

## 전기도금법으로 제작한 두께가 다른 CoPt 자성막의 자화역전과 자기역전 부피

김현수 · 정순영 \*

경상대학교 자연과학대학 물리학과 및 기초과학 연구소, 경남 진주시 가좌동 900번지, 660-701

이창형 · 서수정

성균관대학교 공과대학 신소재공학부, 경기 수원시 장안구 천천동 300, 440-746

(2011년 11월 28일 받음, 2011년 12월 20일 최종수정본 받음, 2011년 12월 20일 게재확정)

두께가 다른 CoPt 자성막을 전기도금법으로 제작하여 자화역전 기구와 자기상호작용이 자기역전 부피에 미치는 영향을 연구하였다. 자기모멘트 감쇠의 시간의존성과 잔류자기화 곡선 측정결과로부터 모든 시료의 지배적인 자화역전 기구는 자벽고착에 의한 자벽이동임을 알 수 있었다. 자기점성계수 및 비가역 자화율로부터 구한 자기역전 부피는 시료의 두께 및 인가 자기장의 세기에 거의 무관하게 일정하였으나, 자기역전 부피로부터 구한 역전 직경의 크기는 두께가 두꺼울수록 감소하는 경향을 보였다. 이와 같은 현상은 자벽고착에 의해 제어되는 자벽운동과 쌍극자 상호작용에 의한 것으로 판단된다.

**주제어** : 전기도금, CoPt 자성막, 자화역전 기구, 자기상호작용, 자기역전 부피

### I. 서 론

자기기록 매체에 저장된 정보의 수명과 관련된 열적 안정성은 결맞음 회전(coherent rotation)을 하는 단자구 입자인 경우 물리적인 부피(physical volume:  $V$ )가 열적 안정성을 결정하는 물리량으로 사용된다. 그러나 다양한 크기의 낱알(grain)로 형성된 합금 자성막의 경우 낱알의 자화역전 기구와 낱알 사이의 자기상호작용 등으로 인해 자화역전을 일으키는 부피가 물리적 부피와는 다르므로 물리적 부피 대신 집단적으로 함께 역전을 일으키는 단위부피, 즉 자기역전부피(magnetic switching volume:  $V^*$ )가 기록매체의 열적 안정성 뿐만 아니라 신호대 잡음비(S/N) 및 기록밀도를 평가하는 중요한 물리량으로 취급되고 있다[1-3].

자화역전 기구는 크게 자화회전과 자벽운동(domain wall motion)으로 대별되지만, 많은 자성체의 경우 자화역전 기구는 시료의 자기적 특성을 나타내는 자기이력곡선 모든 과정에서 단순히 한 가지 기구에 의해 역전을 일으키는 것이 아니라 인가 자기장의 세기에 따라 다른 역전 기구를 보이는 특징이 있다. 일반적으로 결맞지 않은 회전(incoherent rotation) 또는 자벽운동으로 역전을 일으킬 경우는 자기역전 부피가 물리적 부피에 비해 다소 작은 것으로 알려져 있으며[4], 역자구생성 자기장( $H_N$ )이 자벽고착 자기장( $H_{Dw}$ )에 비해 크면 역자구가 생성되자마자 고착점에 의해 방해받지 않고 확장되기 때문에 역전 부피가 증가하고 자기이력 곡선의 각형비가 증가하는 것으로 Luo[5]와 O'Grady[6]는 설명하고 있다.

또한 교환상호작용과 쌍극자상호작용으로 대별되는 자기상호작용 기구와 세기는 자기역전 부피와 밀접하게 관련되는 것으로 알려져 있는데, 조성을 달리하여 제작한 CoPt : C 자성막의 경우 교환상호작용을 일으킨 시료의 역전부피는 물리적 크기에 비해 크지만 쌍극자 상호작용이 지배적인 시료는 역전 부피와 물리적 부피가 거의 같음을 Yan이 밝혔다[11]. 자기상호작용 기구와 세기는 주로 상호작용장 인자(interaction field factor), Henkel plot,  $\Delta M(H)$  및  $\Delta M(H)$ 의 면적인  $\Delta area$ 으로 분석하며[7-10], 본 연구에서는  $\Delta M(H)$ 와  $\Delta area$ 을 이용하여 분석하였다. 이와 같이 자기역전 부피는 자화역전 기구나 자기상호작용 기구와 세기 외에도 자구나 입자의 배위 등에 밀접하게 관련되어 있으며, 이들 물리량은 시료의 제작조건 뿐만 아니라 하지층의 종류와 자성층의 두께에 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있어 이에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다[12-14].

