

## 패턴된 이중박막의 자구벽 특성조사

황도근\* · 이상석

상지대학교 컴퓨터전자물리학과  
원주시 우산동 660번지, 220-702

(2003년 7월 8일 받음, 2003년 8월 20일 최종수정본 받음)

금속마스크에 의해 패턴된 교환결합 이중박막 NiO(10~60 nm)/NiFe(10 nm)의 모서리에서 발생한 여러 종류의 자구벽(magnetic domain wall)을 MFM(magnetic force microscopy)로 측정하였다. 박막의 모서리 경계선이 교환결합이방성 방향과 같은 방향일 때는 직선모양의 Neel 자구벽이 측정되었으며, 경계면이 이방성방향과 수직인 경우에는 zigzag Bloch 자구벽이 발견되었다. 이러한 자구벽은 NiO(60 nm)인 경우에는 교환결합세기( $H_{ex} = 75$  Oe)가 박막경계면에서 발생한 반자장(demagnetization field)세기보다 크기 때문에 발생하지 않았고, 교환결합세기가 약한 NiO(30 nm,  $H_{ex} = 21$  Oe)를 갖는 이중박막에서는 발견되었다. 이들 자구벽이 외부 자기장의 변화에 따라 움직이는 자화반전과정을 측정하기위해  $\pm 300$  Oe까지 자기장을 가하면서 MFM을 측정하였다.

주제어 : 교환결합이중박막, NiO, MFM, Neel wall, Bloch wall

### I. 서 론

최근에 강자성체와 반강자성체에 의해 교환결합된 이중박막에서 자구벽(magnetic domain wall)의 이동에 의한 자화반전과 자구의 모양을 직접 측정해보려는 시도가 여러 연구자에 의해 시도되고 있다[1-7]. 자성박막에서 자구의 일반적인 측정기술은 광학적인 방법과 자기자력현미경(magnetic force microscopy, MFM)방법으로 구별할 수 있다. Nikitenko 등은 FeMn/wedged-NiFe 이중박막에서 자구벽의 운동을 조사하였다[1]. 측정결과, 자구벽은 지그재그(zigzag) 형태를 보였으며, 교환결합 이방성방향과 외부자기장이 같은 방향으로 가할 때와 반대방향으로 가할 때 자구벽의 운동이 다른 형태로 변화하는 것을 알 수 있었다.이런 비대칭 자화반전은 반강자성체에 의해 강하게 일축 이방성을 가진 교환결합된 이중박막에서만 나타난다. Chopra 등은 NiO/Co 이중박막에서 자화반전을 연구하였는데 NiO 경우에는 표면의 거칠기가 크고 NiO 박막이 성장할 때 수십 nm의 결정입도를 가지고 주상성장을 하므로 자구의 크기가 매우 작고 복잡하며, 외부자기장의 방향이 반전되면서 비대칭 자화반전을 보이고 있다[3]. Cartier 등은 같은 NiO/Co 이중박막을 MFM을 이용하여 측정하였는데 역시 자구의 모양이 작고 복잡하였으며, Co의 두께에 따라 자구의 크기가 증가함을 알 수 있었다[5]. 이는 NiO에 교환결합된 강자성 Co 박막이 얇을 때 NiO박막의 Grain 크기가 수십 nm인 결정상태에 영향을 받아 자구가 미세화 되지만, Co 박막의 두께가 증가하면서 강자성내부의 원자상호간의 교환결합에너지 증가로 자구의 크기를 증가함으로써 자구벽 발

생에 따른 에너지를 최소화 하려는 것이다[5]. 이외에도 미세 패턴된 이중박막에서 자구벽의 구조를 연구하였는데 수 마이크로미터로 패턴된 박막구조에서 자구벽은 반강자성박막의 특성보다는 시편의 모양에 큰 영향을 받으므로 근본적인 이중박막의 특성을 논의하기는 어려움이 있었다[4, 6, 7]

본 연구에서는 1 mm 폭으로 패턴된 NiO/NiFe 이중박막에서 자구벽의 구조를 조사하였다. 특히 NiO 박막의 두께에 따라 교환결합 자기장( $H_{ex}$ )의 크기가 다름으로 해서 다양하게 발생하는 자구벽의 특징을 설명한다. 또한 외부 자기장을 변화하면서 각 자구벽의 운동을 조사하여 비대칭 자화반전을 확인해보려 한다.

