

# 1 ns 이하의 자화 용이축 펄스 자기장에 의한 자성박막의 자화 반전 거동

이진원 · 한운성 · 이상호 · 홍종일\*

연세대학교 공과대학 신소재공학과, 서울특별시 서대문구 신촌동 134, 120-749

(2007년 9월 21일 받음, 2007년 10월 12일 최종수정본 받음)

1.00×0.24 μm<sup>2</sup> 크기의 Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> 박막의 자화 반전 거동을 자화 용이축으로 1 ns 이하의 펄스 자기장의 지속 시간과 세기를 변수로 인가하여 micromagnetics 시뮬레이션으로 관찰하였다. 자성 박막은 직사각형과 타원형의 모양을 가지며, 두께는 2 nm와 4 nm로 설정하였다. 실험 결과 Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> 박막의 두께와 모양에 따라 각각 다른 경향을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 박막의 두께에 따라 두께 방향으로 형성되는 반자장의 크기 차에 의해 edge domain에서 스핀의 회전속도와 스핀 스위칭의 거동에 차이가 생기며, 박막이 두꺼울수록 자화 반전에 더 긴 펄스 지속 시간과 강한 펄스 자기장이 필요하다는 것을 확인하였다. 한편, 자화 반전이 예상되는 영역에서 자화 반전이 일어나지 않는 비정상적인 자화 반전 영역을 발견할 수 있었는데, 박막의 모양이 타원일 때와 박막의 두께가 얇은 경우에 그 영역이 더욱 불규칙적이고, 넓게 분포하였다. 이러한 현상은 막의 두께가 매우 얇기 때문에 두께 방향으로 형성된 강한 반자장의 영향에 의해 나타나는 것으로 여겨진다. Edge domain이 더 많은 직사각형 모양의 경우 자화 반전이 일어나는 동안 자기모멘트의 세차 운동에 의해 생기는 M<sub>x</sub> 성분, 즉 두께방향으로 형성된 반자장이 더 작고, 이에 따라 자화 반전이 예상되는 영역에서 자화 반전이 일어나지 않는 비정상적인 자화 반전 영역이 더 적어짐을 확인하였다. 본 시뮬레이션 결과는 자성박막의 안정된 고속 자화반전을 위해서는 반자장의 영향을 최소화하는 것이 중요하다는 것을 보여준다.

주제어 : 자화 반전, micromagnetics, damping 스위칭, 반자장, 자성박막

## I. 서 론

자성 박막의 고속 스위칭에 관한 연구는 자화 반전 또는 스핀 스위칭을 기반으로 하는 소자의 개발에 중요한 부분을 차지한다. 최근에 자화 곤란축(hard axis)으로 인가한 외부 자기장에 의한 precession 스위칭 또는 GHz 주파수 대역의 펄스 자기장을 자화 용이축(easy axis)으로 인가하여 자화 반전을 일으키는 고속 자기 스위칭 연구가 활발히 진행되고 있다 [1, 2]. 자화 곤란축으로 외부자기장을 인가한 precession 스위칭의 경우 자기모멘트가 유효 자장(effective field, H<sub>eff</sub>)을 중심으로 세차 운동을 하기 때문에 자기장을 인가한 시간에 따라 주기적으로 자화 반전이 일어나지만[3], damping 스위칭의 경우 자화 용이축으로 특정 시간 이상의 자기장을 인가한 경우에 자화 반전이 일어난다고 보고되었다[2]. Conventional MRAM cell에서 도선을 통해 자기장이 인가되는 시간이 20 ns 이하로 짧아지고 있기 때문에 자화 반전이 안정적으로 일어나기 위한 펄스 자기장을 인가하였을 때, 자화 반전이 반드시 일어나는 특정 시간을 찾는 것은 매우 중요하다. 본 논문에서는 1.00×0.24 μm<sup>2</sup> 크기의 자성 박막에 자화 용이축으로 자기장을 20 ps에서 500 ps까지 인가하였을 때 일어나는 자화 반전을 micromagnetics 시뮬레이션을 통해 관찰하였고, 자성 박막의 두께와 모양에 따른 자화 반

전 거동을 연구하였다.

