ISSN (Print) 1598-5385
ISSN (Online) 2233-6648
≪연구논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society 31(5), 219-224 (2021) https://doi.org/10.4283/JKMS.2021.31.5.219

Magnetization Dynamics Properties of Thickness-dependent $Ni_{81}Fe_{19}$ Thin Film

Jaehun Cho*,† and June-Seo Kim*,†
Division of Nanotechnology, Institute of Convergence, DGIST, Daegu 42988, Korea

Chun-Yeol You*
Department of Emerging Materials Science, DGIST, Daegu 42988, Korea

(Received 13 October 2021, Received in final form 22 October 2021, Accepted 25 October 2021)

The thickness dependent magnetic properties of $Ni_{81}Fe_{19}$ thin film are investigated using Brillouin light scattering and Vector network analyzer-ferromagnetic resonance. $Ni_{81}Fe_{19}$ thin films are fabricated by DC magnetron sputtering system as 15, 30, 50, 70 nm. The determined magnetic parameters are saturation magnetization (M_s), exchange stiffness constant (A_{ex}), and Gilbert damping constant (α). M_s values are slightly increased as increasing $Ni_{81}Fe_{19}$ thickness and decreased as increasing $Ni_{81}Fe_{19}$ thickness. A_{ex} values are almost identical value as 8.9 pJ/m, and α is decreased from 0.0113 ± 0.0001 to 0.0086 ± 0.0002 as increasing $Ni_{81}Fe_{19}$ thickness.

Keywords : $Ni_{81}Fe_{19}$ thin film, ferromagnetic resonance, Brillouin light scattering, exchange stiffness constant, gilbert damping constant

두께변화에 대한 $Ni_{81}Fe_{19}$ 박막의 자화 동역학 특성연구

조재훈*,† · 김준서*,†
대구경북과학기술원 나노융합연구부, 대구시 달성군 현풍읍 테크노중앙대로 333, 42988

유천열*
대구경북과학기술원 신물질과학전공, 대구시 달성군 현풍읍 테크노중앙대로 333, 42988

(2021년 10월 13일 받음, 2021년 10월 22일 최종수정본 받음, 2021년 10월 25일 게재확정)

본 연구에서는 브릴루앙 광 산란실험(Brillouin light scattering; BLS)과 벡터네트워크 분석기를 이용한 강자성공명실험(vector network analyzer-ferromagnetic resonance; VNA-FMR)을 이용하여 $Ni_{81}Fe_{19}$ 자성박막의 두께변화에 대한 자화 동역학의 특성에 관한 연구를 수행하였다. 두께 15, 30, 50, 70 nm의 $Ni_{81}Fe_{19}$ 박막을 DC 마그네트론 스퍼터를 이용하여 증착하였다. 외부 자기장의 변화에 따른 스핀파의 주파수를 측정하여 $Ni_{81}Fe_{19}$ 박막의 포화자화, 교환 뻣뻣함 상수, Gilbert 감쇠 계수등의 자성상수를 결정하였다. 자성박막의 두께가 두꺼워짐에 따라 포화 자화 값은 상승하다가 감소하였고, 교환 뻣뻣함 상수의 값은 약 8.9 pJ/m로 일정하고, Gilbert 감쇠 계수는 0.0113 ± 0.0001에서 0.0086 ± 0.0002로 점점 줄어드는 경향을 보였다.

주제어 : $Ni_{81}Fe_{19}$ 박막, 강자성공명, 브릴루앙 산란실험, 교환 뻣뻣함 상수, Gilbert 감쇠 계수

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.
*Corresponding author: Tel: +82-53-785-3607,
e-mail: jhcho@dgist.ac.kr
Tel: +82-53-785-6912, e-mail: spin2mtj@dgist.ac.kr
Tel: +82-53-785-6522, Fax: +82-53-785-6509,
e-mail: cyyou@dgist.ac.kr
†The authors contributed equally to this work.