따라서 본 연구에서는 수직 자기기록 매체로서의 가능성이 큰 CoPt 자성막을 전기도금법으로 제작하여 자화역전 기구 및 자기상호작용이 자기역전 부피에 미치는 영향을 규명하도록 한다.

### II. 실험방법

연구에 사용할 CoPt 자성막은 Si(100) 기판에 직류 스퍼터링법으로 Ta(5 nm)과 Ru(20 nm)를 차례대로 성장시킨 하지층 위에 전기도금법으로 제작하였다. 2전극 시스템 galvanostatic mode 하에서 전해액의 온도를 65 °C, pH 8.5 및 전류밀도 10 mA/cm<sup>2</sup>로 일정하게 유지시킨 상태에서 두께가 각각

\*Tel: (055) 772-1404, E-mail: syjeong@gnu.ac.kr

10 nm, 14 nm, 18 nm, 22 nm인 4종류의 시료를 제작하였다.

시료의 형상과 구조는 전계방사형 주사전자 현미경(FE-SEM) 및 X선 회절장치(XRD), 조성은 에너지분산형 현미경(EDS)으로 조사하였으며, 자기특성은 시료 면에 수직인 방향으로 최대 자기장 10 kOe를 인가하여 시료진동형 자력계(VSM)로 측정하였다.

시료의 자기역전 현상은 자기모멘트 감쇠의 시간의존성, 직류 자기소거 잔류자기(DC Demagnetization Remanence: DCD) 곡선 및 등온 잔류자기(Isothermal Remanence: IRM) 측정결과로부터 얻은 비가역 자화율(irreversible susceptibility:  $\chi_{irr}$ )을 이용하여 규명하기로 한다. 자기모멘트 감쇠의 시간의존성은 10 kOe 크기의 자기장을 인가하여 시료를 포화시킨 다음 보자력보다 다소 크거나 작은 반대방향(-)의 자기장을 인가한 상태에서 600 s 동안 관측하였다. 여기서 보자력과 자기점성 계수(magnetic viscosity coefficient:  $S$ ) 각각은 상온에서 측정된 수직 자기이력곡선과 자화감쇠의 시간의존성 측정결과를 이용하여 구하였다. DCD 곡선은 먼저 시료를 포화시킨 후 포화자기장과 반대방향의 일정 자기장을 인가한 다음 자기장을 0으로 줄인 상태에서 자기모멘트를 측정하되 반대 방향으로 시료가 포화될 때까지 자기장을 줄이면서 반복적으로 측정하였다. 또한 IRM 곡선은 시료를 완전히 자기소거시킨 후 양의 방향으로 일정 자기장을 인가한 다음 자기장을 0으로 줄인 상태에서 자기모멘트를 측정하되 시료가 포화될 때까지 양의 방향으로 자기장을 일정하게 증가시키면서 반복적으로 측정하였다. 이들 두 잔류자화 곡선으로부터 비가역 자화율  $\chi_{irr}^{dcd}$  와  $\chi_{irr}^{irm}$  를 구하였다.

한편 자기역전 부피는 자기모멘트 감쇠의 시간의존성과 DCD 곡선으로부터 구한 자기점성계수(viscosity coefficient:  $S$ )와  $\chi_{irr}^{dcd}$  로부터 결정하여 자기역전 기구와의 관련성을 규명하였다.

