ISSN (Print) 1598-5385
ISSN (Online) 2233-6648
≪연구논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society 25(3), 74-78 (2015) http://dx.doi.org/10.4283/JKMS.2015.25.3.074

Analysis of Low Field Microwave Absorption Properties in CoFe/MnIr Thin Film

Dong Young Kim* and Seok Soo Yoon
Department of Physics, Andong National University, Andong, 760-749, Korea

(Received 10 June 2015, Received in final form 16 June 2015, Accepted 22 June 2015)

We measured the low field microwave absorption (LFMA) and ferromagnetic resonance (FMR) signals at various magnetic field angle in exchange biased CoFe/MnIr thin film. The LFMA signals were dominantly related to the magnetization rotation process. In order to analyze the LFMA signal, we calculated transverse magnetization (M_T) and permeability (μ_T) for CoFe/MnIr thin film by using S-W model, which magnetic parameters of exchange bias (H_{ex} = 58.5 Oe) and uniaxial anisotropy field (H_k = 30 Oe) was obtained from FMR signals. The LFMA signal at hard axis showed similar behavior compared with that of M_T. As the magnetic field angle approach to the perpendicular to hard axis, the LFMA signals were depending on both of M_T and μ_T.

Keywords : exchange bias, LFMA, ferromagnetic resonance, MH loop, susceptibility

CoFe/MnIr 박막 재료에서 저자장 마이크로파 흡수 특성 분석

김동영* · 윤석수
안동대학교 물리학과, 경북 안동시 경동로 1375, 760-749

(2015년 6월 10일 받음, 2015년 6월 16일 최종수정본 받음, 2015년 6월 22일 게재확정)

본 연구에서는 교환 결합력을 갖는 CoFe/MnIr 박막 재료에서 강자성 공명 장치를 이용하여 자기장 방향에 따른 저자장 마이크로파 흡수(Low field microwave absorption, LFMA) 및 강자성 공명 신호를 측정하였다. 낮은 자기장 영역에서 나타나는 LFMA 신호는 자구의 회전 밀접하게 관계됨을 자화 곡선으로부터 알 수 있었다. 이러한 LFMA 신호 특성을 분석하기 위하여 강자성 공명 신호로부터 측정한 교환 바이어스(H_{ex} = 58.5 Oe) 및 일축 이방성 자기장(H_k = 30 Oe)을 S-W model에 적용하여 자화 과정의 횡방향 자화량(transverse magnetization, M_T) 및 투자율(transverse susceptibility, μ_T)을 계산하였다. 자화 곤란축에서 측정된 LFMA 신호는 M_T 비례하는 경향을 보였지만, 자화 곤란축과 수직 방향으로 접근하면 M_T 및 μ_T 모두에 의존하는 특성을 보였다.

주제어 : 교환 바이어스, 저자장 마이크로파 흡수, 강자성 공명, 자화 곡선, 투자율

I. 서 론

자성체의 물성 분석을 위하여 자구를 포화시킨 상태에서 자기 스핀들의 세차운동과 마이크로파의 공명 조건을 만족하는 강자성 공명(ferromagnetic resonance, FMR) 측정법을 이용하고 있다. 마이크로파 흡수 특성이 최대가 되는 강자성 공명 자기장(H_{res})을 측정하여 자성체의 이방성 상수, g-factor 및 감쇠 상수 등을 얻는다[1-4]. 강자성 공명 자기장은 자성체의 포화자화량에 의존하며, NiFe과 CoFe의 경우 수평면에서 측정한 H_{res}는 약 1 kOe 및 약 0.6 kOe의 높은 자기장에서 관측된다[1, 2]. 한편, 강자성 공명 자기장 보다 낮은 0 Oe 부근에서 마이크로파 흡수 특성이 증가하는 또 다른 신호가 나타나고 있으며, 0 Oe 부근의 낮은 자기장에서 나타나는 마이크로파 흡수 신호를 저자장 마이크로파 흡수(low field microwave absorption, LFMA) 신호라고 부른다. LFMA 신호는 초전도체, 거대 자기임피던스 재료, 단일 자성 박막, 교환 결합력을 갖는 박막 및 GMR 박막 등 다양한 재료에서 측정되고 있으며, 자구의 회전 또는 스위칭을 LFMA의 원인으로 설명하고 있다[5-10]. 그러나 재료의 종류에 따라 LFMA 신호 특성을 다르게 분석하는 이유는 아직까지 LFMA의 원인이 명확하지 않기 때문이다. 따라서, 본 연구에서는 자구의 회전과 스위칭 과정 모두를 쉽게 관측할 수 있는 교환 결합력을 갖는 재료를 사용하여 LFMA의 원인 분석

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.
*Corresponding author: Tel: +82-54-820-5445,
Fax: +82-54-823-1628, e-mail: dykim@andong.ac.kr

에 사용하였다.