I. 서　　론

자성체에 존재하는 자구와 자구벽 내부의 스핀들이 외부 자기장에 의하여 정렬하거나 움직임을 보이는 현상을 자화 동역학이라고 부른다. 자화 동역학은 전류구동형 스핀전달 토크 자기 메모리(Spin-Transfer-Torque Magnetoresistive Random Access Memory; STT-MRAM)등의 스핀트로닉스 응용분야에 가장 기본이 되는 물리현상이기 때문에, 자화 동역학에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1-3]. STT-MRAM에서의 자화 반전 전류밀도(switching current density)는 차세대 비휘발성 메모리 개발에 있어서 매우 중요한 역할을 하고 있다. 자기 터널링 접합의 낮은 신뢰성과 소자의 작은 크기로 인하여 높은 자화반전 전류밀도가 발생한다. 그러므로 층구조의 최적화와 반전층의 자기특성으로부터 자화 반전 전류밀도를 다양한 방법으로 줄일 수 있는 접근법이 고려되어야 한다. 미세자기 전산모사로부터 교환 뻣뻣함 상수[4]가 자화반전 전류밀도에 매우 민감하다는 연구 결과가 보고되었다. 교환 뻣뻣함 상수를 포함한 거대 스핀 모델에서의 자화반전 전류밀도는 다음과 같이 표현된다[5-7].

$$J_c \sim \frac{\alpha}{a_1}\left[H_{eff} + \frac{1}{2}(N_y + N_z - 2N_x)M_s + \frac{2A_{ex}}{\mu_0 M_s}k^2\right], \quad (1)$$

여기에서 α는 Gilbert 감쇠계수, H_{eff}는 시스템의 유효자기장, $N_{x,y,z}$는 자기소거 인자고, a_1는 $a_1 = \eta_p[\hbar/(2e\mu_0 M_s d_s)]$ (η_p, $\hbar$, d_s는 각각 스핀분극, 환산 Plank 상수, 자화반전층의 두께), M_s는 포화자화 값, A_{ex}는 교환 뻣뻣함 상수로 표현된다. k는 스핀파의 파수벡터이다. 식(1)에서 볼 수 있듯이 자화반전 전류밀도에서 교환 뻣뻣함 상수와 더불어 중요한 물리상수가 Gilbert 감쇠 계수이다. 따라서, 자화반전 전류밀도를 줄이기 위해서는, 소자의 기본적인 물리상수인 포화자화, 교환 뻣뻣함 상수, Gilbert 감쇠계수의 이해 및 제어가 중요하다.

브릴루앙 광산란(Brillouin light scattering; BLS)이란 빛이 매질내의 열적으로 들뜬 장파장의 스핀파에 의해 비탄성 산란된 것을 가리키며[8], 높은 분해능의 간섭계를 이용하여 산란된 빛의 진동수 변이를 측정함으로서 매질의 스핀파의 주파수를 결정할 수 있다. 자성박막에서 검출되는 스핀파는 입자들의 간격에 비해 수 천 배 긴 파장을 가지고 있기 때문에 매질은 연속체로 가정할 수 있다. 강자성공명(ferromagnetic resonance; FMR)이란 강자성체에서 외부 자기장에 의하여 세차 운동하는 스핀에 외부자기장과 rf field를 인가하면, 강력한 에너지 흡수가 일어나며 공명현상이 일어나는 것을 가리킨다[9]. 다시 말해 FMR은 강자성체에 있는 스핀이 마이크로파에 의해 나타나는 공명현상을 이야기한다. 본 연구에서는 DC 마그네트론 스퍼터링 방법으로 제작된 다양한 두께의 $Ni_{81}Fe_{19}$ 박막에 BLS와 벡터네트워크 분석기(vector network analyzer; VNA)를 이용한 FMR 측정을 통하여 포화자화, 교환 뻣뻣함 상수, Gilbert 감쇠계수 등을 결정한다.