### III. 결과 및 논의

두께를 달리하여 제작한 시료는 두께에 관계없이 동일한 조성비로 이루어져 있었고 두께가 증가할수록 다공성(porosity)이 감소함을 확인할 수 있었으며, 조성 및 구조에 관한 자세한 내용은 앞에 발표한 연구결과에 있다[15].

자기모멘트 감쇠의 시간의존성은 자기이력을 보이는 자성체에 나타나는 일반적인 현상으로 이방성 에너지장벽을 능가하는 열적으로 여기된 자기모멘트의 천이에 기인한다고 R. Street와 J.C. Woolley가 설명하고 있다[16]. 자기이력곡선에 나타나는 자기모멘트는 가역적인 성분과 비가역적인 성분이 포함되어 있고, 가역적인 성분에 비해 시간의존성이 큰 비가역적인 성분은 일반적으로 식  $M(H, t) = M_o(H, t_o) \pm S(H) \ln t$

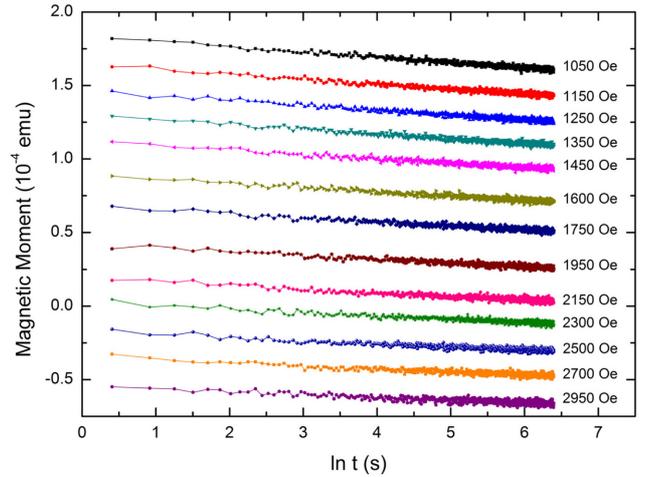


Fig. 1. (Color online) Magnetic moment decay curves as a function of  $\ln t$  for 18 nm sample with different reversing magnetic fields.

에 따라 변한다. 여기서  $M$ 과  $M_o$ 는 각각 시간  $t$ 와  $t_o$ 에서의 자화값이고  $S$ 는 자기점성계수다. Fig. 1은 포화시킨 자기장과 반대방향의 일정 자기장을 인가하여 측정한 두께가 각각 다른 시료 중 18 nm 시료에 대한 자기모멘트의 시간의존성을 나타낸 것이다. 자기모멘트는 열적활성화에 의한 에너지장벽 분포와 그 변화 정도에 따라 감쇠현상이 다르게 나타나는데, 에너지장벽 분포가 매우 빠르게 변하면 시간의 자연로그함수( $\ln t$ )에 따라 비선형적으로 감쇠하지만 그렇지 않은 경우는 앞의 식에 따라 선형적으로 감쇠하는 것으로 알려져 있다. 비선형적으로 감쇠하는 경우를 핵생성에 의한 자화역전 기구로, 선형적으로 감쇠할 경우는 자벽고착에 의한 것으로 분류하고 있다[17]. 따라서 Fig. 1처럼 연구에 사용된 모든 시료의 자기모멘트가 시간의 자연로그함수에 대해 선형적으로 감소하므로 모든 시료가 자벽고착에 의해 제어되는 자벽운동으로 역전을 일으키는 것으로 판단된다.