교환 결합력을 갖는 강자성(F)과 반강자성(AF) 박막은 F/AF 계면에 존재하는 스핀들 간의 상호작용에 의하여 교환 바이어스(exchange bias, H_{ex})가 나타난다. 이러한 교환 바이어스는 일방 이방성(unidirectional anisotropy) 특성을 보이므로 자기장 방향을 자화 용이축에서 자화 곤란축으로 회전 시키면 교환 바이어스가 $-H_{ex}$에서 $+H_{ex}$로 변화되며, 자화 용이축 방향의 교환 바이어스 부근 자기장에서 스위칭 특성을 보인다. 한편, 자화 용이축과 수직 방향 부근에서는 보자력 (H_c)이 사라지고 자구의 회전 특성만 나타나게 된다[11, 12]. 즉, F/AF 재료에서 자기장 방향을 회전시키면 자구의 회전과 스위칭 특성을 모두 볼 수 있을 뿐만 아니라 FMR과 LFMA 신호를 모두 관측할 수 있다. F/AF 재료의 자기장 방향에 따른 FMR 신호로부터 F의 일축 이방성 자기장 및 F/AF의 교환 바이어스를 얻을 수 있으며, 이들 결과를 활용하여 F/AF 재료의 자화의 회전과 스위칭에 관련된 자화 과정 분석이 가능하다.

본 연구에서는 교환 결합력을 갖는 CoFe/MnIr 재료를 사용하여 자기장 방향에 따른 FMR과 LFMA를 동시에 측정하였으며, Stoner-Wohlfarth(S-W) 모델을 사용하여 계산한 자화곡선(M-H loop), 횡방향 자화량(transverse magnetization, M_T) 및 횡방향 투자율(transverse permeability, μ_T) 특성과 LFMA 신호를 비교 분석하였다.

II. 실험방법

교환 결합력을 갖는 CoFe/MnIr 재료는 DC 마그네트론 스퍼터링 방법을 사용하여 열산화막이 있는 Si기판 위에 상온에서 증착하였다. seed층으로 Ta(5 nm)/Ru(5 nm)를 증착하였으며, 자성 박막의 표면 산화를 방지하기 위한 capping층으로 Ta(5 nm)/Ru(5 nm)를 증착하였다. 교환 바이어스 특성을 보유하기 위하여 MnIr 두께는 10 nm로 하였으며, CoFe의 두께는 30 nm로 하였다.

CoFe/MnIr 박막 재료의 마이크로파 흡수 파워(P) 특성인 dP/dH는 Bruker사의 Xepr 장치를 사용하여 9.89 GHz(X-band)의 고정 주파수에서 측정하였다. CoFe/MnIr 박막의 LFMA 특성과 자구의 변화 특성을 비교 분석하기 위하여 수평면(in-plane)에서 자기장 방향(θ_H)을 0에서 360°까지 10°씩 증가시킨 상태에서 자기장의 세기가 증가(increase) 및 감소(dearease) 과정에서 dP/dH를 측정하였다. 자기장 방향에 따른 FMR 신호부터 교환 바어어스 및 일축이방성 자기장을 분석하였으며, 이들 결과를 S-W 모델에 적용하여 자기장 방향에 따른 자화 곡선, 횡방향 자화량(M_T) 및 횡방향 투자율(μ_T)을 구하여 LFMA 신호 분석에 활용하였다.

III. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 자기장의 세기에 따른 마이크로파 흡수 파워(P)를 측정하기 위하여 9.89 GHz의 마이크로파 대역에서 작동하는 Bruker사의 Xepr 장치를 사용하였다. Xepr 장치는 진폭이 5.0 Oe인 100 kHz의 미소 교류 자기장을 재료에 인가하였으며, 교류 자기장과 동일한 주파수로 흡수되는 P를 Lock-in Amplifier을 사용하여 측정하였다. 따라서 Xepr 장치로 측정한 신호는 흡수되는 마이크로파 파워(P)를 미소 교류 자기장(H)으로 미분한 값이다. Fig. 1은 교환 결합력을 갖는 CoFe/MnIr 재료의 자화 곤란축 방향($\theta_H = 180°$)에서 자기장의 증가 및 감소에 따른 dP/dH를 측정한 결과를 보인다.

자기장의 세기가 200 Oe 이하에는 자기장의 증가와 감소 방향에 의존하는 이력 특성을 보이는 LFMA 신호가 나타나고 있다. 한편, 400~600 Oe의 자기장 영역에서는 FMR 신호가 나타나며, 최대값을 지난 후 신호의 크기가 영이 되는 자기장을 강자성 공명 자기장(H_{res})이라고 한다. CoFe/MnIr 박막 재료에서 자기장 영역에 따라 독립적으로 나타나는 LFMA와 FMR 신호는 마이크로파 흡수 특성에 기여하는 원인이 서로 다르다. FMR 신호는 자구가 포화된 상태에서 세차 운동을 하는 모든 자기 스핀들이 세차운동과 동일한 주파수의 마이크로파 에너지를 흡수하여 높은 에너지 준위로 여기 되는 공명 조건을 반영하므로 이력 특성이 나타나지 않는다. 한편, 낮은 자기장 영역에서 이력 특성을 보이는 LFMA 신호는 자화 곡선의 이력 특성과 관계됨을 알 수 있다.

본 연구에는 자기장의 방향에 따른 보자력(H_c) 및 교환 바이어스(H_{ex}) 특성과 관련된 자화곡선 분석이 용이한 CoFe/MnIr 박막을 사용하였다. 일방 이방성(unidirectional anisotropy) 특성을 갖는 CoFe/MnIr 재료에서 측정한 LFMA 신호와 자화

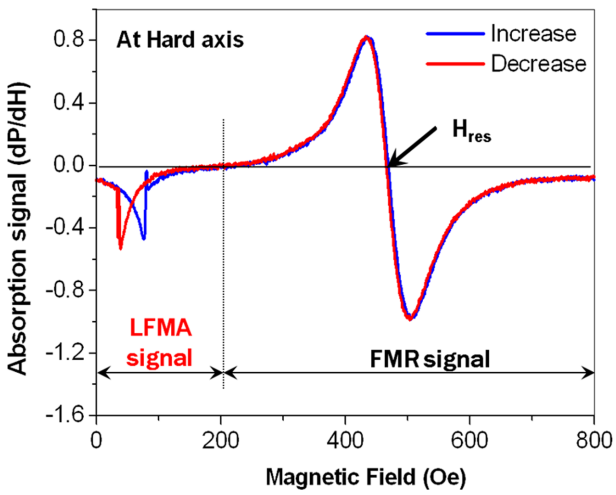

Fig. 1. (Color online) Measured microwave absorption signals (dP/dH) for CoFe/MnIr bilayers at hard axis ($\theta_H = 180°$).

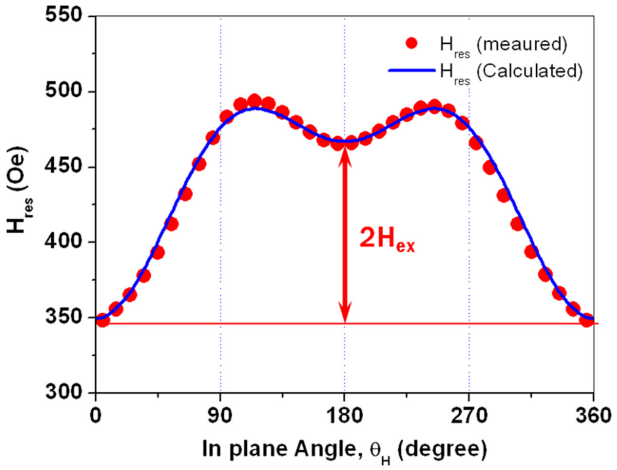

Fig. 2. (Color online) Angular dependence of ferromagnetic resonance field (H_{res}) for CoFe/MnIr bilayers. The solid line was fitted by Eq. (1).

