

## 좁은 자벽의 두께에 강자성층의 두께가 미치는 영향

임호택 · 유천열\*

인하대학교 물리학과, 인천광역시 남구 용현동 253

(2005년 12월 6일 받음, 2005년 12월 19일 최종수정본 받음)

Micromagnetics 전산 모사를 이용하여 국소적 층간교환상호작용이 있는 강자성/비자성/강자성 다층박막 구조에서 Bloch 자벽이 나 Néel 자벽보다 더 얇은 두께의 자벽이 인위적으로 형성될 수 있음을 보였고, 이때 생성된 좁은 자벽의 두께가 강자성층의 두께에 의해 영향을 받음을 보였다. 국소적 층간교환상호작용을 가진  $Fe_1/Cr/Fe_2$  구조에서 좁은 자벽이 생성됨을 보였고,  $Fe_2$  층의 두께를 20 nm로 고정시키고  $Fe_1$  층의 두께를 각각 1, 2, 4, 6 nm로 변화시켜가며 전산 모사를 수행하여  $Fe_1$  층의 두께가 감소함에 따라 자벽의 두께가 얇아짐을 확인하였다.

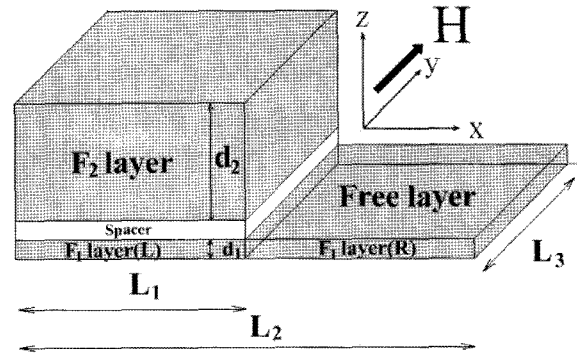
**주제어** : 자벽, 층간교환상호작용, 자기저항

### I. 서 론

자벽에 의해 발생하는 자벽 자기저항 현상은 일반적인 자성체에서 생성되는 자벽의 경우 그 값이 매우 작지만, 자벽의 두께가 수 나노미터 정도로 얇게 되는 경우 매우 큰 값을 가지는 것으로 알려져 있다[1-5]. 따라서 인위적으로 자벽의 두께를 수 나노미터로 만들 수 있다면, 매우 큰 자기저항을 얻을 수 있고, 자기 센서로의 응용 가능성이 있다. 현재까지의 연구에 의하면 두께가 얇은 자벽은 Bruno가[6] 예측한 바 있는 나노 접촉점을 이용해서 제작이 가능한데, 이 경우 제작의 난해함과 재현성 등의 문제점이 지적되고 있다. 최근 Fig. 1과 같은 국소적 층간교환상호작용을 이용하여 좁은 자벽이 인위적으로 생성될 수 있음이 보고된 바 있다[7, 8].

### II. 이 론

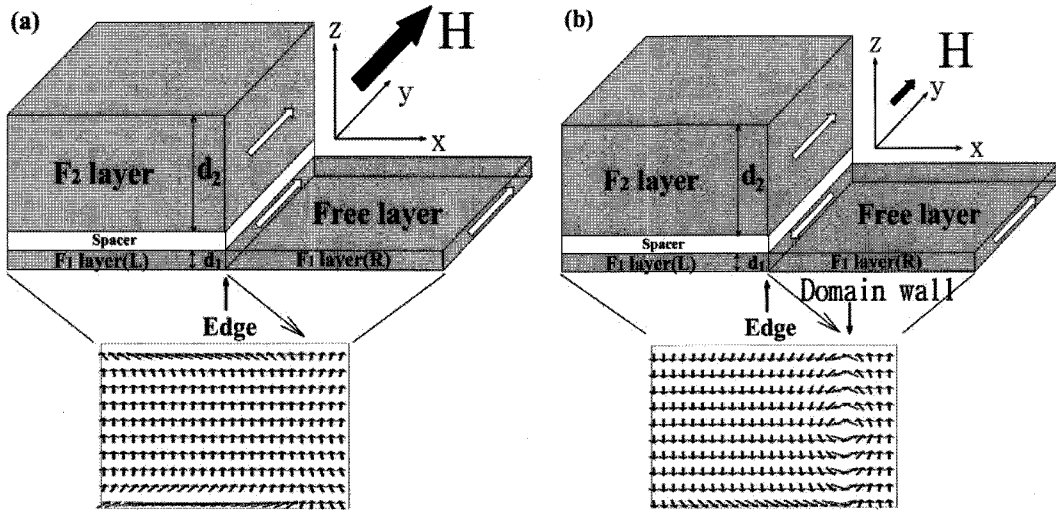
국소적 층간교환상호작용이란 Fig. 1처럼 둘 이상의 자성 박막으로 이루어진 다층 박막구조에서 있어서 하나의 자성층이 박막의 전체 면적 중 국소적으로만 존재하면서 다른 자성층과 강한 반강자성 혹은 강자성 교환상호작용으로 결합된 구조를 의미한다. Fig. 1처럼 3층막 구조를 지닌 부분을  $L$  구역, 단층 구조를 가진 부분을  $R$  구역이라고 하고, 두 자성층이 강한 반강자성 층간교환상호작용을 하고 두 층의 Zeeman 에너지의 차이를 주기 위해서  $d_2 \gg d_1$ 가 되도록 한다[9]. 이때 외부에서 강한 자기장을  $+y$  축 방향으로 인가하면 두 자성층의 자화 방향이 Fig. 2(a)과 같이 외부 자기장 방향과 같은 방향으로 정렬되고 이는 Fig. 3의 자기이력곡선에서  $A$  부



