 를 동시에 걸어주어야 한다. 이 경우, 이 두 전자석의 정렬 상태에 따라서 오류가 발생할 수 있으므로, 세심하게 보정해주는 작업이 필요하다. 대부분의 오류는  $x$ 축 전자석에서 발생하는 자기장과 시료 표면이 평행하게 정렬되지 않는 경우에 발생한다. 이러한 현상은 기계적 유격에 의한  $x$ 축 전자석의 정렬 오류와 시료를 시료대에 올려놓을 때 발생하는 미세한 기울어짐 등에 의해 발생한다. 일반적인 자구벽 속도의  $H_x$  의존성 측정 실험에서는,  $H_x$ 를 수백 mT까지 인가하는 반면에,  $H_z$ 는 수 mT 정도 인가하는 경우가 많다. 이 경우,  $x$ 축 전자석이  $1^\circ$  미만의 작은 정렬 오류를 가지고 있는 경우라도, 이



**Fig. 2.** (Color online) (a) Schematic diagram of the electromagnets setup. The z-electromagnet is aligned to the illumination beam path along the z axis. The x-electromagnet is aligned to the focal plane. (b) Plot of  $v_{DW}$  as a function of  $H_z$  measured under constant magnetic field,  $+H_x$  (blue symbol) and  $-H_x$  (red symbol). The open symbols represent the data for  $\pm H_x$  after shifting along the abscissa by  $\mp \delta H_x$ , respectively. (c) Plot of  $\delta H_z$  with respect to  $H_x$ . The solid line represents the best linear proportional fitting with the fixed zero-intercept.

정렬 오류에 의해 발생하는 z축 방향의 자기장의 크기는  $H_z$ 에 비해 무시하지 못할 정도로 큰 값을 갖게 된다. 따라서, 가우스 미터를 이용한 자기장 정밀 측정을 통해, x축 전자석을 최대한 정렬하는 과정이 수행하였고, 정렬 오류를 약 0.5° 미만으로 제거하였다.

그러나 이와 같이 기계적인 방식으로 이러한 정렬 오류를 완벽하게 제거할 수는 없고 또한 시료를 바꾸는 과정에서 항상 새로운 정렬 오류가 발생할 수 있기 때문에, 아래와 같이 추가적인 보정 작업 방법을 개발하였다. 특정 크기의  $+H_x$  또는  $-H_x$ 를 각각 up 자구와 down 자구에 일정하게 인가한

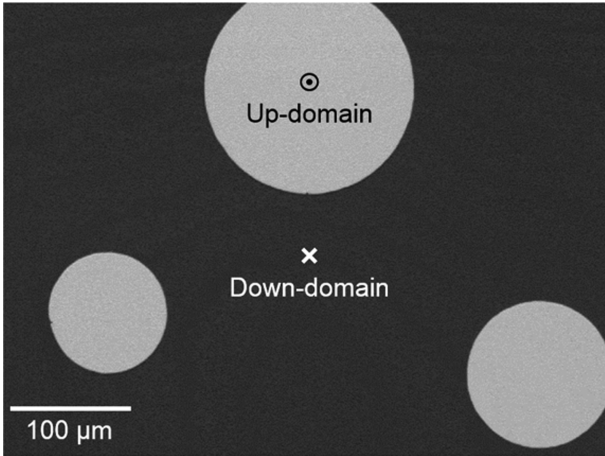


**Fig. 3.** (Color online) Two-dimensional map of  $H_z$  as a function of  $I_x$  and  $I_z$ . The color represents the magnitude of  $H_z$ , of which scale is represented on the right panel.