II. 실험 방법

본 연구에서는 Si 기판에 5 nm 두께의 Ta 버퍼층을 증착하고, 그 위에 $Ni_{81}Fe_{19}$ 박막을 각각 15, 30, 50, 70 nm 두께로 증착한 후, 산화를 방지하기 위하여 5 nm 두께의 Ta 피복층을 증착하였다. 증착은 DC 마그네트론 스퍼터링 방법으로 증착하였고, 기본 진공도 9.5×10^{-9} Torr에서 Ar 가스 분압 1.5×10^{-3} Torr 상태에서 증착하였다. BLS 측정에는 532 nm 단일파장을 가지고 p 편광된 Diode-pumped solid-state 레이저를 200 mW의 세기로 50 mm의 초점거리를 가지는 카메라 렌즈를 통과하여 시료 표면에 45°로 입사하고 입사하는 방향과 면상에서 수직되는 방향으로 자기장을 인가하여 측정하였다. 시료 표면에서 입사된 빛의 후면 산란광을 Sandercock 타입 인 (3+3) 다중 패브리-페로 간섭계를 통해 분석하여 스핀파를 측정하였다[10]. VNA-FMR 측정은 HP 8510C 모델을 이용하여 자기감수율(magnetic susceptibility)의 허수부분을 측정하여 공명주파수를 결정하였다. 시료의 방향과 나란한 방향으로 coplanar wave guide(CPW)를 위치시키고 그와 면내에서 수직한 방향으로 미세한 rf 자기장을 인가하여 측정하였다. VNA의 GSG(ground-signal-ground) probe와 coplanar wave guide(CPW)를 통하여 VNA에서 반사된 S-파라미터를 측정하였고, 교정작업(calibration procedure)을 거쳐서 시료의 자기 감수율의 허수부분을 결정하였다[11]. 외부자기장의 변화에 따라서 측정된 자기 감수율의 허수부분의 주파수가 시료의 공명주파수가 된다. 자세한 측정의 방법은 이전의 연구결과에서 찾을 수 있다[12].

III. 실험결과 및 논의

Fig. 1의 (a), (b)는 각각 외부자기장이 216 kA/m와 386 kA/m에서 측정한 30 nm 두께의 NiFe 박막에 대한 대표적인 BLS 스펙트럼이며, 중앙의 큰 신호는 탄성 산란에 의한 신호이다. Fig. 1(a), (b)에서 보듯이 양 옆의 스펙트럼 상의 신호들은 매질내의 스핀파에 의해 산란된 광선들로써 산란된 광선과 입사광선 간의 진동수 차이에 의한 진동수 변이(frequency shift)를 나타내는데, 이를 스핀파의 진동수라 하며, 낮은 진동수 영역에서 나타나는 모드를 표면 스핀파 또는 Damon-Eshbach(DE)모드, 그리고 높은 진동수에서 나타나는 모드를 첫번째 덩어리 (B_1)모드라 한다. 외부의 자기장의 세기에 따라서 스핀파의 진동수는 변하는데 본 연구에서 사용

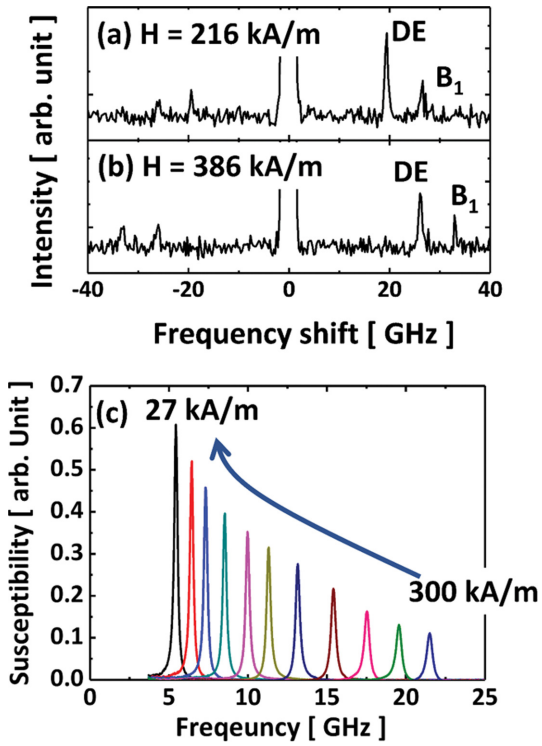

Fig. 1. (Color online) Typical BLS spectra for 30-nm-thick $Ni_{81}Fe_{19}$ film under the applied magnetic field at (a) 216 kA/m, (b) 386 kA/m. The peak labeled "DE" is the Damon-Eshbach (surface) mode and "B1" is the first bulk mode. (c) The imaginary part of the susceptibility as a function of frequency with varied applied magnetic field for 30-nm-thick $Ni_{81}Fe_{19}$ film.

된 시료의 두께에서는 외부자기장의 증가함에 따라서 스핀파의 진동수도 증가하는 경향을 갖는다. Fig. 1(c)는 외부자기장이 27 kA/m에서 300 kA/m로 변화할 때 VNA-FMR 측정으로 얻어진 공명주파수를 나타낸다. BLS 실험의 결과와 같이 외부자기장이 증가할수록 주파수 또한 증가하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 이용한 $Ni_{81}Fe_{19}$의 두께영역의 경우에는 교환상호작용 에너지와 쌍극자 에너지만을 고려할 수 있고, 이러한 시스템에서는 외부자기장이 증가할수록 주파수가 증가하는 경향을 보인다. 또한 외부자기장이 증가하면(주파수가 증가하면) 자기감수율의 최대값이 점차 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 자기감수율의 허수부를 측정하는 VNA-FMR 실험의 일반적인 결과이다[11,13].