### II. 실험방법

본 실험은 3-inch NiO 타겟을 rf-magnetron sputtering 방법으로 Corning glass(7059) 기판위에 0.2~0.4 Å/sec의 증착율로 NiO(10, 30, 60nm) 박막을 형성한 후, 그 위에 3-gun dc-magnetron sputtering 방법으로 NiFe(10nm)을 1~2 Å/sec의 증착율로 증착하여 이중박막을 제작하였다. 모든 박막은 in-situ 상태에서 제조되었으며 기본 진공도는  $2.0 \times 10^{-7}$  Torr이고, 증착시의 Ar 부분압력은  $5.0 \times 10^{-4}$  Torr이었다. 기판 온도는 실온이며 타겟과 기판사이의 거리는 80 mm에서 증착하였다. 박막의 독립된 증착층 형성을 위해 각각 분리막과 개구를 제작하여 증착하는 동안 각 타겟의 플라즈마 혼합을 차단하였으며, 증착율을 고정하고 각 타겟에서 증착되는 시간을 스테핑 모터와 타이머, 마이크로 스위치를 이용하여 조절하였다.

박막의 패턴은 금속그림자 마스크에 의해 제작하였으며, H

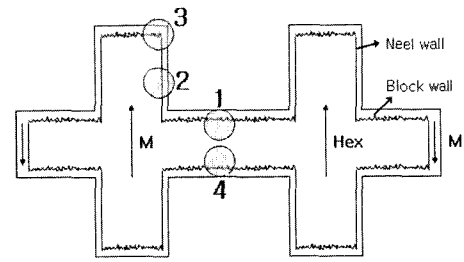
\*Tel: (033)730-0413, E-mail: dghwang@mail.sangji.ac.kr

모양의 패턴폭은 1 mm이고 전류단자 사이간격은 10 mm이다. 또한 교환결합 이중박막의 자기이방성을 패턴모양의 폭 방향으로 형성시키기 위해 증착시 페라이트 영구자석을 기판에 평행하게 배치하여 300 Oe 정도의 자기장( $H_a$ )을 인가하였다. 이중박막의 교환결합자기장세기( $H_{ex}$ )는 이방성 자기장 과 외부 자기장의 방향이 평행이고 4.단자의 전류 방향이 외부 자기장의 방향에 수직이 되게하여 측정된 자기저항곡선으로부터 측정하였다. 또한 자구벽은 Digital Instrument 사의 DI-IIIa MFM을 이용하여 100  $\mu\text{m}$  크기로 측정하였다. 외부자기장의 변화에 따라 자구벽의 이동을 측정하기 위해 MFM 측정 밑 면대에 300 Oe까지 인가할 수 있는 Electromagnet자석을 설치하였다.