과정을 비교 분석하기 위하여 S-W 모델을 사용하였다. CoFe/MnIr 재료의 자화 곡선 계산에 필요한 이방성 상수는 자기장 방향에 따른 FMR 신호 분석을 통하여 얻었다. Fig. 2는 자기장 방향에 따른 강자성 공명 자기장(H_{res})의 변화 특성을 보인다.

높은 포화 자화량을 갖는 CoFe/MnIr 박막에서 교환 바이어스 자기장(H_{ex}) 및 일축 이방성 자기장(H_k)은 유효 형상 이방성 자기장($4\pi M_{eff}$)에 비하여 상대적으로 매우 작다. 따라서 $4\pi M_{eff} >> H_{res} >> H_k$, H_{ex} 조건을 만족하므로 H_{res}는 다음과 같이 간단하게 표현된다[4].

$$H_{res} = \left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 \frac{1}{4\pi M_{eff}} - H_k \cos 2\theta_H - H_{ex}\cos\theta_H \qquad (1)$$

여기서 $\gamma = g\mu_B/\hbar$는 자기 스핀의 자이로 계수(gyromagnetic factor)이며, g, μ_B, 및 $\hbar$는 각각 g-factor, 보아 마그네톤 상수 및 플랑크 상수이다. 또한 ω는 마이크로파의 각주파수($\omega = 2\pi f$)이며, θ_H는 박막 재료의 수평면에서 자화 용이축으로부터 측정된 자기장의 방향을 나타낸다. Fig. 2에서 실선은 식(1)를 사용하여 계산한 결과이며, 계산 결과로부터 CoFe/MnIr 재료의 유효 포화 자화량은 $M_{eff} = 1673$ emu/cc, 일축 이방성 자기장은 $H_k = 34.2$ Oe 및 교환 바이어 자기장은 $H_{ex} = 58.6$ Oe의 값을 얻었다. 이들 측정 결과를 자화 곡선 및 투자율 특성 분석을 위한 S-W 모델에 적용하였다.

교환 바이어스 특성을 갖는 F/AF 재료의 자화 과정에 대하여 S-W 모델 분석을 위한 단위 면적당 에너지 밀도(E_T)는 다음과 같이 표현된다[12].

$$E_T = -HM_s t_F \cos(\phi_F - \theta_H) + K_F t_F \sin^2\phi_F + J_k \cos\phi_F \qquad (2)$$

여기서 M_s 및 K_F는 강자성층의 포화자화량 및 일축 이방성 상수 이며, J_k는 일방 이방성 상수이다. 포화 자화량 M_s는 강자성 공명 신호로부터 얻은 M_{eff}를 사용하고, 일축 이방성 자기장 $H_k = 2K_F/M_s$을 사용하였으며, 교환 바이어스 자기장은 J_k는 CoFe의 두께($t_F = 30$ nm) 및 M_s와 관련 지어 $J_k = H_{ex}M_s t_F$로부터 구하였다[12]. θ_H는 교환 바이어스 특성에 대한 자화 용이축으로부터 측정한 자기장의 방향을 나타내며, ϕ_F는 강자성층인 CoFe의 자화 방향을 나타낸다. CoFe/MnIr 재료에 자기장을 인가한 경우 CoFe의 자화는 에너지가 최소가 되는 방향으로 향하므로 ϕ_F에 대한 E_T의 일차 미분 값이 영이 되어야 한다. 따라서, 에너지 밀도가 최소가 되는 $\partial E_T/$