상황에서,  $H_z$ 의 크기를 바꾸면서 각각의 자구벽 속도를 측정하면, [Fig. 2(b)]와 같은 결과를 얻을 수 있다.  $+H_x$  또는  $-H_x$ 의 부호에 따라, 각각의 자구벽 속도는 서로 같은 변화 형태를 가지지만, 서로가 서로에 대해  $H_z$ 축 상에서 평행 이동을 한 모습을 보인다. 이러한 평행 이동의 원인은 x축 전자석의 정렬 오류에 의해 발생한 z축 방향의 자기장 성분으로 파악된다. 따라서, 이러한 평행 이동의 크기를 측정함으로써, x축 전자석의 정렬 오류에 의해 발생하는 z축 방향의 자기장 성분의 세기  $\delta H_z$ 를 구할 수 있다. [Fig. 2(c)]는  $\delta H_z$ 를  $H_x$ 를 바꾸어가며 측정한 결과를 보여준다. 그림에서 관찰된  $\delta H_z$ 와  $H_x$ 의 정비례 관계로부터,  $\delta H_z$ 가 주로 x축 전자석의 정렬 오류로부터 발생하였다는 검증할 수 있다. 따라서, 이와 같은 방법으로  $\delta H_z$ 를 구하고,  $\delta H_z \propto H_x$ 의 관계를 이용하여, 각각의  $H_x$ 에 대해  $\delta H_z$ 를 상쇄되도록 z축 전자석에서 발생하는 자기장을 보정함으로써, 최종적으로 대부분의 오류를 제거하는데 성공하였다.

z축 전자석의 철심을 시료에 가까이 부착하는 경우,  $H_x$ 의 영향을 받아 z축 철심에 원치 않는 유도 자화가 발생한다. 따라서,  $H_x$ 와  $H_z$ 를 동시에 걸어주어야 하는 실험에서는 z축 전자석의 철심을 제거하고 실험하는 것이 이러한 오류를 방지하는 데에 유리하다. 본 연구의 측정은 z축 전자석의 철심을 제거한 상태에서 수행되었다.

그러나 z축 전자석의 철심이 없는 경우에는 최대 인가 자기장의 세기가 제한된다. 따라서, x축과 z축에 모두 강한 자기장을 필요로 하는 실험에서는, z축 전자석의 철심을 설치한 상태에서, 실제 발생하는 자기장  $H(I_x, I_z)$ 를  $I_x$ 와  $I_z$ 에 대한 2차원 함수의 형태로 모두 측정하고, 이를 실험 결과에 사용하도록 하였다. 여기서,  $I_x$ 와  $I_z$ 는 x축과 z축 전자석에 각각 흘려준 전류의 세기를 나타내며, 측정 결과는 [Fig. 3]에 정리되었다.



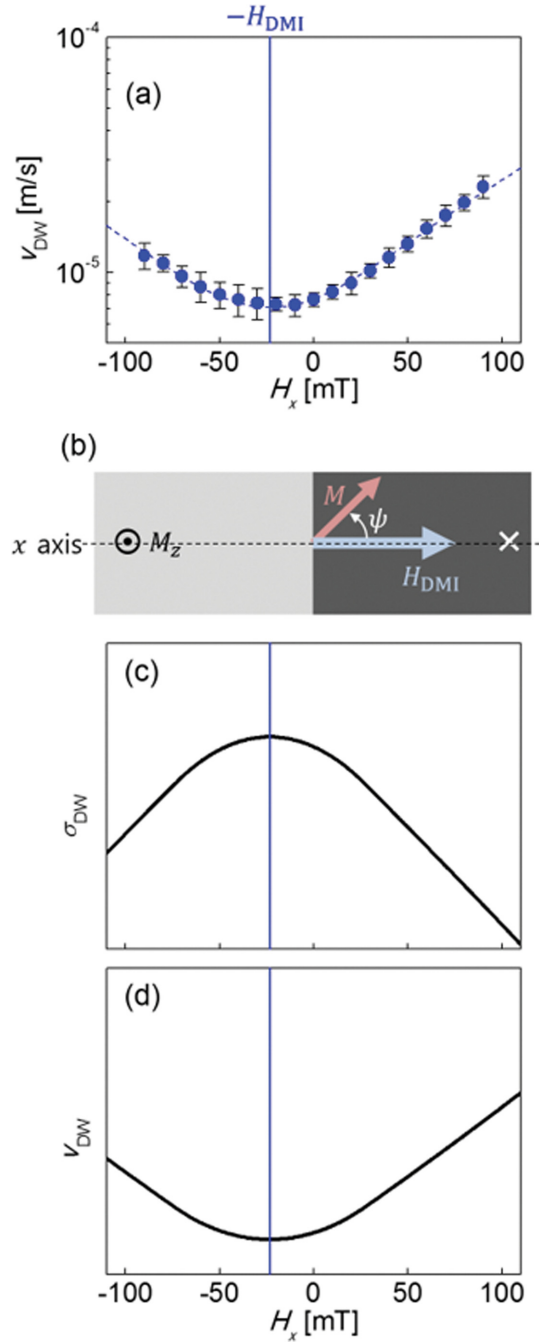
**Fig. 4.** Normalized image of circular magnetic domains captured by CCD camera.