한편 역자구 생성과 자벽고착에 의해 제어되는 자벽운동으로 자화가 역전되는 경우, DCD와 IRM의 미분곡선  $\chi_{irr}^{dcd}(H)$ ,  $\chi_{irr}^{irm}(H)$  각각은 역자구 생성과 자벽운동에 대한 에너지장벽 분포를 반영하며, 각각의 최대 비가역자화율의 상대적 위치에 따라 지배적인 자화역전 기구를 설명할 수 있다. Fig. 2는 DCD 및 IRM 곡선으로부터 구한 각 시료별  $\chi_{irr}^{dcd}$  및  $\chi_{irr}^{irm}$ 의 자기장 의존성을 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 모든 시료의 역자구생성 자기장( $H_N$ )이 자벽고착 자기장( $H_{DW}$ )에 비해 보다 낮은 자기장에서 나타나고, 시료의 두께가 증가할수록 역자구생성 자기장에 비해 자벽고착 자기장이 더 큰 영역으로 이동하여 두 자기장 간격이 크게 증가함을 알 수 있다. 이와 같이 자벽고착에 비해 더 낮은 자기장에서 역자구가 생성되므로 모든 시료의 자화역전은 자벽고착에 의해 제어되는 자벽운동이 주된 자화역전 기구임을 알 수 있다.