$Ni_{81}Fe_{19}$ 박막의 자성특성을 결정하기 위하여 자기장의 변화에 따른 스핀파의 변화를 측정하였다. Fig. 2는 30 nm 두께의 $Ni_{81}Fe_{19}$ 시료의 BLS와 VNA-FMR 실험결과이다. BLS로 측정된 자기장 변화에 따른 스핀파의 주파수는 다음과 같이 주어진다[14-16].

$$f_{DE} = \frac{\gamma}{2\pi}\left[H_{ex}(H_{ex} + \mu_0 M_s) + \left(\frac{\mu_0 M_s}{2}\right)^2 (1 - e^{-2q_{//}d})\right]^{1/2}, \quad (2)$$

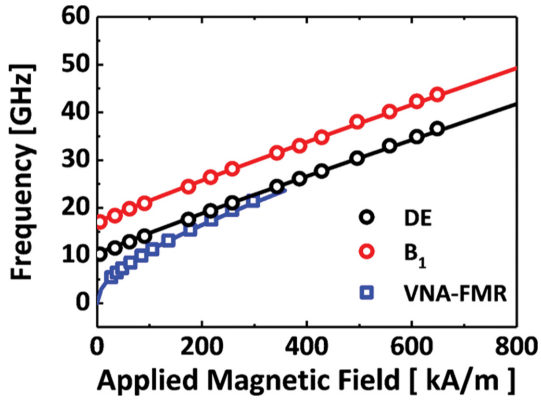

Fig. 2. (Color online) Variation of spinwave (resonance) frequencies with the applied magnetic field for 30-nm-thick NiFe film. The open black circles (the open red circles) are experimental results using BLS measurements for Damon-Eshbach (the first bulk) mode, respectively. The open blue squares are experimental results using VNA-FMR experiments. The lines are calculated valued.

$$f_{Bulk} = \frac{\gamma}{2}\left[\left(H_{ex} + \frac{2A_{ex}}{M_s}\left(q_{//}^2 + \left(\frac{n\pi}{d}\right)^2\right)\right)\left(H_{ex} + \frac{2A_{ex}}{M_s}\left(q_{//}^2 + \left(\frac{n\pi}{d}\right)^2\right) + \mu_0 M_s\right)\right]^{1/2}, \quad (3)$$

여기서 $f_{DE}(f_{Bulk})$는 표면(덩어리) 스핀파의 주파수, γ는 전자의 자기회전비율, H_{ex}는 외부자기장, M_s는 포화자화, d는 자성박막의 두께, $q_{//}$는 스핀파의 파수 벡터, A_{ex}는 교환 뻣뻣함 상수, n은 덩어리모드의 차수이다. 실험의 오차를 줄이기 위하여 표면 스핀파의 분산관계와 식(2)로부터 M_s 값을 구하고, 그 M_s 값을 첫번째 덩어리 모드의 주파수의 분산관계의 결과와 식(3)로부터 A_{ex}를 구하는 방법으로 분석을 진행하였다. 이때의 γ는 2.32×10^5 m/(A·s)로 고정하여 분석하였다. Fig. 2의 검정색 원(표면 스핀파)과 빨간색 원(첫번째 덩어리 모드) 모양은 실험의 결과값이고, 검정색(표면 스핀파)과 빨간색(첫번째 덩어리 모드) 실선은 피팅으로 구해진 결과 값이다. 30 nm 두께의 $Ni_{81}Fe_{19}$ 박막의 M_s와 A_{ex}는 각각 556 ± 4 kA/m와 9.1 ± 0.1 pJ/m이다.