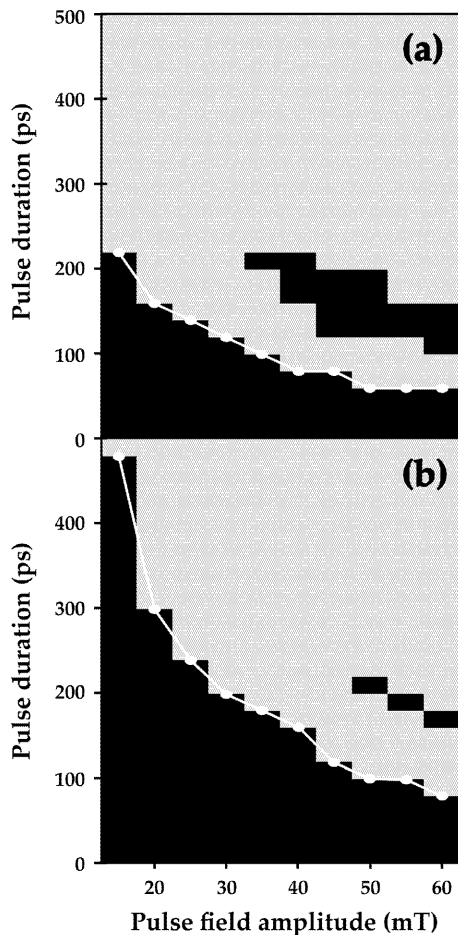
## II. 모델링

1.00×0.24 μm<sup>2</sup> 크기의 직사각형과 타원 모양의 Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> 자성 박막을 Object Oriented Micro-Magnetic Framework (OOMMF)를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다[4]. 포화 자화(saturation magnetization) 값은 800×10<sup>3</sup> A/m이고, exchange stiffness constant A는 1.3×10<sup>-11</sup> J/m<sup>3</sup>이다. 그리고 자성 박막이 자화 용이축인 x 축을 따라 일축 자기 이방성(uniaxial anisotropy)을 지니고 있으며, 일축 자기 이방성 상수 K<sub>u</sub>는 700 J/m<sup>3</sup>이고, damping constant α는 0.03이다[5]. 재료의 exchange length l<sub>ex</sub>는 √(2A/μ<sub>0</sub>M<sub>s</sub><sup>2</sup>) = 5.68 nm이다. 시뮬레이션을 위한 최소 cell의 크기는 20×20 nm<sup>2</sup>로 하였고, 이 조건에서 계산된 결과 및 자기모멘트의 자화 반전 거동은 cell 크기를 l<sub>ex</sub>보다 작은 5×5 nm<sup>2</sup>로 했을 때와 비슷한 경향을 보인다는 것을 확인하였다. 각각의 cell에 있는 자기 모멘트 값은 일정하다고 가정하였고, 최초의 모든 자기 모멘트는 자화 용이축을 따라 +x 방향으로 놓여있으며, 외부 자기장을 인가하기 전 자화 곤란축으로 0.5 mT의 자기장을 지속적으로 인가하여 주었다. 여기에 -x 방향으로 펄스 자기장을 인가하여 자화 반전을 유도하였고, relaxation 후에 모든 자기모멘트들이 최초의 방향과 반대인 -x 방향으로 배열되었을 때 자화 반전이 일어난 것으로 판단하였다.