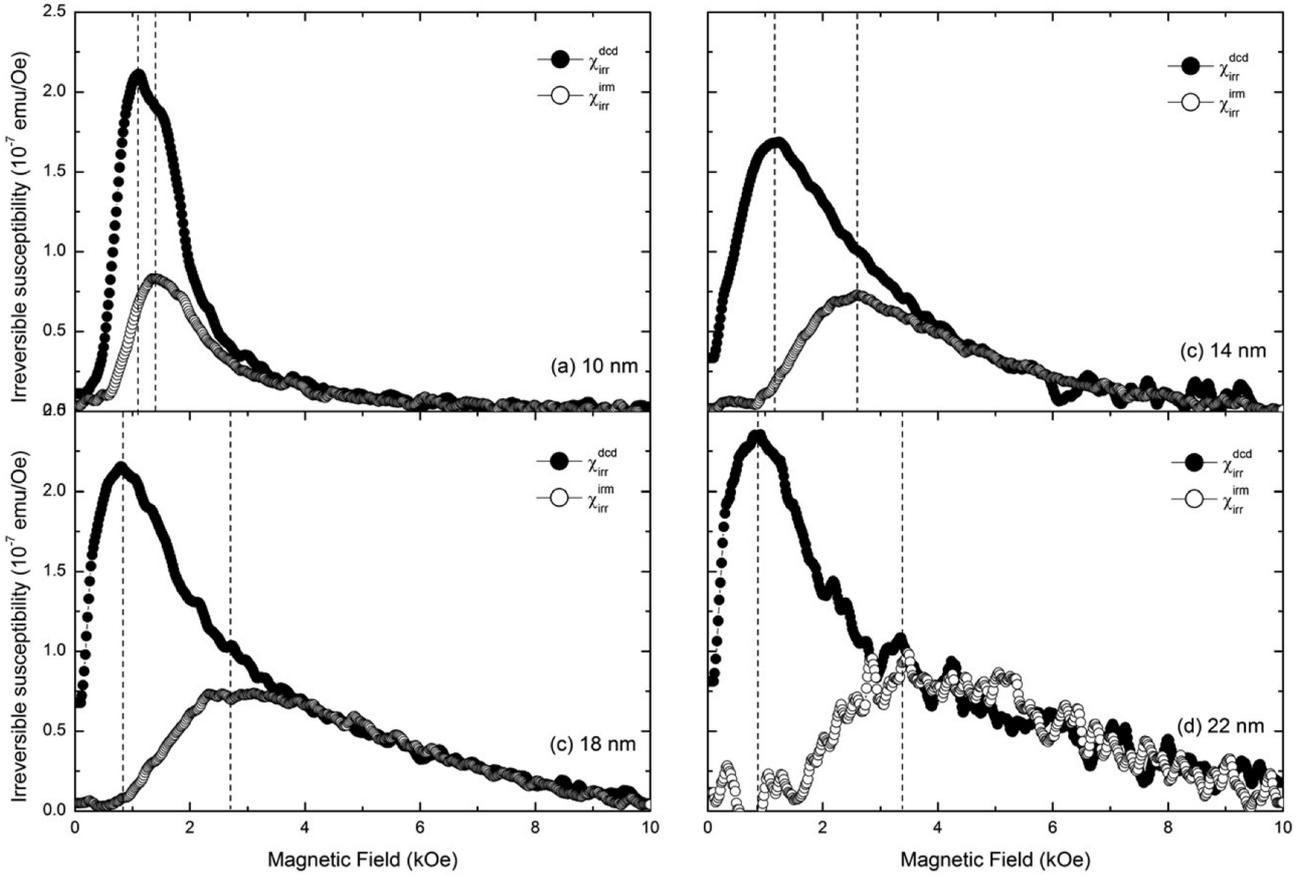


Fig. 2. Irreversible susceptibilities ( $\chi_{irr}^{dcd}$ ,  $\chi_{irr}^{irm}$ ) as a function of applied field for the samples.

서론에서 설명한 것처럼 자기역전 부피  $V^*$ 는 자기모멘트가 집단적으로 함께 역전을 일으키는 최소 단위부피를 뜻하며, 자기기록 매체에서는 물리적인 낱알이 아닌 자기역전 부피가 가장 작은 정보저장 단위인 비트(bit)로 취급되므로 물리적인 부피보다 오히려 자기역전 부피가 기록밀도와 열적 안정성 등을 평가하는 중요한 물리량으로 인식되고 있다. 자기점성계수와 비가역 자기감수율과의 관계식[18]  $H_f = S/\chi_{irr}^{dcd} = k_B T/V^* M_s$  을 이용하여 자기역전 부피  $V^* = (k_B T/M_s)(\chi_{irr}^{dcd}/S)$ 를 구할 수 있는데, 여기서  $H_f$ 는 요동장(fluctuation field),  $M_s$ 는 포화자화,  $k_B$ 는 Boltzmann 상수,  $T$ 는 절대온도 그리고  $S$ 는 자기점성계수다. Fig. 3은 각 시료별 자기모멘트의 시간의존성 측정 결과를 이용하여 구한 두께별 자기점성계수의 인가 자기장 의존성을 나타낸 것으로, 시료별 곡선의 넓이와 피크 값이 다른 것은 시료의 에너지 장벽이 다를 수 있음을 의미한다.

Fig. 4는 시료별 자기역전 부피의 자기장 의존성을 나타낸 것으로 10 nm 시료를 제외한 나머지 시료들의 자기역전 부피는 인가 자기장의 세기에 관계없이 거의 일정하며, 역전 부피의 두께의존성은 뚜렷한 경향성을 보이지 않으나 그 크기는 거의 비슷함을 알 수 있다. 인가 자기장 세기에 따라 역

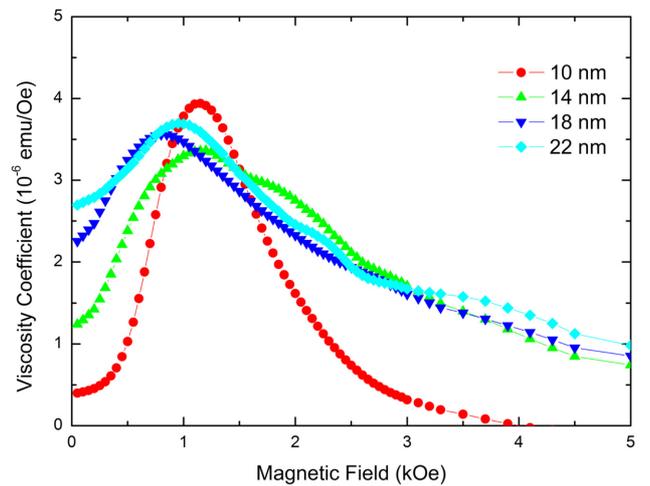


Fig. 3. (Color online) Applied magnetic field dependence of the viscosity coefficient for the samples.