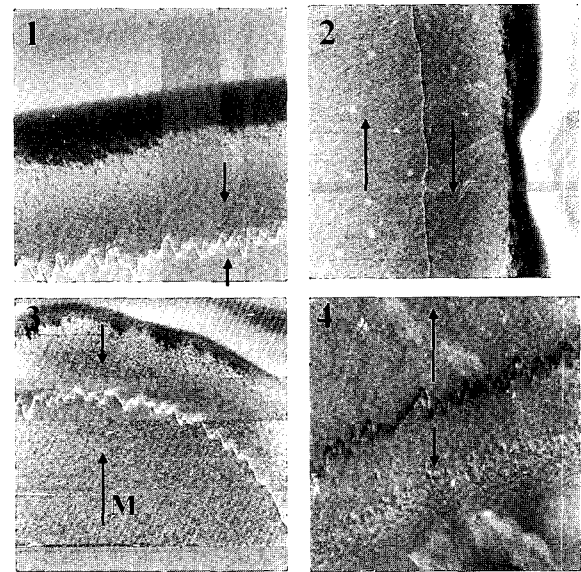
### III. 실험결과 및 토의

그림 1(a)은 이중박막의 패턴모양을 보여주고 있다. 폭 방향으로 교환결합이방성( $H_{ex}$ )을 가하기 위해 그림 1(a)의 위쪽방향으로 자기장을 가하면서 증착하였다. 자구벽의 변화를 조사하기 위해 외부자기장( $H_a$ )은 상하로 변화하였다(그림 1(a)에서는 자화방향 M으로 표시하였음). 그림 1(b)은 NiO(30 nm)/NiFe(10 nm) 이중박막에서 자구벽의 구조를 1, 2, 3, 4 영역에서 MFM으로 측정된 결과를 보여준다. 1과 4 영역은 패턴의 폭 방향으로 교환이방성방향과 모서리에서의 자화방향이 서로 마주 보면서 만들어낸 지그재그 180도 Bloch 자구벽을 보여주고 있다. 이 지그재그 자구벽은 FeMn/NiFe에서 Nikitenko에 의해 관찰된 크기보다 매우 작은 자구벽으로 이는 NiO박막의 grain 크기가 작기 때문으로 사료된다. 또한 1번과 4번 지역에서 자구벽의 명암이 흰색과 검은색으로 보여주고 있다. 이는 자화방향이 서로 마주보고 있는 head-on-head Bloch 자구벽과 서로 등 돌리고 있는 tail-to-tail Bloch 자구벽으로 생각할 수 있는데 이는 그림 2에서 다시 설명하겠다. 2지역은 선명한 직선모양의 Neel 자구벽을 보여주고 있다. 이 Neel 자구벽은 3지역인 시편의 모서리에서 휘면서 다시 지그재그 자구벽으로 변화한다. 결과적으로 NiO(30 nm)/NiFe(10 nm) 패턴된 시편의 모서리에 발생한 자구벽은 그림 1(a)처럼 Neel과 Bloch 자구벽으로 연결된 자구구조를 가짐을 알 수 있다.

Neel과 Bloch 자구벽의 특성을 확인하기 위하여 MFM에 의해 측정된 자구벽의 크기와 세기를 조사하였다. 그림 2에서 Neel 자구벽은 크기가 755 nm로 MFM의 tip의 휘는 방향이 아래로 움직이다 위로 밀려나는 것을 알 수 있다. 이는 Neel 자구벽의 특징이 그림 3(a)에서처럼 박막 평면을 따라 180도 회전하기 때문에 MFM의 색대조가 흰색과 검은색이 같이 보이게 된다. Bloch 자구벽은 그림 2에서처럼 head-on-



(a) 패턴된 시편의 자구구조



(a) 각 모서리에서 MFM으로 측정된 자구벽

그림 1. (a) 패턴된 NiO(30 nm)/NiFe(10 nm) 이중박막에서 MFM이 측정된 위치와 자구벽의 모양을 보여준다. (b) 1, 2, 3, 4 지역에서 측정된 자구벽들을 보여준다. 여기서 MFM scan size는 100  $\mu\text{m}$ 이다.

head와 tail-to-tail형태로 분리된다. 자화방향이 서로 마주보는 head-on-head Bloch 자구벽은 박막의 윗면을 향해 스핀의 방향이 되어 있어 MFM tip이 밀려나면서 흰색명암을 갖는다. 또한 자구벽의 크기는 Neel 자구벽보다 3배 이상 큰 2.578  $\mu\text{m}$ 이다. 이는 자기모멘트방향이 표면을 향함으로서 표면 극성의 밀도증가로 자기에너지 증가한다. 이를 감소시키기 위해 자구벽을 크게, 즉 원자사이의 비틀림 각도를 최소한으로 감소하기위해 자구벽을 형성하는 원자들의 수를 증가시키게 된다. 또한 tail-to-tail 자구벽 역시 크기가 약 2.25  $\mu\text{m}$ 로 head-on-head와 거의 비슷하다. 이 역시 극성의 방향만 다르기 때문에 거의 같은 크기의 결과를 보여준다.