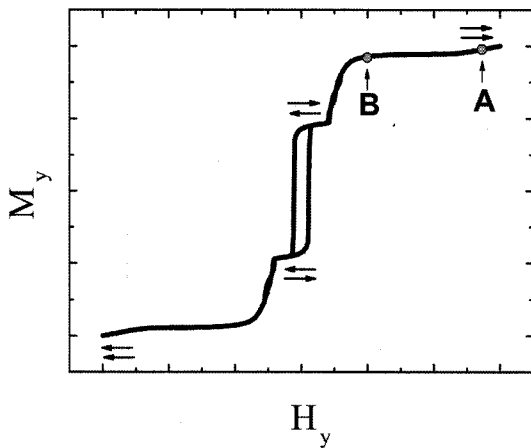
**Fig. 1.** Simulation structure with a local interlayer exchange coupled system. In the  $Fe_1(L)$  layer, the top ferromagnetic layer  $Fe_1(L)$  is strongly coupled with bottom ferromagnetic layer  $Fe_2$  through a nonmagnetic metallic Cr, while there is no top ferromagnetic layer on the right side. The  $L_1, L_2, L_3$  and  $d_1, d_2$  are the width of sample, the lengths and thicknesses of  $Fe_1$  and  $Fe_2$  layers, respectively.  $H$  is an external magnetic field.

분에 해당한다. 자기장을 서서히 감소시키면  $L$  구역의 경우  $d_2 \gg d_1$ 이고 반강자성 층간교환상호작용이 존재하므로  $F_2$  층은 외부 자기장 방향으로 정렬되어 있지만  $F_1(L)$ 의 자화 방향은 외부 자기장의 반대 방향으로 정렬되기 시작한다. 그리고 Fig. 2(b)에서  $R$  구역의 경우 층간교환상호작용이 존재하지 않기 때문에 자화 방향은 외부자기장과 같은 방향을 향하게 된다. 따라서  $R$  구역의 자화 방향은 바뀌지 않지만  $L$  구역에서  $F_1$ 의 자화 방향이 바뀌면서 Fig. 2(b)과 같이  $F_1(R)$ 와  $F_1(L)$ 의 자화 방향이 반대로 된다. 이로 인해  $F_1$  층의  $L$ 과  $R$  부분의 경계면 부분에 자벽이 생성되기 시작한다. Zeeman 에너지와 층간 교환상호작용 에너지가 서로 경쟁을 하면서 Fig. 2(b)과 같이 자벽의 두께가 일반 자벽에 비해서 얇아지게 되며 이는 Fig. 3의 자기이력곡선에서  $B$  부분에 해

\*Tel: (032) 860-7667, E-mail: cyyou@inha.ac.kr



**Fig. 2.** The local interlayer exchange coupled system is applied by a external magnetic field. Rectangle boxes indicate the magnetization at in-plane cut of  $Fe_1$  layer. (a) When a high external magnetic field is high, the domain wall is not formed around the edge between the  $F_1(L)$  and  $F_1(R)$ . (b) When a high external magnetic field is high, the domain wall is formed around the edge between the  $F_1(L)$  and  $F_1(R)$  for certain magnetic field ranges.



**Fig. 3.** Hysteresis loop of the local interlayer exchange coupled system. *A* is a point which indicates Fig. 2(a). *B* is a point which corresponds to Fig. 2(b).