전 부피가 거의 일정한 현상은, Fig. 2에서 알 수 있는 것처럼, 모든 시료의 역자구 생성 자기장이 자벽고착 자기장보다 낮아 자벽이동에 비해 상대적으로 낮은 자기장에서 역자구가

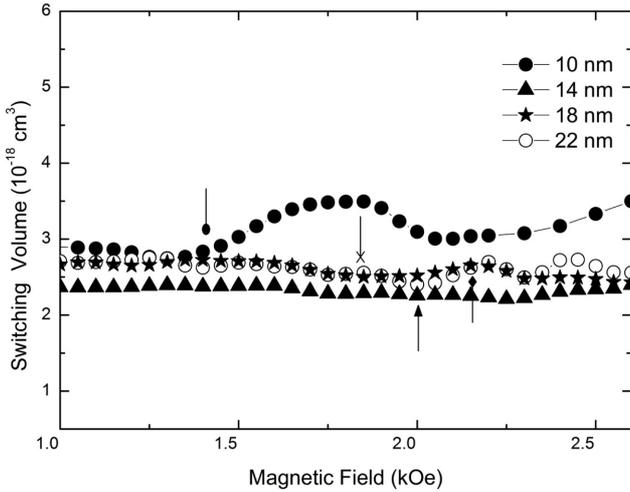


Fig. 4. Magnetic field dependence of switching volumes for the samples.

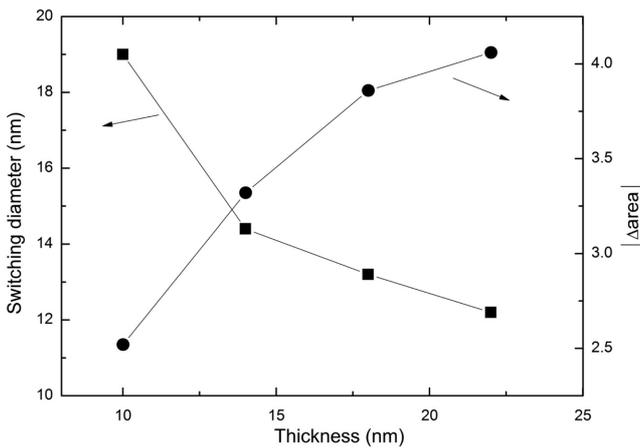


Fig. 5. Thickness dependence of switching diameter and  $|\Delta area|$ .

쉽게 생성되고, 생성된 역자구가 자화역전을 일으키는 자벽고착 자기장 내에서 새로운 역자구가 생성되지만 자구의 크기가 더 이상 증가하지 않기 때문에 판단한다.

각 시료의 보자력 영역에서 구한 자기역전 부피의 모양을 원주형으로 가정하여 역전 부피의 직경( $d_{sw}^*$ )을 구한다음 역전 직경의 두께 의존성을 조사하였다. 여기서 역전 부피의 크기인 역전 직경은  $d_{sw}^* = 2\sqrt{V^*/\pi t}$ 으로 표현되며,  $V^*$ 는 자기역전 부피이고  $t$ 는 자성막의 두께이다. Fig. 5는 두께별 역전 직경의 크기와 상호작용 세기의 척도인  $|\Delta area|$ 를 나타낸 것으로, 시료의 두께가 증가할수록 직경의 크기가 감소함을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 모든 시료가  $H_{DW} > H_N$ 이고 두께가 증가함에 따라  $H_N$ 과  $H_{DW}$  사이의 폭이 크게 증가하므로 낮은 자기장 영역에서 생성된 역자구가 고착점 때문에 확장되지 못하고 독립적으로 역전을 일으키기 때문으로 판단된다. 이와

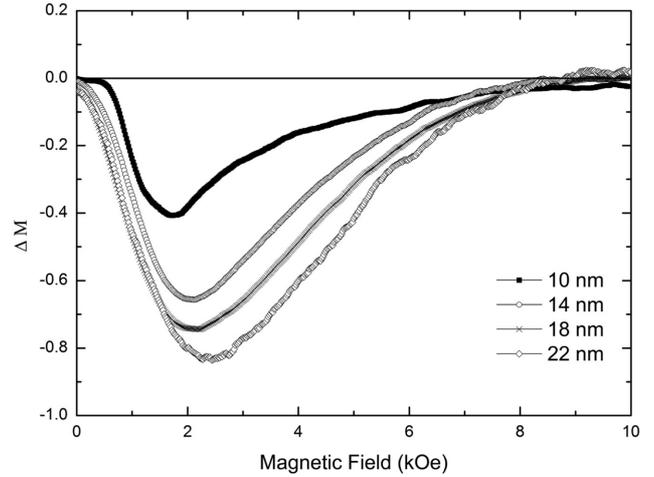


Fig. 6. Variation of the  $\Delta M$  curves as a function of the applied field for the samples [15].

