

Angular Dependence of Ferromagnetic Resonance Linewidth in Exchange Coupled CoFe/MnIr Bilayers

Seok Soo Yoon and Dong Young Kim*

Department of Physics, Andong National University, Andong 36729, Korea

(Received 4 April 2016, Received in final form 11 April 2016, Accepted 18 April 2016)

We analyzed the angular dependence of ferromagnetic resonance linewidth in exchange coupled CoFe/MnIr bilayers. The maximum and minimum linewidth was observed in the easy and hard direction of unidirectional anisotropy by exchange coupling, respectively, and it was well agreed with the angular dependence of exchange bias field. The maximum linewidth was due to the twist of CoFe magnetization near CoFe/MnIr interface from direction of pinned MnIr spin to direction of applied magnetic field. While, minimum linewidth more higher than that of CoFe was related to rotatable anisotropy field, and explained by easy axis distribution of MnIr grains.

Keywords : ferromagnetic resonance, linewidth, exchange bias, rotatable anisotropy, AF grain

교환 결합력을 갖는 CoFe/MnIr 박막에서 강자성 공명 선폭의 각도 의존성 연구

윤석수 · 김동영*

안동대학교 물리학과, 경북 안동시 경동로 1375, 36729

(2016년 4월 4일 받음, 2016년 4월 11일 최종수정본 받음, 2016년 4월 18일 게재확정)

본 연구에서는 교환 결합력을 갖는 CoFe/MnIr 박막 재료의 각도에 따른 강자성 공명 선폭 변화 특성을 분석하였다. 선폭의 최대 및 최소값은 교환 결합력에 의한 일방 이방성의 자화 곤란축 및 용이축 방향에서 각각 관측되었으며, 고정된 MnIr의 스핀에 의한 교환 바이어스 자기장의 각도 의존성과 일치하였다. 따라서, 최대 선폭은 고정된 MnIr 스핀의 반대 방향에서 자기장 방향으로 꼬여있는(twist) CoFe의 자화에 기인한다. 한편, CoFe 단일 박막에 비하여 증가된 최소 선폭은 각도 의존성이 없는 회전 이방성 자기장과 관련되며, 선폭 증가의 원인은 MnIr 입도의 자화 용이축 분포 특성으로 설명된다.

주제어 : 강자성 공명, 선폭, 교환 바이어스, 회전 이방성, 반강자성체 입도

I. 서 론

교환 결합력은 강자성체(F)와 반강자성체(AF)의 계면에서 비상보성(uncompensated) AF 스핀과 F 스핀들 사이의 상호작용으로 나타난다. F/AF 계면에 있는 AF층의 비상보성 스핀들이 임계 두께 이상에서 한쪽 방향으로 고정된 경우, AF 스핀들에 의한 일방 이방성(unidirectional anisotropy) 에너지는 교환 바이어스(exchange bias, EB)를 유발하여 자화곡선을 한쪽 방향으로 치우치게 한다[1-4]. 한편, AF층이 임계 두께 이하인 경우, 교환 결합력에 의하여 F층의 자화 방향과 반대로 정렬된 AF 스핀들은 F층의 회전 방향에 따라 회전하며, 등방성

특성을 갖는 회전 이방성(rotatable anisotropy, RA) 에너지를 유발한다[5, 6]. F와 AF가 함께 움직이는 F/AF의 이방성 에너지는 F의 이방성 에너지와 AF의 등방성 에너지가 결합된 형태로 나타난다. AF의 등방성 에너지는 연자성 재료를 사용한 F의 이방성 에너지 보다 크므로 F-AF의 유효 이방성 에너지는 증가하게 된다. 그러므로 임계 두께 이하의 F/AF 박막에서 나타나는 자화곡선의 보자력 증가는 등방성 에너지를 갖는 AF층이 존재하고 있음을 의미한다. 일반적으로 교환 결합력을 갖는 F/AF 박막에서 AF층은 나노 크기의 입도(grain)들로 구성되며, 임계 두께 이상으로 증착한 경우에도 임계 두께 이상의 입도와 임계 두께 이하의 입도가 혼재하여 교환 바이어스 특성과 보자력 증가 특성이 함께 나타난다[5, 6].

강자성 공명(ferromagnetic resonance, FMR) 공명 장치는 강자성 공명 신호를 측정하여 마이크로파 흡수 특성이 최대

가 되는 강자성 공명 자기장 H_{res} 로부터 자성 재료의 이방성 에너지 분석에 이용한다. 또한 강자성 공명 신호의 선폭 ΔH_{pp} 로부터 스핀들의 감쇠 특성, 자화량의 균질성 및 용이축 방향의 분포 분석 등에 이용되고 있다[6-9]. 이러한 FMR 장치를 사용하여 F/AF 박막 재료의 각도에 따른 강자성 공명 자기장의 측정 결과로부터 AF 스핀의 고정에 의한 교환 바이어스 자기장 및 AF 스핀의 회전에 의한 회전 이방성 자기장을 분석하고 있다[5, 6]. F/AF 재료에서 측정된 강자성 공명 신호의 선폭은 F 재료의 선폭보다 증가하는 경향을 보이고 있다[10]. 이러한 선폭 증가는 재료 내부에 존재하는 결합에 의하여 산란되는 스핀파의 영향으로 two-magnon 산란으로 해석되고 있다[10]. 그러나 F/AF 재료는 교환 바이어스와 회전 이방성 특성을 모두 보유하고 있으며, 이들 두 가지 특성이 선폭 변화에 미치는 영향에 대한 분석은 미진하다.