### III. 실험 결과 및 고찰

$H_{DMI}$  측정 실험을 위해, 5.0-nm Ta/2.0-nm Pt/ $x$ -nm Co/1.5-nm Pt( $x = 0.3, 0.9$ ) 다층 자성 박막을 직류 스퍼터링 장비를 이용하여 Si/SiO<sub>2</sub> 기판 위에 증착하였다. 두 구조의 자성 박막 모두 강한 수직 자기이방성을 가지고 있다. 이 박막에 외부 자기장을 인가하면, [Fig. 4]과 같이 깨끗한 원형 형태로 자구가 확장하는 형상이 관찰된다.

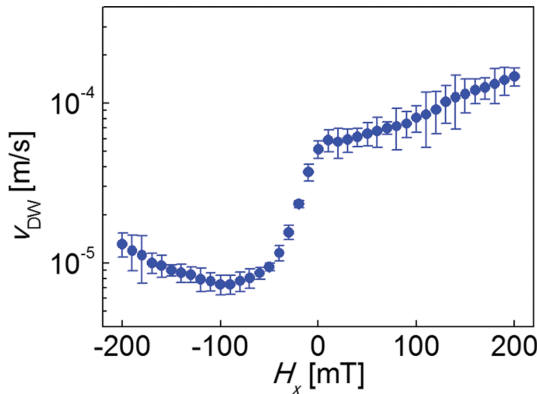
첫번째 시료( $t_{Co} = 0.3$  nm)의 자구벽 속도  $v_{DW}$ 를  $H_x$ 의 세기를 바꾸어가며 측정된 결과를 [Fig. 5(a)]에 정리하였다. 그림에 표시된 파랑색 점선에 대하여 자구벽의 속도가 대칭적인 형태가 관찰된다. 이러한 대칭적인 형태는 자구벽 에너지 밀도의 변화에 의해 발생하며, 대칭축의 값은 DM 상호 작용에 의해 결정된다고 알려져 있다[4].

[Fig. 5(b)]와 같이 자구벽이 주어졌을 때, 수직 자기 이방성을 가지는 자성 박막에서 DM 상호 작용은  $x$ 축에 평행한 방향의 유효 자기장  $H_{DMI}$ 을 만든다. 이러한 자구벽에  $x$ 축 방향 외부 수평 자기장  $H_x$ 을 인가하게 되면, 자구벽 에너지 밀도  $\sigma_{DW}$ 는  $\sigma_{DW} = \sigma_0 + 2K_D \lambda \cos^2 \psi - \pi \lambda M_S (H_{DMI} + H_x) \cos \psi$ 로 주어진다[4, 8]. 여기서  $\sigma_0$ 는 블로흐(Bloch) 타입 자구벽의 에너지 밀도,  $K_D$ 는 자구벽의 형상 이방성 에너지,  $\lambda$ 는 자구벽 두께,  $M_S$ 는 포화 자화량, 그리고  $\psi$ 는 자구 내부의 자화 각도이다. 에너지 최소화 조건( $\partial \sigma_{DW} / \partial \psi = 0$ )을 통해, 에너지가 최소화되는 평형 상태에서의  $\psi$ 를 구할 수 있으며, 이를 통하여 평형 상태의  $\sigma_{DW}$ 를  $H_x$ 에 대한 함수로 얻을 수 있다. [Fig. 5(c)]는  $H_x$ 의 크기에 따른  $\sigma_{DW}$ 의 값을 계산한 결과의 개형을 보여준다. 이 계산에서는 첫번째 시료에서 측정된 자기적 성질 값들이 사용되었다. 그림으로부터  $\sigma_{DW}$ 는  $H_x = -H_{DMI}$ 축에 대하여 대칭적 변화를 보임을 알 수 있다. 이때, 자구벽 기어