그림 4는 지그재그 자구벽이 외부자기장의 변화에 따라 자구벽의 운동을 보여준다. 그림 4(a)는 제로 자기장에서 일축 이방성의 방향( $H_{ex}$ )과 자구의 자화방향(M)을 보여주고 있다. 외부자기장( $H_a$ )이 Hex방향에 반대로 증가함에 따라 안쪽의

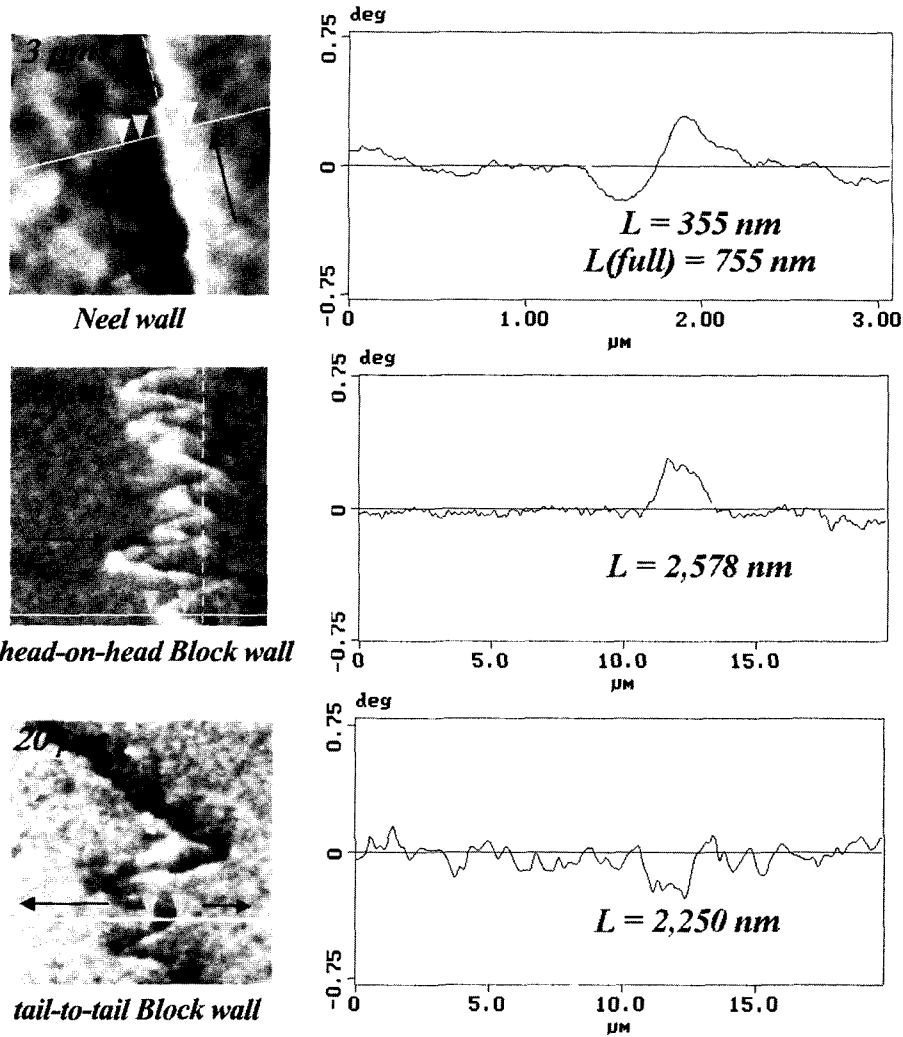


그림 2. NiO(30 nm)/NiFe(10 nm) 이중박막에서 각모서리에 발생한 Neel과 Bloch 자구벽의 크기를 MFM data로부터 측정하였다.