당한다. 이와 같이 국소적 층간 교환상호작용 결합된 구조에서 인위적으로 자벽을 생성 될 수 있으며 이 때 자벽의 두께는 *L* 구역의 경우 층간교환상호작용에 의해서 줄어들고, *R* 구역의 경우 Zeeman 에너지에 의해서 줄어들게 되어 결과적으로 좁은 자벽을 얻을 수 있게 된다[7, 8]. 본 연구에서는 생성된 자벽의 두께에 미치는  $F_1$  층의 두께에 의한 영향을

연구하기 위해서  $F_2$  층의 두께를 고정시키고  $F_1$  층의 두께를 각각 1, 2, 4, 6 nm로 변화시켜 생성되는 얇은 자벽의 두께를 micromagnetics 전산 모사를 통하여 연구하였다.

### III. 계산 방법

$F_1$  층의 두께가 자벽의 두께에 미치는 영향을 연구하기 위해 Fig. 1와 같이  $Fe_1/Cr/Fe_2$ 의 3층 박막을 고려하였다. Fig. 1와 같이  $Fe_1(L)$  부분은  $Fe_2$  층과 층간교환상호작용을 하고  $Fe_1(R)$  부분은 freelaye가 되도록 하였다. 다층 박막으로 설계된 물질의 물리량인 Fe와 Cr에 대한 문헌 값을[10, 11] 이용하여 Table 1과 같이 설정하였고, 모든 층의 cell은 3차원 cell로 같으며 크기는 각각  $1 \times 1000 \times 2 \text{ nm}^3$  설정하였다. 이때 *x* 방향의 cell 크기는 자화 방향의 변화를 관측하기 위해서 1 nm로 선택하였고, *z* 방향의 cell 크기는 두께 변화를 연구하기 위해서 2 nm(혹은 1 nm) 로 선택하였다. 반면, *y* 방향의 cell의 크기는 계산상의 문제로 최대한 크게 잡아서 2차원적으로 문제를 계산하였다.  $Fe_2$  층의 두께를 20 nm로 고정시키고  $Fe_1$  층의 두께를 각각 1, 2, 4, 6 nm로 변화시키면서 4 가지 시스템에 대하여 연구하였다. Micromagnetics 전산모사는 OOMMF(object oriented micromagnetic framework)를

**Table 1.** Parameters used in 3-dimensional micromagnetic simulations.  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  and are the unit cell sizes.  $L_1, L_2, L_3$  and  $d_1, d_2$  are width of samples, the lengths and thicknesses of  $Fe_1$  and  $Fe_2$ .  $A_1, J, K_{ul}$  are exchange stiffness of Fe, and interlayer exchange coupling energy, and anisotropy energy, respectively.

$\Delta x$ (nm)	$\Delta y$ (nm)	$\Delta z$ (nm)	$d_1$ (nm)	$d_2$ (nm)	$L_1$ (nm)	$L_2$ (nm)	$L_3$ (nm)	$A_1$ (J/m)	$J$ (J/m <sup>2</sup> )	$K_{ul}$ (J/m <sup>3</sup> )
1	1000	1( $d_1=1$ ), 2	1, 2, 4, 6	20	50	200	3000	$2.1 \times 10^{-11}$	$-1.0 \times 10^{-3}$	$4.8 \times 10^4$