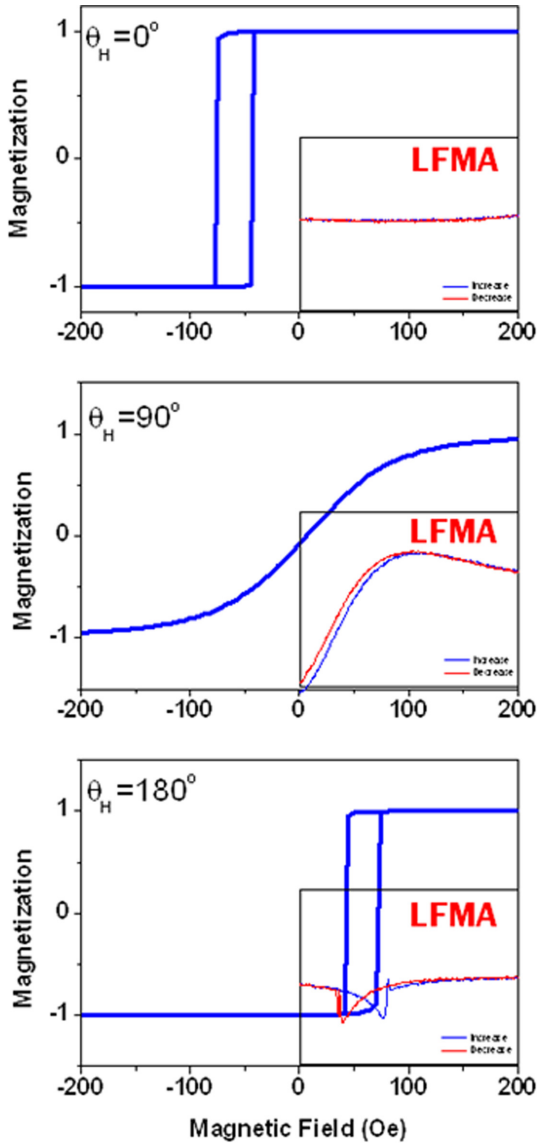

Fig. 3. (Color online) Calculated MH loops for CoFe/MnIr bilayers at magnetic field angles of $\theta_H = 0°$, 90° and 180°. The insert figures showed measured LFMA signals in the field range of 0 to 200 Oe.

$\partial\phi_F = 0$을 만족하는 조건으로부터 CoFe의 평형 자화 방향 ϕ_{Feq}를 구하여 CoFe/MnIr 재료의 자기장에 따른 자화 곡선을 계산하였다.

$$M(H) = M_s\cos\phi_{Feq} \tag{3}$$

평형 자화 방향을 이용하여 횡방향 자화 곡선(M_T)과 횡방향 투자율(μ_T)은 다음과 같이 각각 구하였다.

$$M_T(H) = M_s\sin\phi_{Feq} \tag{4-1}$$

$$\mu_T = \frac{dM_t}{dH} \tag{4-2}$$

CoFe/MnIr 재료에서 자기장 방향이 $\theta_H = 0^o$(easy axis), 90°, 180^o(hard axis)인 경우 각각에 대하여 자기장에 따른 LFMA 신호와 S-W 모델로 계산한 자화 곡선을 비교한 특성을 Fig. 3에서 보인다.

$\theta_H = 0^o$는 교환 결합력을 갖는 CoFe/MnIr 박막의 자화 용이축 방향을 의미하며, 자화 곡선은 음의 자기장 방향으로 치우쳐 $H_{ex} = -58.6$ Oe의 값을 가진다. 이때, 자기장의 세기가 $H > 0$ 영역에서 자화 곡선에서 보인 자화량은 포화자화량인 M_s의 값을 일정하게 유지하고 있으며 이러한 경우 LFMA 신호는 나타나지 않았다. $\theta_H = 90^o$는 자구의 회전이 일어나는 방향이므로 자화량은 자기장에 따라 연속적으로 증가하는 경향을 보이고 있으며, 이러한 경우 LFMA 신호 역시 연속적인 변화를 보인다. 이들 결과로부터 LFMA 신호는 자화량의 변화에 기인하는 특성임을 알 수 있다. 한편, $\theta_H = 180^o$는 교환 결합력을 갖는 CoFe/MnIr 박막의 자화 곤란축 방향을 의미하며, 자화 곡선은 양의 자기장 방향으로 치우쳐 $H_{ex} = +58.6$ Oe의 값을 가진다. 이때, 자화 곡선은 $H > 0$ 영역에서 스위칭이 일어나고 있으며, 스위칭이 일어나기 직전의 자기장 부근에서 LFMA 신호가 증가되는 특성을 볼 수 있다. 이는 자구의 스위칭이 일어나기 직전에 자구의 회전이 동반되고 있으며, 이러한 회전 자화량 증가가 LFMA 신호 증가에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 자구의 회전과 밀접하게 관련된 LFMA 신호 특성을 분석하기 횡방향 자화량 및 횡방향 투자율을 계산하였다. Fig. 4는 자기장의 방향이 $\theta_H = 90^o$, 140°, 180°, 220° 및 270^o에서 측정한 LFMA 신호와 각각의 자기장 방향에 대하여 S-W모델로 계산한 횡방향 자화량(M_T)과 횡방향 투자율(μ_T) 특성을 보인다.