한편 VNA-FMR로 측정된 공명주파수는 경계조건을 고려한 Kittel 방정식을 이용하여 표할 수 있으며 다음과 같다[17].

$$f_{Kittel} = \frac{\gamma}{2\pi}[H_{ex}(H_{ex} + \mu_0 M_s)]^{1/2}, \quad (4)$$

여기서 f_{Kittel}는 VNA-FMR을 이용하여 얻어진 주파수이다. Fig. 2의 파란색 사각형 모양은 30 nm 두께의 $Ni_{81}Fe_{19}$ 박막 시료의 VNA-FMR의 실험값이고, 파란색 실선은 피팅으로 구해진 결과이다. 이때 얻어진 M_s는 623 ± 3 kA/m이다. J. F. Cochran *et al.*의 연구에 의하면[18], BLS 측정시에 사용된 수 십 마이크로미터 크기로 집속된 레이저로 인하여 시료 표

면에 국소적인 열이 발생하여 BLS측정에 레이저로 인한 heating 효과가 발생한다. 이로 인해 입사되는 레이저의 세기가 증가할수록 표면 스핀파의 주파수는 줄어는 결과를 보고하였다. 따라서 본 연구에서의 실험결과도 입사되는 레이저에 의한 국소적인 heating 효과로 인하여 스핀파의 주파수가 작게 측정이 되었고, 작은 M_s 값으로 결정된 것이다. Kevin S. Olsson *et al.*[19]와 John R. Dutcher[20]의 연구에서 레이저 파워에 의한 스핀파의 주파수 변화를 찾을 수 있는데, 시료의 구조 및 재료에 따라서 다르지만, 100 mW의 레이저 파워당 시료에 약 25° 정도의 heating 효과를 주게 되고, 이는 약 0.25 GHz의 주파수 변화를 주게 된다. 레이저에 의한 heating 효과를 줄이기 위해서는 실험에 낮은 파워의 레이저를 사용하면 되는데, 이는 측정시간의 증가를 일으켜 신호대 잡음비의 증가를 유발할 수 있기 때문에 조심해야 한다. 따라서 시료의 물질과 조성에 따라서 레이저 파워의 heating 효과가 측정에 미치는 효과는 달라지기 때문에 BLS의 측정시 레이저 출력과 시료의 열에 대한 영향은 잘 따져 측정해야 할 것이다.

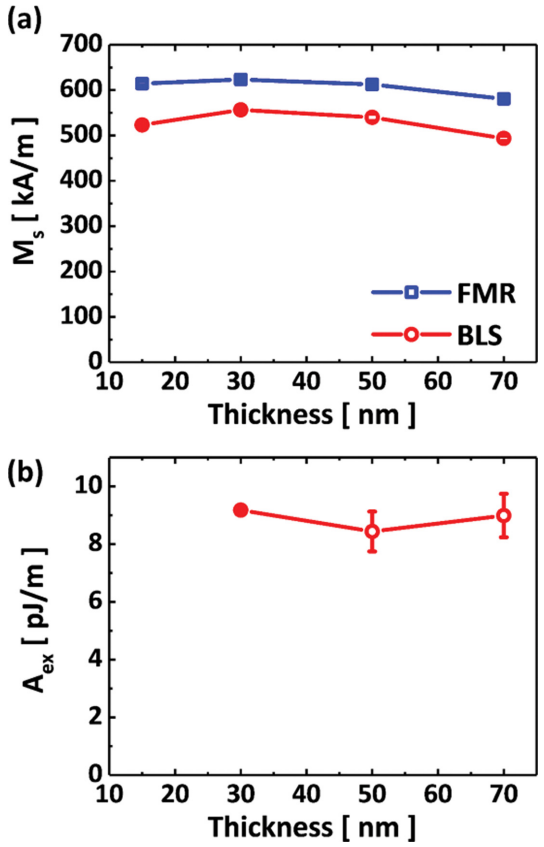

Fig. 3. (Color online) (a) The thickness dependent saturation magnetization values measured by BLS and VNA-FMR measurement. (b) The thickness dependent exchange stiffness constant values are measured by BLS.