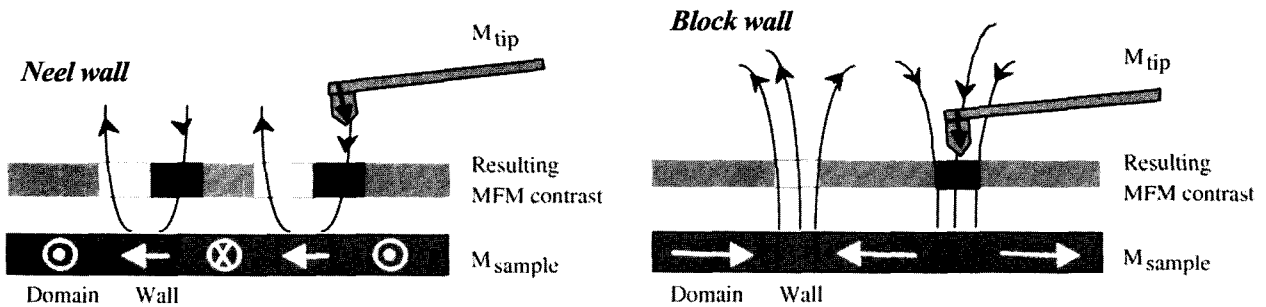


그림 3. MFM image와 자구벽사이 상관관계.

자화는 반전되어 나간다.  $H_a = 60$  Oe에서 시료 안쪽의 자화방향이 모두 역전이 되었지만 그림 4(c)의 MFM 사진의 오른쪽에 360도 자구벽이 3개 발생한 것을 알 수 있다. 360도 자구벽은 NiO/NiFe 박막에서 교환결합계면의 결함이 있는 부분에서 자구벽이 이동할 때 발생하는 것으로 발표되었다. Fujiwara는 이를 상세히 관찰하여 발표했다[8]. 또한 이 360

도 자구는 높은 자기장에서도 사라지지 않은 안정된 모습을 보여준다. 본 시료에서도 약 100 Oe까지 360도 자구가 남아 있는 것을 확인하였다. 그림 4(d)는  $H_a = +200$  Oe까지 가한 후 다시 자기장을 반대방향으로 측정된 자구구조이다. 그림에서 볼 수 있듯이 안쪽에서 모서리 부분으로 자구벽이 이동하려는 것을 알 수 있다. 특히 MFM 측정시 외부자기장의 회

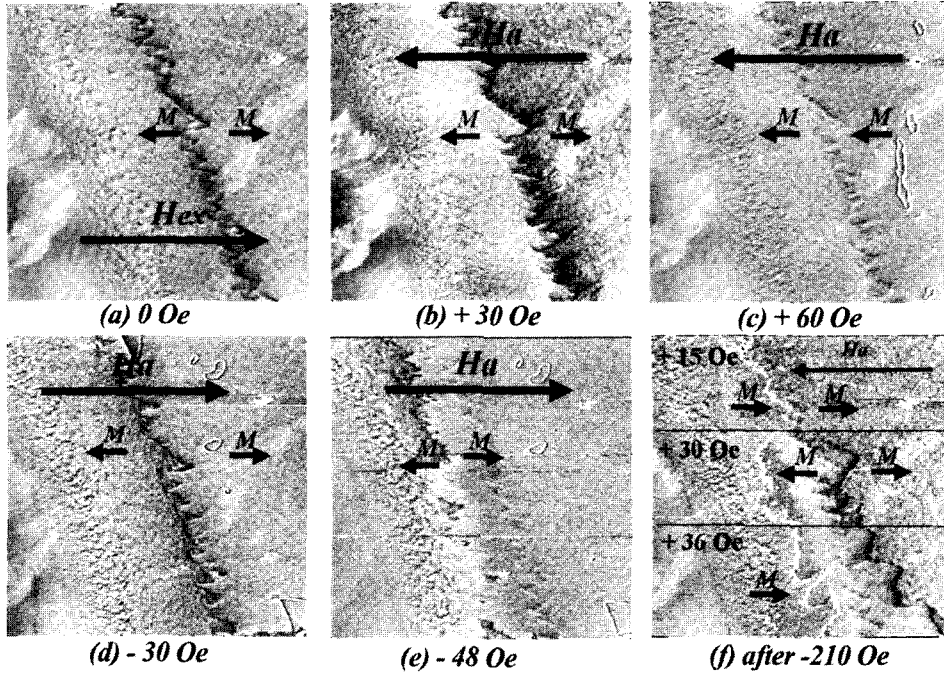


그림 4. zigzag Bloch 자구벽의 자화반전과정.