\*Tel: (02) 2123-5846, E-mail: hong.jongill@yonsei.ac.kr

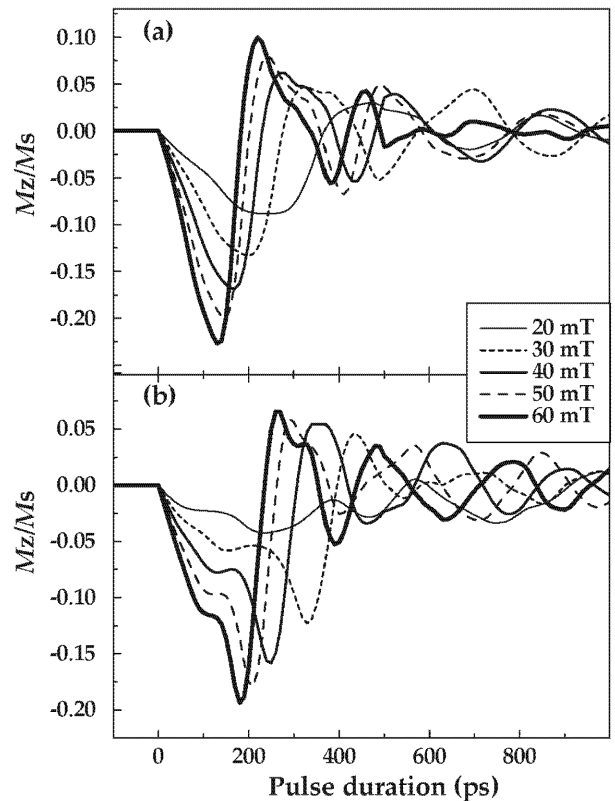
### III. 실험결과 및 고찰

자화 용이축으로 펄스 자기장을 인가하기 전 자화 곧란축 방향으로 0.5 mT의 자기장을 지속적으로 인가하였다. 이는 펄스 자기장이 인가되기 전 자기 모멘트의 분포를 ‘S’ 상태로 만들어 수행된 모든 시뮬레이션이 같은 초기 조건에서 시작하도록 하기 위해서였다[6]. Fig. 1은  $1.00 \times 0.24 \mu\text{m}^2$  크기의 직사각형 모양  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  자성 박막에 15 mT부터 60 mT까지 펄스 자기장을 인가했을 때 일어나는 자화 반전 지도를 보여 준다.  $x$  축은 자화 용이축으로 인가한 자기장의 세기를 나타 내고,  $y$  축은 자기장을 인가한 펄스 지속 시간으로 20 ps씩 500 ps까지 증가시켰다. Fig. 1에서 밝은 부분이 자기모멘트 들이  $-x$  방향으로 회전하여 자화 반전이 일어난 영역이고, 어두운 부분이 자화 반전이 일어나지 않은 영역을 의미한다. Fig. 1(a)는 두께가 2 nm인 직사각형 박막의 자화 반전 지도



**Fig. 1.** Switching maps for the rectangular film with pulse amplitudes ( $x$  axis) and durations ( $y$  axis). The bright region indicates that the magnetization was switched to the  $-x$  direction and the dark region indicates that the magnetization was not switched after relaxation. The film's (a) thickness was 2 nm and (b) 4 nm.

로 인가한 자기장의 세기가 증가할수록 자화 반전이 일어나 는 데 필요한 최소 시간이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다 (흰색 실선)[2, 7]. 하지만 인가한 자기장의 세기가 35 mT 이 상일 때 일반적으로 알려진 자화 반전 여부를 나타내는 asteroid 곡선과 달리 자화 반전이 안정적으로 일어나야 하는 영역에서 자화 반전이 일어나지 않는 비정상적인 영역이 일 부 발생했다(어두운 영역). 이러한 현상은 Fig. 1(b)에서처럼 두께가 4 nm인 경우에서도 확인할 수 있었다. Fig. 1(b)에서 50 mT의 자기장의 경우, 200~220 ps 동안 인가했을 때, 그리고 자기장의 세기가 60 mT일 때는 160~180 ps 동안 자기장 을 인가하면 자화 반전이 일어나지 않는다는 것을 관찰하였다. 이러한 현상은 자화 반전이 일어날 때 박막 두께 방향으 로의 자기 모멘트( $M_z$ )의 비율이 커질수록 뚜렷해졌다. Fig. 2 는 Fig. 1에 해당되는 부분 중 몇 가지 경우에 대하여 시간 에 따른  $M_z$ 의 변화를 나타낸 것이다.  $x$  축은 자기장을 인가 한 시간을 나타내며 0 ps일 때 펄스 자기장이 인가되었다.  $y$  축은 자화 반전이 일어날 때 박막 전체의 포화 자화 값 중에  $M_z$ 가 차지하는 비율을 나타낸 것이다. Fig. 2의 (a)와 (b)를 비교했을 때 박막이 두꺼워질수록  $M_z/M_s$  값은 전체적으로 줄