**Fig. 5.** (Color online) (a) Plot of  $v_{DW}$  as a function of  $H_x$  under a constant  $H_z = 8$  mT for Sample I. The blue vertical line indicates  $H_x = -H_{DMI}$ . (b) Schematic diagram of the domain-wall configuration between up and down magnetic domains. The blue and red arrow represents the direction of  $H_{DMI}$  and  $M$ , respectively. Plots of calculated  $\sigma_{DW}$  (c) and  $v_{DW}$  (d) as a function of  $H_x$ .

가기(creep) 영역에서 자구벽의 속도  $v_{DW}$ 는 자구벽 에너지 밀도  $\sigma_{DW}$ 에 대해,  $\ln(v_{DW}) \propto (\sigma_{DW})^{1/4}$ 의 관계가 있다고 알려져 있으므로[4], 자구벽 속도 역시 [Fig. 5(d)]와 같이  $H_x = -H_{DMI}$  축에 대하여 대칭적 변화를 보인다. 따라서, 자구벽의 속도를



**Fig. 6.** (Color online) Plot of  $v_{DW}$  as a function of  $H_x$  under a constant  $H_z = 11$  mT for Sample II.

측정하고, 그 변화의 대칭축을 측정함으로써,  $H_{DMI}$  값을 정량적으로 구할 수 있다.

관찰된 대칭 축으로부터  $H_{DMI}$ 는 약  $23 \pm 3$  mT로 측정되었으며, 기존에 보고된 값들과 비슷한 크기를 보인다. 이 시료의 구조가 대칭적임에도 0이 아닌  $H_{DMI}$  값을 보이는 이유는, Pt/Co 계면과 Co/Pt 계면이 서로 다른 특성을 갖기 때문으로 판단된다. 두 계면이 서로 다른 특성을 갖는 것은, 각각의 계면이 형성될 때 원자량이 크게 차이가 나는 Pt와 Co 원자가 증착되는 순서가 다르기 때문에, 이후에 쌓이는 원자의 기존 층으로의 침투 정도가 다르기 때문일 것으로 판단된다.

[Fig. 6]는 두 번째 시료( $t_{Co} = 0.9$  nm)의 자구벽 속도  $v_{DW}$ 를  $H_x$ 의 세기를 바꾸어가며 측정한 결과를 보여준다. 첫 번째 시료와 달리, 두 번째 시료는 대칭적인 형태를 보이지 않으며, 따라서 자구벽 에너지 모델로 설명될 수 없다. 이는 인가한  $H_x$ 의 세기에 따라 자구벽 에너지 뿐만 아니라, 또 다른 물리량이 변하기 때문으로 판단된다. 최근 이에 대한 연구가 세계적으로 여러 그룹에 의해서 활발하게 진행되어 오고 있는 상황이며, 다양한 가설과 모델이 제시되었지만 아직 정확한 원인은 밝혀지지 않은 상태이다[9-15]. 이러한 비대칭적인 형태에도 불구하고, 포화 자화값을 이용한 추가적인 보정을 통해,  $H_{DMI}$ 를 추산하는 실험 방법이 최근 보고되기도 하였다 [15].