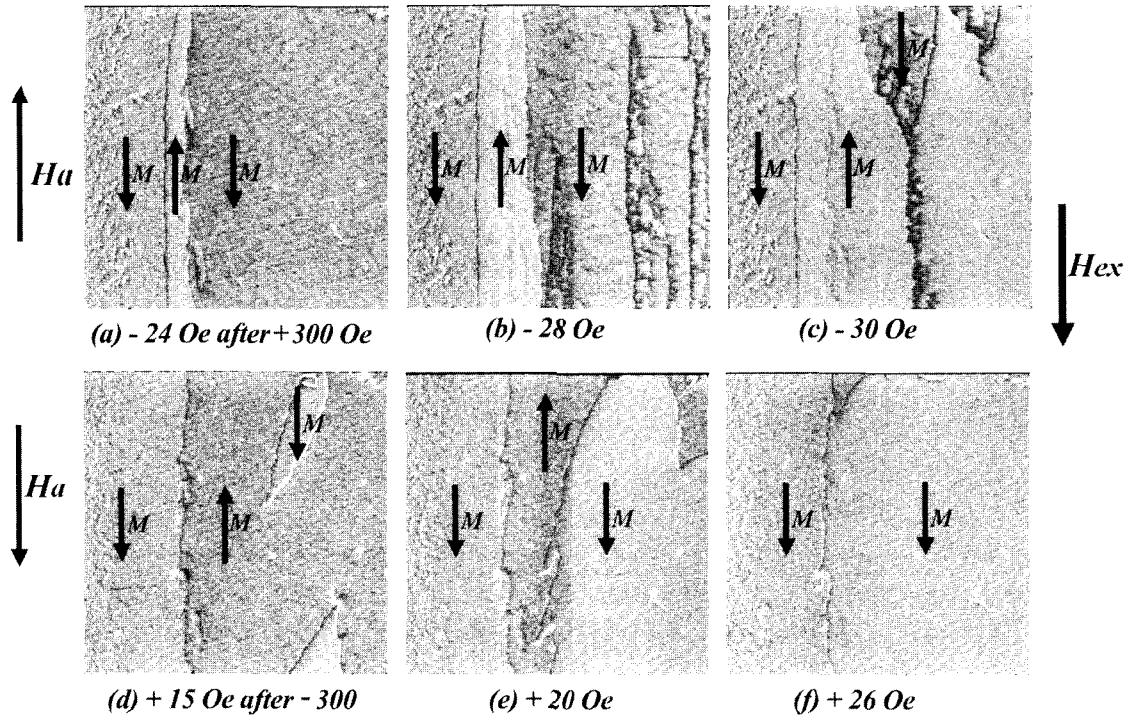


그림 5. Neel 자구벽의 자화반전과정.

수가 변화할 때 마다 360도 자구모양이 변화하며 특히 발생하는 지역이 마구잡이로 발생하는 것을 관찰하였다. 본 실험에서 5번의 반복 측정시 같은 곳에 360도 자구가 발생한 것을 볼 수 없었다. 자기장( $H_a = -48$  Oe)을 좀더 가함에 따라 모서리 부분의 자구가 거의 사라져 감을 알 수 있다. 그림

4(f)는  $H_a = -210$  Oe 까지 가해 포화 자화시킨 후 자기장방향이 반대로 가해졌을때  $H_a = +15, +30, +36$  Oe에서 연속적인 MFM을 측정하였다. NiFe의 자구벽이동은 매우 민감하게 외부자기장에 따라 움직이므로 측정시 세심한 실험이 요구된다. 그림 4(f)는 지그재그 자구벽에서 반대방향의 자화를 가진 자