Fig. 3(a)는 $Ni_{81}Fe_{19}$ 두께 변화에 대한 M_s 값에 따라 전시한 것이다. 앞서 기술한 것처럼, M_s 값은 BLS와 VNA-FMR의 측정방법에 따라 차이가 있지만, 비슷한 경향성을 가진다. M_s 값은 $Ni_{81}Fe_{19}$의 두께가 30 nm일 때 최대값을 가지고, 두께가 두꺼워질수록 작아지는 결과를 가진다. 만약 시료에 표면 이방성이 존재한다면, 이방성 에너지를 고려하여 포화자화 값을 결정해야 한다. 이방성에너지를 포함하는 유효 포화자화 값은 $M_{eff} = M_s + \frac{K_s}{(1/2\mu_0 M_s)d}$로 표현되는데, 여기에서 K_s는 표면 이방성 에너지 밀도, d는 자성박막의 두께이다. 측정된 포화 자화 값으로 계산된 이방성 에너지의 값은 매우 작아서 이방성 에너지는 무시하고 $M_{eff} = M_s$로 근사하였다. 그리고 BLS를 이용하여 측정된 포화자화 값을 식(3)에 대입하여 A_{ex}을 결정하였다. Fig. 3(b)는 $Ni_{81}Fe_{19}$ 두께 변화에 대한 A_{ex} 값을 전시한 것이다. 15 nm 두께의 $Ni_{81}Fe_{19}$ 박막의 경우에는 첫번째 덩어리 모드의 주파수가 실험상에서 측정가능한 주파수 범위를 넘어서기 때문에 A_{ex}를 구하지 못하였다. A_{ex} 값은 8.4 ± 0.7 pJ/m에에부터 9.2 ± 0.1 pJ/m의 값을 가지고 있으며, 에러범위 내에서 거의 비슷한 값을 가지고 있음을 알 수 있다. A_{ex}는 시료의 결정성[16], 자성층의 성분[21], 제작 조건[14,15] 등에 의해서 변화한다. 본 연구에서는 자성층의 성분 및 증착이 동일한 조건에서 시료가 제작되었기 때문에, 시료의 두께 변화에 대한 시료의 결정성변화는 없는 것으로 생각할 수 있다.

한편, VNA-FMR의 측정결과 얻어진 자기감수율의 허수 부분의 반치폭과 외부자기장 사의 관계는 다음과 같다[11].

$$\Delta f = \alpha\frac{\gamma}{2\pi}(2H_{ex} + \mu_0 M_s) + \Delta f_{exp}, \tag{5}$$

여기서 Δf는 자기감수율의 반치폭, α는 Gilbert 감쇠계수 그리고 Δf_{exp}는 외부 요인에의해 측정된 값이다. 식(5)에 의하면 외부자기장에 대하여 자기감수율의 반치폭은 선형함수 형태로 존재하게 된다. 따라서 이 선형함수의 기울기 값을 구한다면, Gilbert 감쇠계수 α를 구할 수 있다. 외부자기장에 대한 30 nm 두께의 시료의 반치폭의 변화를 Fig. 4(a)에 전시하였다. 여기에서 파란색의 사각형 모양은 실험값, 파란색 실선은 식(4)로부터 구한 피팅값이다. Fig. 4(a)에서 보면, 60 kA/m 이하의 반치폭 값은 60 kA/m 이상에서의 반치폭 값과 경향성이 다른데, 이렇게 기울기가 달라지는 요인은 실험외적으로 인위적인 요인들로부터 생긴 것으로 생각된다. Fig. 1(b)에서 자기장이 적게 인가된 자기 감수율에서 자기감수율의 모양이 비대칭적으로 보이는데, 비대칭성이 자기감수율의 반치폭에 영향을 끼친것으로 생각이 된다. 실험적으로 자기 감수

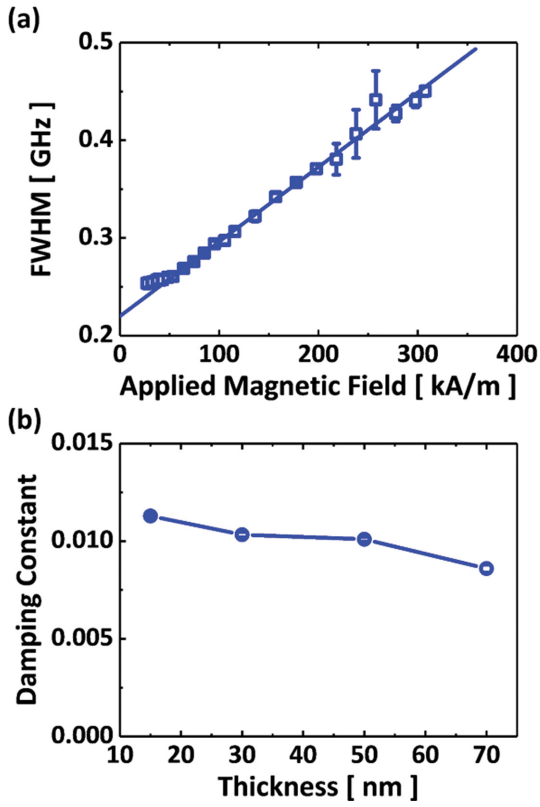

Fig. 4. (Color online) (a) The full width and half maximum values for 30-nm-thick $Ni_{81}Fe_{19}$ film as a function of an applied magnetic field. open squares are experimental results and the solid line is fitting. (b) The thickness dependent Gilbert damping constants were measured by VNA-FMR.