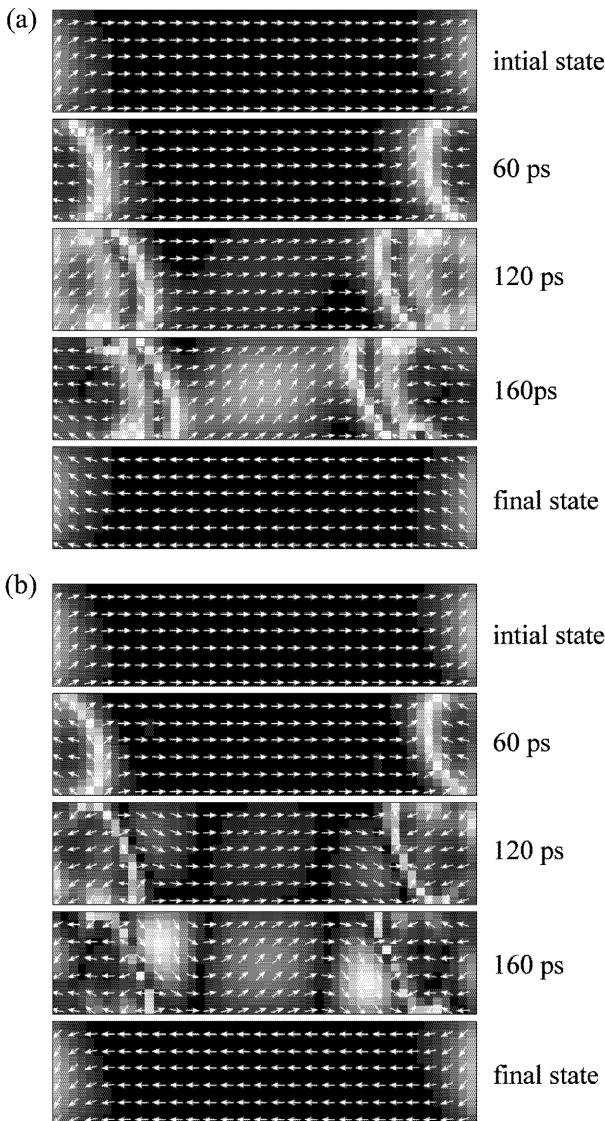


**Fig. 2.** Evolution of the  $M_z/M_s$  values of the rectangular films with (a) 2 nm and (b) 4 nm with pulse amplitudes. The instant value of the at  $M_z/M_s$  the moment of termination of the pulse fields is shown in the figure.

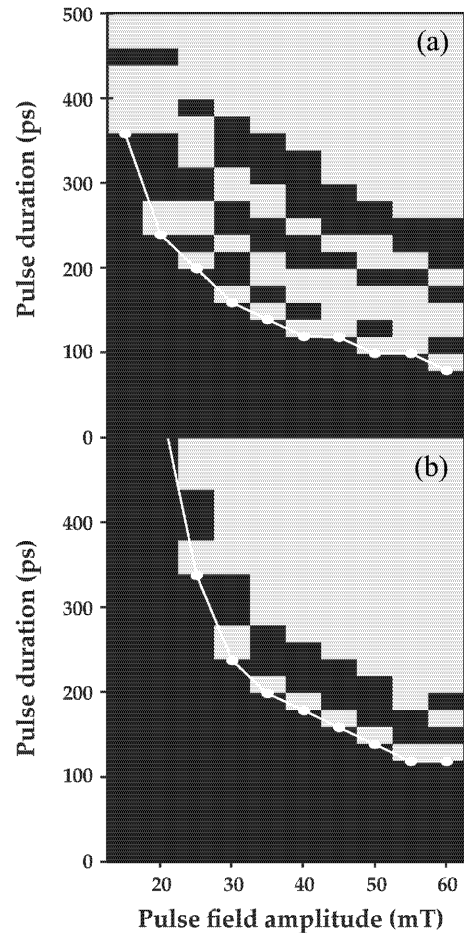
어떻게, 이는 Fig. 1에서 두께가 증가할수록 자화 반전이 일어나야 하는 영역에서 자화 반전이 일어나지 않는 비정상적인 자화 반전 영역이 감소한 것과 일치하는 결과이다. 이러한 자화 반전이 일어나야 하는 영역에서 자화 반전이 일어나지 않는 비정상적인 자화 반전 영역의 분포는 박막의 두께 방향으로 형성되는 강한 반자장 때문인 것으로 생각된다.