자화 곤란축과 + 수직 방향($\theta_H = 90^o$)과 – 수직 방향($\theta_H = 270^o$)으로 자기장을 인가한 경우 측정된 LFMA 신호는 서로 반전된 결과를 보인다. 이러한 반전은 M_T 및 μ_T에서도 동일하게 나타났으며, 측정된 LFMA 신호는 M_T와 μ_T의 합으로 설명될 수 있음을 보인다. 또한 $\theta_H = 140^o$ 및 $\theta_H = 220^o$ 방향으로 자기장을 인가한 경우에서도 LFMA 신호는 서로 반전이 일어났으며, 이 경우 LFMA 신호는 M_T와 μ_T의 합에 비례하는 경향을 보인다. 한편, 자화 곤란축인 $\theta_H = 180^o$ 방향으로 자기장을 인가한 경우 LFMA 신호는 M_T에 비례하는 경

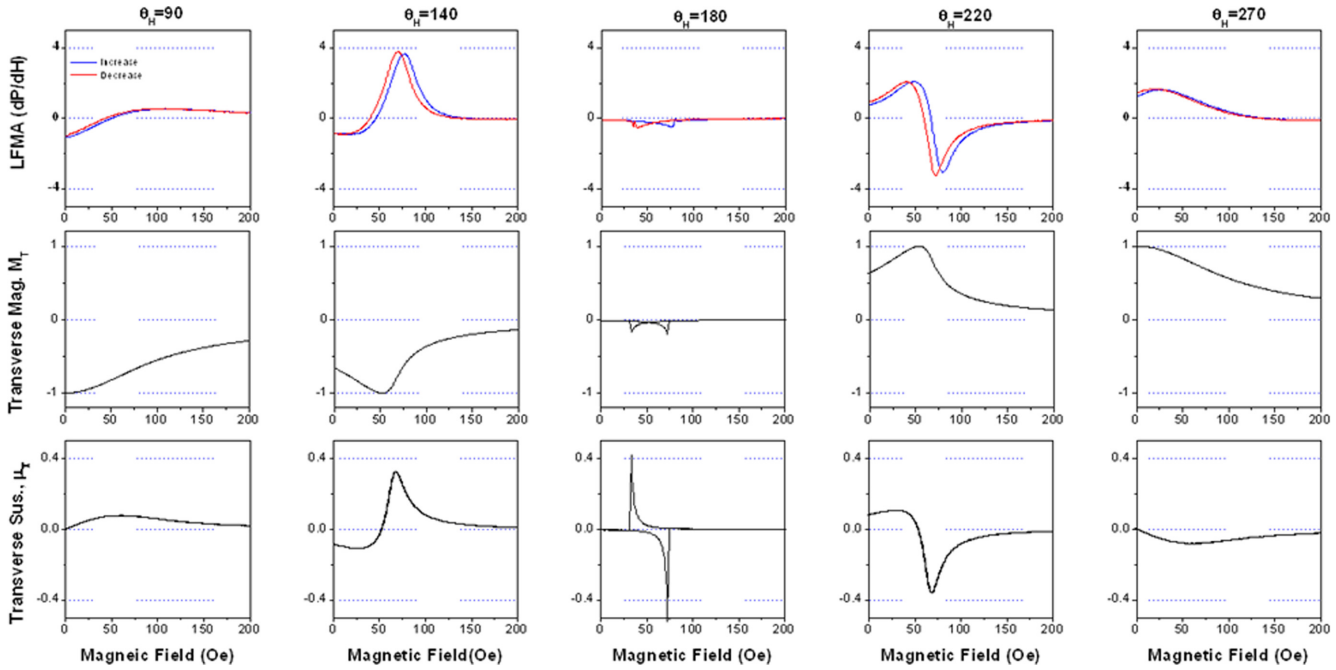

Fig. 4. (Color online) Measured LFMA signals, calculated transverse magnetization (M_T) and transverse permeability (μ_T) at magnetic field angles of $\theta_H = 90^o$, 140°, 180°, 220° and 270°, respectively.