율이 비대칭적 모습을 보이는 것은 rf 자기장자 인가할 때 발생하는 rf 전기장과의 어긋난 위상(out of phase)효과일 수 있고[22], 또한 충분히 크지 못한 자기장의 경우 시료의 자화 상태가 균일하지 못하므로 반치 폭에 영향을 끼치게 될 수 있다[23]. 본 연구에서는 비대칭적 자기감수율의 원인을 분석하기 어려움이 있기 때문에, 실험외적 요인을 제외한 선형경향성을 가지고 있는 영역에서 감쇠계수를 결정했다. 30 nm 두께의 시료에서는 60 kA/m 이전에서는 선형으로 증가하는 경향성을 파악하기 어려우므로 60 kA/m 이상에서 구한 값으로 감쇠계수를 결정하였다. 두께 30 nm의 $Ni_{81}Fe_{19}$ 시료에 대해 α는 0.0103 ± 0.0001을 얻을 수 있었다. 이 값은 이전 연구를 통하여 얻은 값과 거의 비슷한 값[12]이다. Fig. 4(b)는 $Ni_{81}Fe_{19}$ 시료의 두께 변화에 대한 감쇠계수 값이다. α 값은 시료가 두꺼워짐에 따라 0.0113 ± 0.0001에서부터 0.0086 ± 0.0002로 작아지는 결과를 얻었다. 시료의 두께 변화에 대한 α의 평균값은 0.0101이고 표준편차는 0.0011으로서, 모든 두께에서 비슷한 α 값을 가지지만 시료의 두께가 두꺼워질수록 감쇠계수는 조금씩 감소하는 경향을 보인다. 이는 강자성체의 스핀이 열적 요동이나 외부의 요인(rf 자기장, 스핀 전류등)에 의해 강자성체에 인접한 비자성층으로 스핀전류를 펌핑하는 현상인 스핀 펌핑 편상에 의한 감쇠계수의 변화로 생각할 수 있다. 스핀 펌핑효과는 강자성층의 두께에 반비례하기 때문에 [24], 본 연구에서 시료의 두께가 두꺼워짐에 따라 감쇠계수가 감소하는 것은 스핀펌핑의 영향이라고 생각할 수 있다. 본 연구에서 수행한 BLS 및 VNA-FMR을 이용한 M_s, A_{ex}, α의 결정방법은 스핀파를 이용한 스핀파 소자의 연구, 자구의 생성/소멸 및 자벽의 크기분석에 이용될 뿐 아니라, STT-MRAM 등에서의 자화반전 전류밀도에 관한 연구에 이용될 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 DC 마그네트론 스퍼터링 방식으로 제작된 $Ni_{81}Fe_{19}$ 박막을 자화 동역학 측정방법인 BLS 방법과, CPW와 VNA를 이용한 강자성 공명방법을 이용하여 스핀파의 주파수를 측정하고 결과를 분석하여 $Ni_{81}Fe_{19}$ 박막에 대한 자성특성을 관찰하였다. $Ni_{81}Fe_{19}$ 박막에서 스핀파 주파수의 자기장에 대한 의존도와 박막 두께에 따른 주파수의 의존도를 알아보았으며, 스핀파의 주파수를 이용하여 포화자화 값, 교환 뻣뻣함 상수, Gilbert 감쇠계수 등을 구하였다. $Ni_{81}Fe_{19}$ 박막의 포화자화를 두께별로 구해본 결과 30 nm에서 최대값을 가지며, 두께가 두꺼워질수록 작아지는 결과를 확인 할 수 있었다. BLS를 이용하여 구한 값이 VNA-FMR를 이용하여 구한 값보다 모든 두께에서 작게 결정되었는데, 이는 J. F. Cochran의 연구 결과[18]에 따르면, BLS 측정시의 레이저에 의한 국소적 heating 효과로 이해할 수 있다. 또한 교환 뻣뻣함 상수와 Gilbert 감쇠 계수는 $Ni_{81}Fe_{19}$ 박막의 두께에 따라서 큰 차이를 가지고 있지 않았다. 본 연구에 이용된 BLS와 VNA-FMR를 이용한 자화 동역학의 연구 방법은 STT-MRAM에서의 자화반전 전류밀도에 영향을 끼치는 자성특성연구 및 스핀트로닉스 소자의 자성특성 뿐 아니라, 스핀파 소자, 자구의 생성/소멸, 자벽의 크기에 대한 연구에 이용될 수 있다.