두께가 4 nm인 경우, 자화 반전이 일어나는 데 필요한 최소 시간은 두께가 2 nm인 직사각형 박막과 마찬가지로 펄스 자기장의 세기가 증가할수록 줄어들었지만(흰색 실선), 특정 펄스 자기장에서 자화 반전이 이루어지는 시간이 2 nm인 경

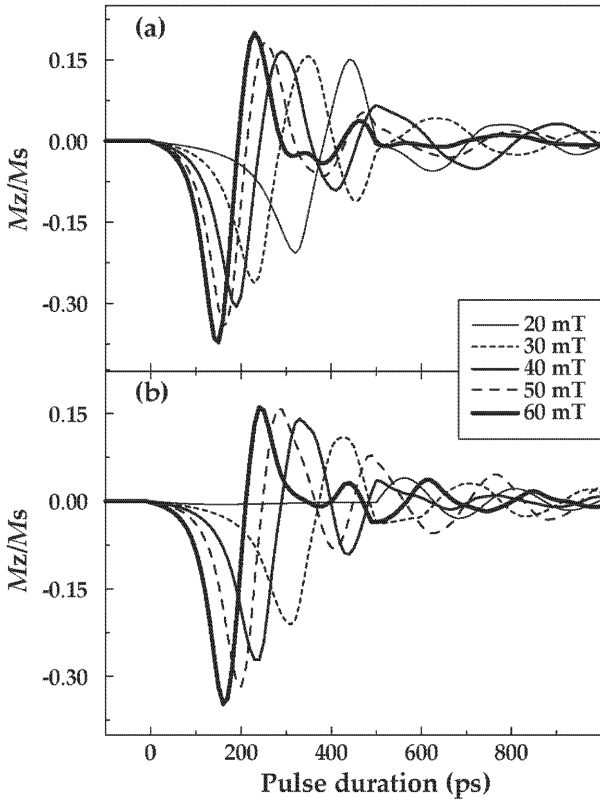
우보다 더 길어지는 것을 관찰하였다. 이것은 Fig. 3의 60 ps와 120 ps에 해당되는 각각의 그림에서 보이는 것처럼 edge domain에서 스핀의 precession 속도가 다르기 때문인 것으로 해석된다. 2 nm 두께의 경우, 4 nm 두께에 비해 두께 방향인 z 축으로 강한 반자장이 형성되기 때문에 스핀의 회전이 일반적인 damping 스위칭과 달리 xy 평면 내에서 상대적으로 더 찌그러진 운동을 하기 때문에 회전 속도가 더 빠른 것으로 이해된다. 따라서, 자화반전 역시 다른 행태로 나타나게 된 것이다. 두께가 4 nm인 경우 Fig. 3(b)의 120 ps 경우에서 보이는 것처럼 가운데와 그 주위가 서로 다른 방향으로 회전하는 domain이 생성되고, 이는 160 ps의 경우에서 더 명확해짐을 알 수 있다. 이처럼 다른 방향으로 회전하는 domain이 생성되는 이유 역시, 반자장의 세기에 따라 스핀 파동의 dephasing의 정도와 분포가 달라지며 이에 따른 스핀 파동의 중첩현상에 기인한 것으로 사료된다.