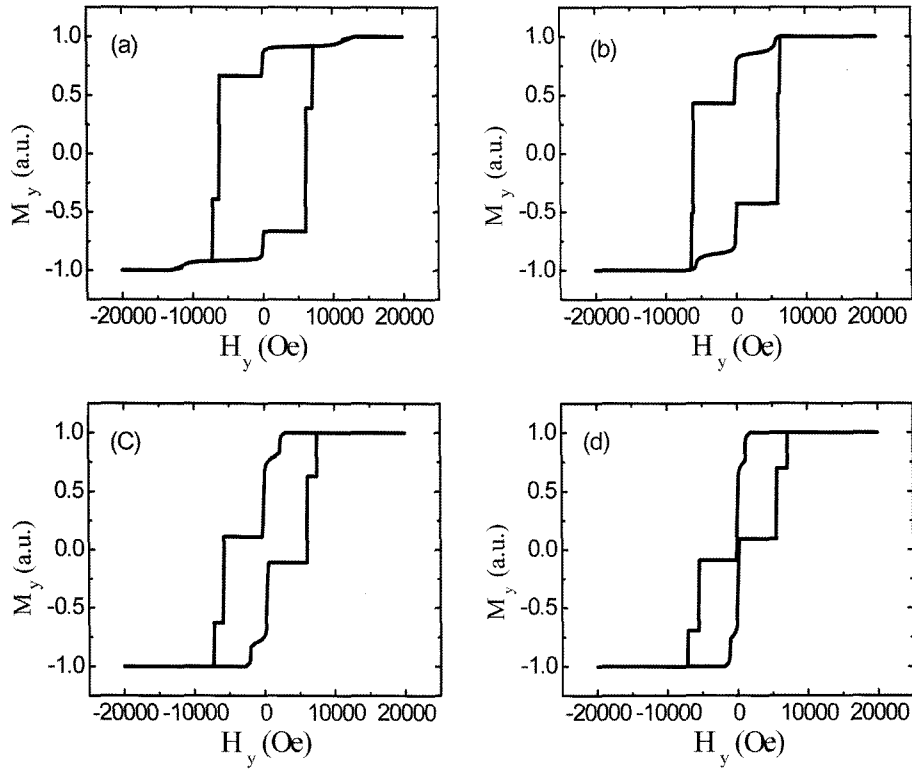


Fig. 4. The variation of hysteresis loop along the thickness of Fe<sub>1</sub>. (a)  $d_1=1$  nm, (b)  $d_1=2$  nm. (c)  $d_1=4$  nm. (d)  $d_1=6$  nm.

이용하여 전산 모사를 수행하였다[12]. 최초 모든 자성체의 자화 방향은 자화 용이축( $y$ 축) 방향으로 놓여 있으며, 외부 자기장은 자화 용이축( $y$ 축) 방향으로 2 T에서 -2 T까지 0.01 T 간격으로 순차적으로 줄여가면서 증가하였다.

#### IV. 계산 결과 및 고찰

Fig. 4는 Fe<sub>1</sub>/Cr/Fe<sub>2</sub> 구조에서 Fe<sub>1</sub> 층의 두께가 점점 증가하면서 전형적인 층간교환상호작용을 하는 시스템에 나타나는 자기이력곡선과 비슷해지는 것을 알 수 있다. 이것은 Fe<sub>1</sub> 층과 Fe<sub>2</sub> 층의 두께의 차가 줄어들어 Fig. 4와 같은 자기이력곡선이 나타난 것이라 생각한다. 이때 각각의 자기이력 곡선에서 나타나는 여러 개의 kink 들은 Fe<sub>1</sub> 층의  $L$ 과  $R$  구역, Fe<sub>2</sub> 층의 자화역전이 각기 다른 외부자기장에 대해서 나타남을 보여주는데, 이런 kink 들은 층간교환상호작용을 하는 강자성층의 두께가 다른 준강자성체의 자기이력곡선에서 나타나는 전형적인 모습이다[13].

Fig. 5은 Fe<sub>1</sub> 층의 두께가 (a)는  $d_1=6$  nm, (b)는  $d_1=4$  nm, (c)는  $d_1=2$  nm, (d)는  $d_1=1$  nm 일때 Fe<sub>1</sub> 층의 자화 방향  $\theta$  를 자벽의 두께가 최소가 되는 외부 자기장 2000 Oe에서  $x$  축의 함수로 표현한 것이다. Fe<sub>1</sub> 층의 두께가 감소하면서 자벽의 두께가 감소함을 알 수 있었고, 표시된 Néel 자벽보다

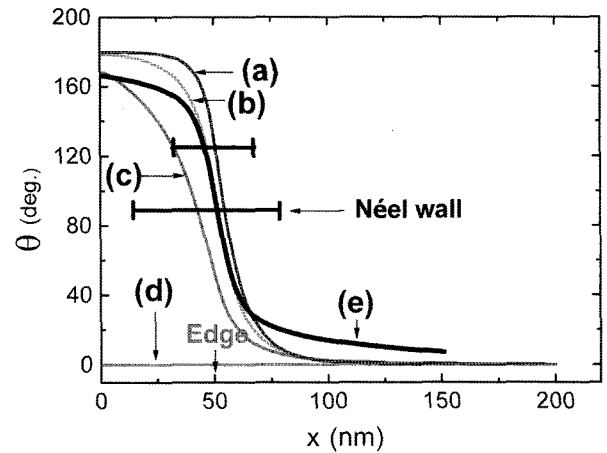


Fig. 5. The variation of the magnetization direction along the thickness of Fe<sub>1</sub> at 2000 Oe. The  $x$ -axis means the position of the structure,  $x=0$  nm means the left end of the sample and the edge is placed at  $x=50$  nm. (a)  $d_1=1$  nm, (b)  $d_1=2$  nm. (c)  $d_1=4$  nm. (d)  $d_1=6$  nm, (e) Néel wall.