감사의 글

이 논문은 교육부의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(No. NRF-2018R1D1A1B07051237, 2021R1A2C2007672) 및 DGIST 기관고유사업(21-ET-07)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

[1] A. Barman and J. Sinha (Ed), Spin dynamics and Damping in

Ferromagnetic Thin Films and Nanostructures, Springer (2018).
[2] H. Zabel and M. Farle (Ed), Magnetic Nanostructures, Spin Dynamics and Spin Transport (2013).
[3] M. G. Cottam (Ed.), Linear and nonlinear spin waves in magnetic films and superlattices, World Scientific (1994).
[4] C.-Y. You, Appl. Phys. Express **5**, 103001 (2012).
[5] S. M. Rezende, F. M. de Aguiar, and A. Azevedo, Phys. Rev. Lett. **94**, 037202 (2005).
[6] W. H. Rippard, M. R. Pufall, S. Kaka, S. E. Russek, and T. J. Silva: Phys. Rev. Lett. **92**, 027201 (2004).
[7] J. C. Slonczewski, J. Magn. Magn. Mater. **195**, L261 (1999).
[8] P. Grünberg, M. Cardona, and G. Güntherodt (Eds.), Light Scattering in Solids V, Springer-Verlag, Berlin (1989).
[9] C. Kittel, Introduction to Solid State Physics, Wiley, Eighth edition, pp. 379-382 (2005).
[10] J. R. Sanderock, in Light Scattering in Solid III, edited by M. Cardona and G. Guntherodt, Topics in Applied physics (Springer-Verlag, Berlin, 1982), vol. 51.
[11] D.-H. Kim, H.-H. Kim, and C.-Y. You, Appl. Phys. Lett. **99**, 072502 (2011).
[12] Y.-H. Shin, S.-S. Ha, D.-H. Kim, and C.-Y. You, J. Korean Magn. Soc. **20**, 18 (2010).
[13] D.-H. Kim, M.S. Thesis, Inha University, Korea (2011).
[14] J. Cho, J. Jung, K.-E. Kim, S.-I. Kim, S.-Y. Park, M.-H. Jung, and C.-Y. You, J. Magn. Magn. Mater. **339**, 36 (2013).
[15] J. Cho, J. Jung, S.-Y. Cho, and C.-Y. You, J. Magn. Magn. Mater. **395**, 18 (2015).
[16] K. Lee, J. Cho, C.-K. Lee, J. Kim, C.-Y. You, M. Byun, and J.-S. Kim, J. Magn. Magn. Mater. **512**, 167057 (2020).
[17] C. E. Patton, Phys. Rep. **103**, 251 (1984).
[18] J. F. Cochran, J. Magn. Magn. Mater. **210**, 42 (2000).
[19] Kevin S. Olsson, Kyongmo An, Xin Ma, Sean Sullivan, Vijay Venu, Maxim Tsoi, Jianshi Zhou, Li Shi, and Xiaoqin Li, Phys. Rev B **96**, 024448 (2017).
[20] John Robert Dutcher. Ph.D. Thesis, Simon Fraser University, Canada (1988).
[21] N.-H. Kim, Q. U. Ain, J. Kim, E. Baek, J.-S. Kim, H.-J. Park, H. Kohno, K.-J. Lee, S. S. H. Rhim, H.-W. Lee, and C.-Y. You, submitted.
[22] M. Harder, Z. X. Cao, Y. S. Gui, X. L. Fan, and C.-M. Hu, Phys, Rev. B **84**, 054423 (2011).
[23] K.-J. Lee, C.-Y. You, and H.-W. Lee, Current Driven Spin Dynamics, edited by H.-J. Kim, Magnetic Materials and Spintronics (The Korean Magnetic Society, Seoul, 2014), pp. 190-193.
[24] H. Nakayama, K. Ando, K. Harii, T. Yoshino, R. Takahashi, Y. Kajiwara, K. Uchida, Y. Fujikawa, and E. Saitoh, Phys. Rev. B **85**, 144408 (2012).