같은 현상은 광자기용 다층박막 Pt/Co, Tb/Fe에 대한 연구결과[6, 19]와 같은 경향을 보였다.

자기상호작용 기구와 세기가 자기역전 부피 또는 역전 직경 크기에 미치는 영향을 알아보기 위해  $\Delta M(H)$  곡선을 분석하여 적용시켜 보았다. 자기상호작용 기구와 정도는 P.E. Kelly 등[20]이 제안한 수정된 Stoner-Wohlfarth 모델에 의해 설명 가능하며, 상호작용 세기의 척도인 면적  $|\Delta area|$ 은  $|\Delta area| = \int_0^{H_a} \Delta M dH$ 으로 정의된다[21]. 이미 발표한 연구결과인 Fig. 6[15]에서 확인할 수 있는 것처럼, 연구에 사용된 모든 시료는 두께에 관계없이 인가 자기장 전체 영역에 걸쳐  $\Delta M < 0$ 이고 두께가 증가할수록  $\Delta M$ 의 극값과  $|\Delta area|$ 이 증가하므로 두꺼운 시료일수록 자화정렬이 이루어지지 않은 상태가 더 안정적인 쌍극자 상호작용이 주된 상호작용 기구임을 알 수 있다. 이와 같이  $\Delta M$  극값과  $|\Delta area|$ 이 증가하는 원인은 시료의 채우기 비율 증가가 주된 요인으로 판단하며, 채우기 비율이 각각 다른  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\alpha\text{-Fe}$  등의 자성입자에 대한 G. Bottoni의 연구결과에서도 같은 경향을 보였다[22]. 따라서 시료의 두께가 두꺼울수록 역전 직경의 크기가 감소하는 원인은, CoPt:C 박막에 관한 M. L. Yan의 연구결과에서 설명한 것처럼[11], 쌍극자 상호작용의 증가로 인한 고립된 자구의 독립적인 역전 그리고  $H_{DW} > H_N$ 이고  $H_{DW}$ 과  $H_N$  사이의 간격이 증가하기 때문으로 판단한다.

#### IV. 결 론

전기도금법으로 제작한 CoPt 자성막의 자화역전 기구 및 자기상호작용이 자기역전 부피에 미치는 영향을 규명한 결과, 자화역전은 자벽고착에 의해 제어되는 자벽운동이 주된 기구

였다. 또한 인가 자기장의 세기에 관계없이 자기역전 부피가 거의 일정하였으나 역전 직경은 시료의 두께가 두꺼울수록 오히려 감소하였다. 이와 같은 현상은 모든 시료의 역자구생성 자기장이 자벽고착 자기장보다 낮기 때문에 생성된 역자구가 자화역전을 일으키는 자벽고착 자기장 내에서는 크기가 더 이상 증가되지 않다가 역전을 일으키는 것으로 판단한다.

한편 시료가 두꺼워짐에 따라  $\Delta M$  극값과  $|\Delta area|$ 이 증가, 즉 쌍극자 상호작용이 크게 증가하는 사실로부터 모든 시료의 자성난알이 고립된 자구 특성을 보여 거의 독립적으로 역전을 일으키는 것으로 판단된다.