두께가 훨씬 얇은 자벽이 생성되었음을 확인할 수 있다. 이때 Fe<sub>1</sub> 층의 두께가 감소하면서 자벽의 두께가 얇아지는 것은 층간교환상호작용 에너지가 표면 에너지 항이기 때문에 얇은 두께의 Fe<sub>1</sub> 층에 대해서는 더 큰 효과를 주는 것으로 이해된다. 따라서 자벽의 두께를 더 줄이기 위해서는 Fe<sub>1</sub> 층의

두께를 얇게 하고, 더 강한 층간교환상호작용을 가지도록 설계하는 것이 중요하다고 생각된다. 이 계산에서 사용한  $J = -10 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$ 의 값은 Fe/Cr/Fe 구조에서 보고 된 바 있는 실험값인데[14], 더 큰 층간교환상호작용을 보이는 것으로 알려진 Ru[15]을 중간층으로 사용하여 계산하면 좀 더 얇은 자벽의 두께를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

### V. 결 론

Fe<sub>1</sub>/Cr/Fe<sub>2</sub> 구조에서 국소적 층간교환상호작용으로 좁은 자벽이 생성됨을 확인하였고, Fe<sub>2</sub> 층의 두께를 고정시키고 Fe<sub>1</sub> 층의 두께를 감소시키면 더 얇은 자벽을 생성시킬 수 있었다. 이와 같은 구조는 현재 활발히 연구되고 있는 자벽을 이용한 소자들[16]에 활용이 가능할 것으로 기대되는 바이다.

### 감사의 글

이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단 신진교수과제의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2004-003-C00068).

### 참고문헌

[1] N. Garcia, M. Munoz, and Y.-W. Zhao, Phys. Lett. **82**,

2923(1999).  
 [2] G. Tatara, Y.-W. Zhao, M. Munoz, and N. Garcia, Phys. Rev. Lett. **83**, 2030(1999).  
 [3] G. Tarara, Int. J. of Mod. Phys. **15**, 321(2001).  
 [4] J. Mathon, unpublished. (<http://www.city.ac.uk/mathematics/NonoStructures/domain.html>).  
 [5] J. B. A. N. van Hoof, K. M. Schep, A. Brataas, G. E. W. Bauer, and P. J. Kelly, Phys. Rev. B **59**, 138(1999).  
 [6] P. Bruno, Phys. Rev. Lett. **83**, 2425(1999).  
 [7] C.-Y. You, J. Kor. Phys. Soc. **15**, 1(2005).  
 [8] C.-Y. You, J. Kor. Mag. Soc. **47**, 539(2005).  
 [9] C.-Y. You and S. D. Bader, J. Appl. Phys. **92**, 3886(2002).  
 [10] S. Chikazumi, "Physics of Ferromagnetism" 2nd Ed. Clarendon PressOxford(1977).  
 [11] B. D. Cullity, "Introduction to magnetic materials", Addison-Wesley Publishing Company(1972).  
 [12] M. J. Donahue and D. G. Porter, <http://math.nist.gov/oommf>.  
 [13] P. Vavassori, M. Grimsditch, and Eric E. Fullerton, J. Magn. Magn. Mater. **223**, 284(2001).  
 [14] E. E. Fullerton, J. S. Jiang, M. Grimsditch, C. H. Sowers, and S. D. Bader, Phys. Rev. B **58**, 12193(1998).  
 [15] L. Zhou, Z. Zhang, P. E. Wigen, and K. Ounadjela, J. Appl. Phys. **76**, 7078(1994).  
 [16] S. S. P. Parkin, U. S. Patent No. 984055(2005).

## Effect of a Ferromagnetic Layer Thickness on a Narrow Domain Wall Width

Ho-Tack Lim and Chun-Yeol You\*

Department of Physics, Inha University, Incheon 402-751, Korea

(Received 6 December 2005, in final form 19 December 2005)

Effect of a ferromagnetic layer thickness on a narrow domain wall width is investigated. It is found that the narrow domain wall is formed in ferromagnetic/nonmagnetic/ferromagnetic multilayer structure with a local interlayer exchange coupling, and that the width of the narrow domain wall is affected by the ferromagnetic layer thickness. We performed micromagnetics simulations for the Fe<sub>1</sub>/Cr/Fe<sub>2</sub> system with the local interlayer exchange coupling, with fixed thickness (20-nm) of Fe<sub>2</sub> layer and various Fe<sub>1</sub> layer thickness (1, 2, 4, and 6 nm). Consequently, we confirmed that the thinner the Fe<sub>1</sub> layer thickness, the thinner the width of the domain wall is formed, because of the surface energy nature of the interlayer exchange coupling.

**Key words** : domain wall, interlayer exchange coupling, magnetoresistance