**Fig. 3.** Changes in spatial distribution of the magnetization with time for the rectangular films with a thickness of (a) 2 nm and (b) 4 nm. The arrow represents the magnetization direction. The pulse amplitude was 60 mT and the duration was 500 ps (the static transverse bias was 0.5 mT).



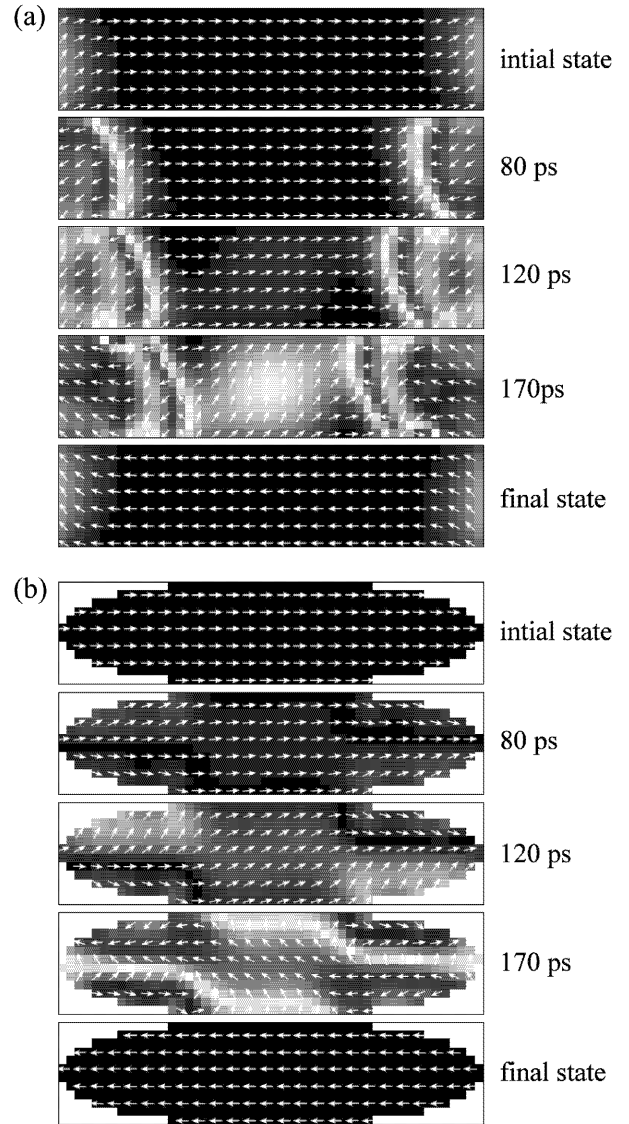
**Fig. 4.** Switching maps for the elliptical film with pulse amplitudes ( $x$  axis) and durations ( $y$  axis). The bright region indicates that the magnetization was switched to the  $-x$  direction and the dark region indicates that the magnetization was not switched after relaxation. (a) thickness was 2 nm and (b) 4 nm.



**Fig. 5.** Evolution of the  $M_z/M_s$  values of the elliptical films with (a) 2 nm and (b) 4 nm with pulse amplitudes. The instant value of the at  $M_z/M_s$  the moment of termination of the pulse fields is shown in the figure.

Fig. 4와 5는  $1.00 \times 0.24 \mu\text{m}^2$  크기의 타원 모양  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  자성 박막의 자화 반전에 대한 거동을 보여준다. Fig. 4의 (a)와 (b)는 각각 두께가 2 nm, 4 nm일 때의 결과를 나타낸다. Fig. 4에서 자화 반전이 일어나야 하는 영역에서 자화 반전이 일어나지 않는 비정상적인 자화 반전 영역이 직사각형일 때보다 더 넓고 불규칙적으로 분포하는 것을 확인할 수 있었고, 박막이 두꺼워질수록 자화 반전이 일어나지 않는 비정상적인 자화 반전 영역이 줄어드는 경향은 직사각형일 때와 같다는 것을 확인 할 수 있었다. 이것은 Fig. 5에서 알 수 있듯이 자화 반전이 일어날 때의  $M_z$  성분이 직사각형일 때보다 타원일 때 더 크기 때문이다.