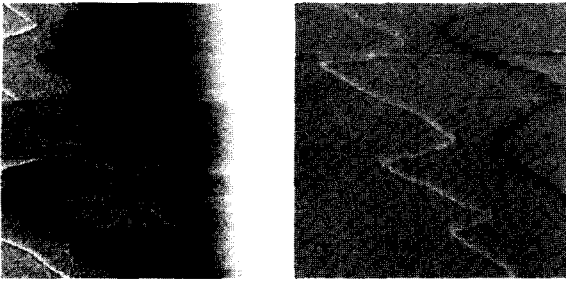


그림 6. NiO(10 nm)/NiFe(10 nm) 이중박막의 모서리에서 자구벽의 모양.

구가 발생하여 전파되는 것을 알 수 있다. 결과적으로 시편의 모서리에서 발생한 지그재그 자구벽은 자화반전시 반대방향의 자구가 성장하는 씨앗(seed) 역할을 하는 것을 알 수 있다.

그림 5는 Neel 자구벽이 존재하는 모서리에서 외부자기장의 변화에 따른 자화반전 과정을 보여주고 있다. 그림 5(a)는  $H_a = +300$  Oe에서 포화 자화된 후 자기장을  $-24$  Oe 까지 감소시켰을 때 Neel 자구벽에서 반대방향의 자구가 발생하고 있는 것을 확인 할 수 있다. 이 현상은 앞의 지그재그 자구벽에서 반대방향 자구가 발생한 것과 같은 결과를 보여준다. 외부자기장이 약간씩 증가함에 따라( $H_a = -28$  Oe) 자구벽이 옆으로 이동하기보다 다른 부분에서 발생한 자구벽과 합해지는 것을 알 수 있다. 즉  $H_a = -30$  Oe에서 거대해진 반대방향의 자구가 합해지는 모습을 관찰할 수 있다. 반대의 자화반전 경우, 즉 그림 5(d)는  $H_a = -300$  Oe에서 포화 자화시킨 후  $H_a = +15$  Oe로 감소했을 때 Neel 자구벽에서 반대방향의 자구가 발생하지 않고 시편 안쪽의 여러 지역에서 반대 자구가 발생한 것을 알 수 있다. 이렇게 발생한 자구들은 서로 합해지면서 모서리의 자구와 최종적으로 합해져 포화 자화됨을 알 수 있다. 여기서 중요한 사실은 반강자성체와 교환결합된 강자성박막은 일축이방성의 특성으로 자화방향에 비대칭적인 자화반전 현상을 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 Nikitenko의 실험 결과에서도 관찰되었다[1].

여기서 한 가지 고려해야 할 것은 NiO(60 nm)/NiFe(10 nm) 시료의 MFM 측정결과 앞에서 보여준 Neel과 Bloch 자구벽을 모서리에서 볼 수 없었다는 것이다. 이는 NiO(60 nm) 경우 NiO 박막이 안정되면서 교환결합력( $H_{ex} = 75$  Oe)이 증가됨으로서 이 교환결합력이 패턴된 시료의 반자장보다 큼으로서 모서리에서 반대방향의 자구를 발생시킬 수 없는 것이다. 이는 외부자기장을 걸어주고 있는 것과 같은 상황이기 때문이다. 반대로 NiO(10 nm)/NiFe(10 nm)의 경우는 불안정한 NiO 박막에 의해 약한 교환결합력을 가지며 그에 따라 반자장이 상대적으로 교환결합력세기보다 크게 된다. 그림 6은 NiO(10 nm)의 시편모서리에서 지그재그 자구벽을 보여준다. 예상했

던바와 같이 지그재그 자구벽이 NiO(30 nm)보다 큰 모양으로 발생했음을 볼 수 있고, 또한 자구벽이동역시 매우 작은 외부 자기장에 의해 변화함으로 MFM tip에 의해 쉽게 자화반전을 보이고 있다.