### 참고문헌

- [1] S. B. Choe, Y. C. Cho, H. J. Jang, and S. C. Shin, *J. Magn. Magn. Mater.* **240**, 308 (2002).
- [2] S. S. Malhotra, Z. S. Shan, D. C. Stafford, S. H. Liou, and D. J. Sellmyer, *IEEE Trans. Magn.* **32**, 4019 (1996).
- [3] T. Shimatsu, H. Uwazumi, and H. Muraoka, *IEEE Trans. Magn.* **38**, 1973 (2002).
- [4] G. Bottoni, *J. Magn. Magn. Mater.* **196/197**, 602 (1999).
- [5] C. P. Luo, Z. S. Shan, and D. J. Sellmyer, *J. Appl. Phys.* **79**, 4899 (1996).
- [6] K. O'Grady, T. Thomson, and S. J. Greaves, *J. Appl. Phys.* **75**, 6849 (1994).
- [7] A. R. Corradi and E. P. Wohlfarth, *IEEE Trans. Magn.* **14**, 861 (1978).
- [8] O. Henkel, *Phys. Status Solidi.* **7**, 919 (1964).
- [9] P. E. Kelly, K. O'Grady, P. I. Mayo, and R. W. Chantrell, *IEEE Trans. Magn.* **25**, 3881 (1989).
- [10] G. Bottoni, *J. Magn. Magn. Mater.* **110**, 355 (1992).
- [11] M. L. Yan, Y. Liu, S. H. Liou, and D. J. Sellmyer, *IEEE Trans. Magn.* **37**, 1671 (2001).
- [12] S. Franz, M. Bestetti, and P. L. Cavallotti, *J. Magn. Magn. Mater.* **316**, e173 (2007).
- [13] W. M. Liao, S. K. Chen, F. T. Yuan, C. W. Hsu, and H. Y. Lee, *J. Magn. Magn. Mater.* **303**, e243 (2006).
- [14] C. L. Shen, P. C. Kuo, G. P. Lin, Y. S. Lui, S. L. Ou, and S. C. Chen, *Advanced Materials Research* **123/125**, 655 (2010).
- [15] H. S. Kim, J. D. Lee, S. Y. Jeong, C. H. Lee, and S. J. Suh, *J. Kor. Magn. Soc.* **21**, 151 (2011).
- [16] R. Street and J. C. Woolley, *Proc. Phys. Soc. Sect. A* **12**, 562 (1949).
- [17] T. Thomson and K. O'Grady, *J. Appl. Phys.* **30**, 1566 (1997).
- [18] E. P. Wohlfarth, *J. Phys.* **F14**, 155 (1984).
- [19] D. M. Donnet, V. G. Lewis, N. J. Chapman, K. O'Grady, and H. W. van Kesteren, *J. Phys. D* **26**, 1741 (1993).
- [20] P. E. Kelly, K. O'Grady, P. I. Mayo, and R. W. Chantrell, *IEEE Trans. Magn.* **25**, 3881 (1989).
- [21] G. Bottoni, *J. Magn. Magn. Mater.* **110**, 355 (1992).
- [22] G. Bottoni, D. Candolfo, and A. Cecchetti, *J. Appl. Phys.* **81**, 3809 (1997).

## Magnetization Reversal and Magnetic Switching Volume in Electrodeposited CoPt Magnetic Films with Different Thickness

Hyeon Soo Kim and Soon Young Jeong\*

*Department of Physics and Research Institute of Natural Science, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea*

Chang Hyeong Lee and Su Jeong Suh

*School of Advanced Materials Science and Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea*

(Received 28 November 2011, Received in final form 20 December 2011, Accepted 20 December 2011)

The thickness dependence of the magnetic switching volumes in electrodeposited CoPt films was investigated from the magnetization reversal and the magnetic interaction behavior. As the sample thickness is increased, the field difference between the wall pinning field ( $H_{DW}$ ) and the nucleation field ( $H_N$ ) as well as the absolute value of  $\Delta area$  are increased. Therefore, the decrement tendency of the switching diameter with increasing sample thickness can be well explained by the domain wall motion controlled by the domain wall pinning and the strength of dipolar interaction.

**Keywords :** CoPt film, switching volume, switching diameter, domain wall pinning, dipolar interaction