Fig. 6는 직사각형일 때와 타원일 때  $M_z/M_s$  값이 차이를 보이는 이유를 제시해주고 있다. Fig. 6의 (a)와 (b)는 각각 직사각형 모양과 타원 모양의 박막에 60 mT의 펄스 자기장을  $-x$  방향으로 500 ps 동안 인가하였을 때 일어나는 자화 반전의 거동을 시간경과에 따라 나타낸 것이다. Fig. 6의 (a)에서처럼 직사각형 모양의 박막은 ‘S’ 상태에서 시작되는데, 자기장이 인가되면 박막의 edge domain이 먼저 회전하여 domain wall을 형성한 후 박막의 중앙 영역이 반전하는 거동



**Fig. 6.** Changes in spatial distribution of the magnetization with time for (a) the rectangular film and (b) the elliptical film with a thickness of 2 nm. The arrow represents the magnetization direction. The pulse amplitude was 60 mT and the duration was 500 ps (the static transverse bias was 0.5 mT).

을 보이고 있다. 하지만 (b)의 타원형 박막은 edge domain이 거의 없기 때문에 자기장이 인가되면 중앙 영역의 대부분이 먼저 회전하고 박막의 양 끝부분이 이후에 반전하는 거동을 보인다. 직사각형 박막의 edge domain은  $y$ 축으로 지속적으로 인가하는 0.5 mT의 자기장에 의해 자화 용이축으로 부터 벗어나 있기 때문에 인가된 펄스 자기장에 의한 토크에 민감하게 반응하여 쉽게 회전하는 반면에, edge domain이 없는 타원형 박막의 끝부분은 dipolar coupling에 의해 강하게 고정되어 있어서 박막의 중앙 부분이 더 쉽게 회전할 수 있는 것으로 여겨진다. 따라서 edge domain이 더 많은 직사각형 박

막에서 자화 반전이 일어나는 동안 자기모멘트의 precession 운동에 의해 생기는  $M_z$  성분이 더 작고, 자화 반전이 일어나야 하는 영역에서 자화 반전이 일어나지 않는 비정상적인 자화 반전 영역이 더 적게 나타나는 것이다.

#### IV. 결 론

본 실험에서는 마이크로미터 이하 크기의 자성 박막에 자화 용이축으로 ns 이하의 펄스 자기장을 인가했을 때 자화 반전 거동을 펄스 자기장의 지속 시간과 세기를 변수로 하여 micromagnetics 시뮬레이션으로 관찰하였다. 실험 결과  $Ni_{80}Fe_{20}$  박막의 두께와 모양에 따라 각각 다른 경향을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 박막의 모양과는 상관없이 박막의 두께가 두꺼워질수록 자화 반전에 필요한 펄스 자기장의 지속 시간은 길어지고, 세기는 강해졌다. 이것은 두께방향으로 형성되는 강한 반자장에 의해 edge domain에서 스핀의 precession 속도가 달라짐에 따라 dephasing의 정도와 분포가 커지게 되어 스핀 파동의 간섭에 기인한 것으로 여겨진다. 한편, 자화 용이축으로 펄스 자기장을 인가했을 때, 일반적으로 알려진 자화 반전 여부를 나타내는 astcroid 곡선과 달리 자화 반전이 안정적으로 일어나야 하는 영역에서 자화 반전이 일어나지 않는 비정상적인 자화 반전 영역을 발견할 수 있었다. 이것은 박막의 모양이 타원일 때와 박막의 두께가 얇은 경우에 그 분포가 더욱 불규칙적이고, 넓게 나타났다. 이러한 현상은 막의 두께가 2 nm와 4 nm로 매우 얇기 때문에 두께 방향으로 형성된 강한 반자장의 차에 의해 나타나는 것으로 사료된다. 즉, 자화 반전이 일어나는 동안 박막 외부 방향으로 향하고 있는 자기모멘트들에 기인한 것으로, 박막의 두께가 증가하면 두께 방향의  $M_z$  성분이 차지하는 비율이 줄어들기 때문에 자화 반전이 일어나야 하는 영역에서 자화 반전이 일어나지 않는 비정상적인 자화 반전 영역이 줄어들게 되는