향을 보인다. 이들 결과로부터 LFMA 신호는 M_T와 μ_T에 의존하는 경향이 있음을 알 수 있으며, 자기장 방향에 따라서 M_T와 μ_T의 비례 특성이 달라짐을 알 수 있다.

IV. 결　　론

본 연구에서는 교환 결합력을 갖는 CoFe/MnIr 박막을 사용하여 자기장 방향에 따른 저자장 마이크로파 흡수(LFMA) 및 강자성 공명 신호를 함께 측정하였다. 낮은 자기장 영역에서 나타나는 LFMA 신호는 자구의 포화 자기장 이상에서 나타나는 강자성 공명 신호와 달리 자구의 회전 또는 스위칭이 일어나는 자기장 영역에서 나타났다. 이러한 LFMA 신호와 자화 과정을 비교 분석하기 위하여 S-W 모델을 사용하였다.

강자성 공명 신호로부터 측정한 교환 바이어스(H_{ex} = 58.5 Oe) 및 일축 이방성 자기장(H_k = 30 Oe)을 S-W model 계산에 적용하여 자기장 방향에 따른 횡방향 자화량(M_T) 및 횡방향 투자율(μ_T)을 계산하였다. 교환 바이어스 특성을 갖는 CoFe/MnIr 박막에서 자화 곤란축 방향(θ_H = 180°)에서 측정된 LFMA 신호는 자구의 스위칭이 일어나는 자기장 부근에서 크게 나타났으며, 계산으로 구한 M_T와 동일한 변화 특성을 보였다. 또한, 자화 곤란축과 수직 방향인 θ_H = 90°와 θ_H = 270°에서 측정한 LFMA 신호는 서로 반전되어 나타났으며, S-W model 계산으로 구한 M_T 및 μ_T를 합한 특성과 유사한 결과를 보였다. 한편, 임의의 자기장 방향인 θ_H = 140°와 θ_H = 220°에서 측정한 LFMA 신호 역시 서로 반전되어 나타났으며, S-W model 계산으로 구한 μ_T 변화와 유사한 경향을 보였다. 이들 결과로부터 LFMA 신호는 M_T와 μ_T에 의존하는 경향이 있음을 알 수 있었으며, 자기장 방향에 따라서 M_T와 μ_T의 비례 특성이 달라짐을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (NRF2010-0008282).

References

[1] D. Y. Kim and S. S. Yoon, J. Kor. Mag. Soc. **23**, 37 (2013).
[2] D. Y. Kim, Sae Mulli **58**, 308 (2009).
[3] S. Misukami, Y. Ando, and T. Miyazaki, Jpn. J. Appl. Phys. **40**, 580 (2001).
[4] S. Yuan, K. Yu, L. M. Yu, S. X. Cao, C. Jing, and J. C. Zhang, J. Appl. Phys. **101**, 113915 (2007).
[5] G. Alvareza, H. Montielb, M. A. Castellanosc, J. Heirasd, and R. Zamoranoa, Mater. Chem. Phys. **130**, 587 (2011).
[6] H. Montiel, G. Alvarez, I. Betancourt, R. Zamorano, and R. Valenzuela, Appl. Phys. Lett. **86**, 072503 (2005).
[7] L. Spinu, I. Dumitru, A. Stancu, and D. Cimpoesu, J. Magn. Magn. Mater. **296**, 1 (2006).
[8] H. Gavi, B. D. Ngomb, A. C. Beye, A. M. Strydom, V. V. Srinivasun, M. Chaker, and N. Manyala, J. Magn. Magn. Mater. **324**, 1172 (2012).
[9] J. Lee, J. Kim, and K. H. Kim, Phys. Status Solidi A **211**, 1900 (2014).
[10] J. Kim, J. Kim, and K. H. Kim, Current Appl. Phys. **14**, 548 (2014).
[11] J. Camarareo, J. Sort, A. Hoffmann, J. M. Garcia-Martin, B. Dieny, R. Miranda, and J. Nogues, Phys. Rev. Lett. **95**, 057204 (2005).
[12] D. Y. Kim, C. G. Kim, C. O. Kim, M. Shibata, M. Tsunoda, and M. Takahashi, IEEE Trans. Magn. **41**, 2712 (2005).