### IV. 결 론

교환결합된 NiO(30 nm)/NiFe(10 nm)이중박막의 모서리에서 발생한 Neel과 Bloch 자구벽을 MFM으로 측정하였으며, 자화반전에 따른 자구벽의 이동을 확인하기위해 외부자기장을 가해 측정하였다. 박막의 모서리 경계선이 교환결합이방성 방향과 같은 방향일 때는 직선모양의 Neel 자구벽이 측정되었으며, 경계면이 이방성방향과 수직인 경우에는 지그재그 Bloch 자구벽이 발견되었다. 두 자구벽의 자화반전과정에서 외부자기장의 방향에 따라 다른 자화반전을 보여줌을 알 수 있었다. NiO(60 nm)인 경우에는 교환결합세기( $H_{ex}$ )가 반자장세기보다 크므로 해서 발생하지 않았고, 교환결합세기가 약한 NiO(10 nm) 이중박막에서는 큰 Bloch 자구벽이 발견되었다.

### 감사의글

본 연구는 과학재단 지역우수과학자 프로그램(R05-2003-000-11200-0)과 상지대학교에서 지원되었음을 알려드립니다.

### 참고문헌

- [1] V. I. Nikitenko, V. S. Gornakov, A. J. Shapiro, R. D. Shull, K. Liu, S. M. Zhou, and C. L. Chien, Phys. Rev. Lett., 84, 765 (2000); Phys. Rev. B, 57, R8111 (1998); J. Appl. Phys., 83, 6828 (1998).
- [2] X. Portier, A. K. Petford-Long, S. Mao, A.M. Goodman, H. Laidly, and K. O'Grady, IEEE Trans. Magn., 35, 3091 (1999).
- [3] H. D. Chopra, D. X. Yang, P. J. Chen, H. J. Brown, L. J. Swartzendruber, and W. F. Egelhoff, Jr, Phys. Rev. B, 61, 15312 (2000); J. Appl. Phys., 87, 4942 (2000).
- [4] Z. Qian, M. T. Kief, P. K. George, J. M. Sivertsen, and J. H. Judy, J. App. Phys., 85, 5525 (1999).
- [5] M. Cartier, S. Auffret, Y. Samson, P. Bayle-Guillemaud, B. Dieny, J. Magn. Magn. Mater., 223, 63 (2001).
- [6] J. Yu, A. D. Kent, and S. S. Parkin, J. Appl. Phys., 87, 5049 (2000).
- [7] J. Ding and J. Zhu, J. Appl. Phys., 79, 5892 (1996); J. C. Wu, H. W. Huang, C. H. Lai, and T. H. Wu, J. Appl. Phys., 87, 4948 (2000).
- [8] T. Zhao, C. Hou, H. Fujiwara, H. Cho, J. W. Harrell, and A. Khapikov, J. Appl. Phys., 87, 6484 (2000).

## Magnetic Domain Walls at the Edges of Patterned NiO/NiFe Bilayers

D. G. Hwang\* and S. S. Lee

Dept. of Computer and Electronic Physics, Sangji University, Wonju 220-702, Korea

(Received 8 July 2003, in form final 20 August 2003)

The magnetic domain walls at the edges of a large patterned and exchange-biased NiO(10-60 nm)/NiFe(10nm) bilayers and their motions with applied field were investigated by magnetic force microscopy. Three kinds of domain walls, namely, *head-to-head* zig-zag and *tail-to-tail* zig-zag Bloch walls and straight Neel walls were found at specific edges of the unidirectional biased NiO(30 nm)/NiFe(10 nm) bilayer having the exchange biasing field ( $H_{ex}$ ) of 21 Oe. No walls were observed for the strong exchange-biased bilayer (60 nm NiO,  $H_{ex}=75$  Oe), while the amplitude of the zig-zag domain increased with decreasing exchange biasing. This may be explained by mutual restraint between  $H_{ex}$  and the demagnetization field of edge. We similarly investigated the magnetization reversal process, the subsequent motion of the walls and identified the pinning and nucleation sites during reversal.

**Keywords :** Exchange biased bilayer, NiO, MFM, Neel wall, Bloch wall.