반면, edge domain이 거의 없는 타원 모양의 박막의 끝부분은 dipolar coupling에 의해 강하게 고정되어 있어서 박막의 중앙 부분이 더 쉽게 회전하는 것으로 여겨진다. 따라서 edge domain이 더 많은 직사각형 모양의 박막에서 자화 반전이 일어나는 동안 자기모멘트의 세차 운동에 의해 생기는  $M_z$  성분이 더 작게 되고, 이에 따라 자화 반전이 일어나야 하는 영역에서 자화 반전이 일어나지 않는 비정상적인 자화 반전 영역이 더 적게 된다. Micromagnetics 시뮬레이션을 통해서 자성 박막의 두께 방향으로 형성된 강한 반자장이 초고속 자화 반전 거동에 결정적인 인자로 작용할 수 있다는 것을 확인하였다.

#### 감사의 글

이 논문은 2006년 교육인적자원부의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(KRF-2006-331-D00230).

#### 참고문헌

- [1] R. H. Koch, J. G. Deak, D. W. Abraham, P. L. Trouilloud, R. A. Altman, Yu Lu, W. J. Gallagher, R. E. Scheuerlein, K. P. Roche, and S. S. P. Parkin, Phys. Rev. Lett., **81**, 4512 (1998).
- [2] S. KaKa and S. Russek, J. Appl. Phys., **87**, 6391 (2000).
- [3] H. W. Schumacher, C. Chappert, R. C. Sousa, P. P. Freitas, J. Miltat, and J. Ferre, J. Appl. Phys., **93**, 7290 (2003).
- [4] M. J. Donahue and D. G. Porter, <http://math.nist.gov/oommf>.
- [5] S. Kaka and S. E. Russek, Appl. Phys. Lett., **80**, 2958 (2002).
- [6] X. Liu, J. N. Chapman, S. McVitie, and C. D. W. Wilkinson, Appl. Phys. Lett., **84**(22), 4406 (2004).
- [7] S. Kaka, J. P. Nibarger, S. E. Russek, N. A. Stutzke, and S. L. Burkett, J. Appl. Phys., **93**(10), 7539 (2003).

## Magnetization Reversal Behavior of Submicron-sized Magnetic Films in Response to Sub-ns Longitudinal Field Pulses Along the Easy Axis

Jinwon Lee, Yoonsung Han, Sangho Lee, and Jongill Hong\*

*Materials Science and Engineering, Yonsei University, 134 Shinchon, Seodaemun, Seoul 120-749, Korea*

(Received 21 September 2007, in final form 12 October 2007)

We simulated the magnetization reversal behavior of submicron-thickness magnetic films by applying pulses of sub-ns-long durations and amplitudes along the easy axis. The films were rectangular and elliptical  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ , and their thickness was 2 nm and 4 nm. We observed different behaviors depending upon the shape and thickness of the films and found a normal non-switching in regions in which we expected complete switching after relaxation. In the elliptical film, the non-switching regions were found to be random and to be widely distributed throughout the switching map. The strong demagnetization field along the  $z$ -axis, the film thickness direction, is likely responsible for this abnormal behavior. In the rectangular film, the abnormal non-switching regions were less distributed than they were in the elliptical film due to edge domains resulting from the small  $M_z$  or demagnetization field during the switching. Our simulation confirms that large demagnetization is detrimental to the ultra-fast magnetization reversal of magnetic ultra-thin films.

**Keywords :** magnetization reversal, micromagnetics, damping switching, demagnetization field, ultra-thin magnetic film