#### IV. 결 론

2축 전자석 시스템의 정렬 오류를 분석하고 이에 따른 자기장을 보정하는 실험적 방법을 개발하였다. 이 방법을 적용하여, Pt/Co/Pt 자성 박막의 비대칭 자구벽 속도 변화를 성공적으로 측정하였다. 얇은 자성층 두께(0.3 nm)의 자성 박막에서는, 자구벽 속도 변화가 자구벽 에너지 변화 모델로 잘 해

석되었다. 이를 바탕으로 DM 상호 작용이 발생시키는 유효 자기장을 정량적으로 측정하였다. 이와 대조적으로, 두꺼운 자성층 두께(0.9 nm)의 자성 박막에서는, 추가적인 비대칭성이 발견되었고, 이는 수평 자기장을 인가함에 따라서 자구벽 에너지와 더불어 다른 물리량들이 함께 변하는 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

이 논문은 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2015R1A2A1A05001698, 2015M3D1A1070465).

#### References

- [1] I. Dzyaloshinsky, J. Phys. Chem. Solids **4**, 241 (1958).
- [2] S. Emori, U. Bauer, S.-M. Ahn, E. Martinez, and G. S. D. Beach, Nat. Mater. **12**, 611 (2013).
- [3] A. Fert, V. Cros, and J. Sampaio, Nat. Nanotechnol. **8**, 152 (2013).
- [4] S.-G. Je, D.-H. Kim, S.-C. Yoo, B.-C. Min, K.-J. Lee, and S.-B. Choe, Phys. Rev. B **88**, 214401 (2013).
- [5] K.-S. Ryu, L. Thomas, S.-H. Yang, and S. Parkin, Nat. Nanotech. **8**, 527 (2013).
- [6] D.-S. Han, N.-H. Kim, J.-S. Kim, Y. Yin, J.-W. Koo, J. Cho, S. Lee, M. Klaui, H. J. M. Swagten, B. Koopmans, and C.-Y. You, Nano Lett. **16**, 4438 (2016).
- [7] J. Cho, N.-H. Kim, S. Lee, J.-S. Kim, R. Lavrijsen, A. Solignac, Y. Yin, D.-S. Han, N. J. J. van Hoof, H. J. M. Swagten, B. Koopmans, and C.-Y. You, Nat. Commun. **6**, 7635 (2015).
- [8] A. Thiaville, S. Rohart, E. Jué, V. Cros, and A. Fert, Europhys. Lett. **100**, 57002 (2012).
- [9] R. Lavrijsen, D. M. F. Hartmann, A. van den Brink, Y. Yin, B. Barcones, R. A. Duine, M. A. Verheijen, H. J. M. Swagten, and B. Koopmans, Phys. Rev. B **91**, 104414 (2015).
- [10] E. Jué, C. K. Safeer, M. Drouard, A. Lopez, P. Balint, L. Buda-Prejbeanu, O. Boulle, S. Auffret, A. Schuhl, A. Manchon, I. M. Miron, and G. Gaudin, Nat. Mater. **15**, 272 (2016).
- [11] C. A. Akosa, I. M. Miron, G. Gaudin, and A. Manchon, Phys. Rev. B **93**, 214419 (2016).
- [12] D.-Y. Kim, D.-H. Kim, and S.-B. Choe, Appl. Phys. Express **9**, 053001 (2016).
- [13] D. Lau, V. Sundar, J.-G. Zhu, and V. Sokalski, Phys. Rev. B **94**, 060401(R) (2016).
- [14] D.-H. Kim, S.-C. Yoo, D.-Y. Kim, B.-C. Min, and S.-B. Choe, arXiv:1608.01762 (2016).
- [15] D.-Y. Kim, M.-H. Park, Y.-K. Park, J.-S. Kim, Y.-S. Nam, H.-C. Choi, D.-H. Kim, S.-G. Je, B.-C. Min, and S.-B. Choe, arXiv:1704.08751 (2017).