본 연구에서는 교환 결합 특성이 우수한 CoFe/MnIr 재료에서 각도에 따른 강자성 공명 자기장 및 공명 신호의 선폭을 측정하였으며, 교환 바이어스 자기장과 회전 이방성 자기장이 선폭 변화에 미치는 영향을 비교 분석하였다.

II. 실험 방법

교환 결합력을 갖는 CoFe/MnIr 재료는 DC 마그네트론 스퍼터링 방법을 사용하여 열산화막이 있는 Si 기판 위에 상온에서 증착하였다. 하지층으로 Ta(5 nm)/Ru(5 nm)를 증착하였으며, 자성 박막의 표면 산화 방지를 위한 보호층으로 Ta(5 nm)/Ru(5 nm)를 증착하였다. 교환 바이어스 특성을 비교 분석하기 위하여 MnIr 두께는 $t_{AF} = 0$ 및 10 nm로 하였으며, CoFe 두께는 30 nm로 하였다. 교환 결합력 특성을 최적화하기 위하여 300 °C에서 1시간 동안 1 kOe의 자기장에서 진공 자기장 열처리를 수행하였다.

CoFe/MnIr 박막의 강자성 공명 신호는 9.89 GHz(X-band)의 주파수에서 운용되는 Bruker Xepr를 사용하여 측정하였다. 각도 의존성을 분석하기 위하여 수평면(in-plane)에서 자기장 방향(θ_H)을 0에서 360°까지 10°씩 증가시킨 후 자기장에 따른 강자성 공명 신호를 측정하였다. 강자성 공명 신호로부터 강자성 공명 자기장 H_{res} 와 강자성 공명 선폭 ΔH_{pp} 를 각각 도출하였다. H_{res} 의 각도 의존성으로부터 일축 이방성(uniaxial anisotropy) 자기장 H_k , 교환 바이어스 H_{EB} 및 회전 이방성 자기장(rotatable anisotropy, RA) H_{RA} 등 이방성 특성 분석에 활용하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

본 연구는 교환 결합력을 갖는 강자성체/반강자성체 박막

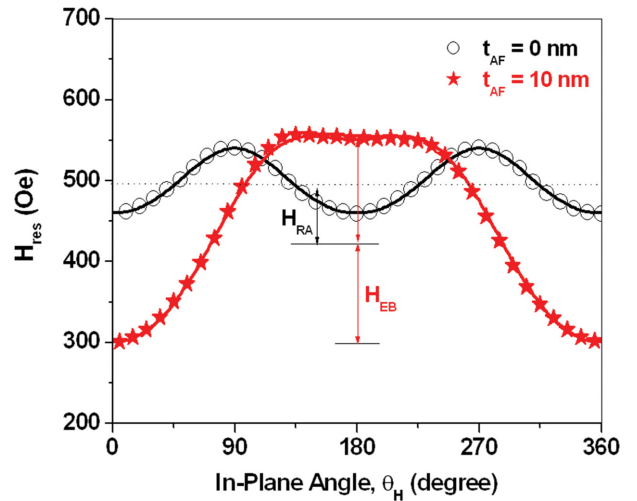


Fig. 1. (Color online) Angular dependence of ferromagnetic resonance field (H_{res}) for $t_{AF} = 0$ and 10 nm in CoFe(30 nm)/MnIr(t_{AF}) bilayers. The solid lines were fitted by Eq. (1).

인 CoFe/MnIr 재료의 각도에 따른 강자성 공명 신호의 선폭 특성을 분석하였다. 강자성체 특성을 분석하기 위하여 $t_{AF} = 0$ 인 CoFe(30 nm) 재료를 사용하였으며, 교환 결합력 특성을 분석하기 위하여 $t_{AF} = 10$ nm인 CoFe(30 nm)/MnIr(10 nm) 재료를 각각 사용하였다. 각도 의존성을 분석하기 위하여 일축 이방성 특성을 갖는 CoFe 박막 재료와 일방 이방성 특성을 갖는 CoFe/MnIr 재료의 자화 용이축 방향을 $\theta_H = 0^\circ$ 로 각각 설정하였다. 설정된 기준 방향으로부터 박막 재료의 수평면 각도를 10°씩 회전시킨 후, 자기장의 세기에 따른 강자성 공명 신호를 측정하였다.

Fig. 1에서 보인 원형 표식(○)과 별표 표식(*)은 $t_{AF} = 0$ 과 $t_{AF} = 10$ nm 재료에서 각각 측정된 강자성 공명 자기장 H_{res} 의 각도 의존성을 나타낸 것이다. 포화 자화량이 큰 연자성 박막 재료는 유효 형상 이방성 자기장($4\pi M_{eff}$)이 유효 이방성 자기장 보다 매우 크다. 이러한 경우, H_{res} 는 다음과 같이 간단한 근사식으로 표현된다[9].

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

여기서 γ 는 자기 스핀의 자이로 계수(gyromagnetic factor)이고, $\omega (=2\pi f)$ 는 마이크로파의 각주파수이며, θ_H 는 박막 재료의 수평면에서 자화 용이축으로부터 측정된 자기장의 방향이다. 본 연구에서는 $t_{AF} = 0$ 과 $t_{AF} = 10$ nm 재료의 일축 이방성 자기장 H_k , 일방 이방성 특성을 갖는 교환 바이어스 H_{EB} 및 방향성이 없는 회전 이방성 자기장 H_{RA} 를 각각 구하기 위하여 식(1)을 사용하였다.

Fig. 1에서 보인 실선은 $t_{AF} = 0$ 과 $t_{AF} = 10$ nm 재료에서 각각 측정된 각도에 따른 H_{res} 를 식(1)을 사용하여 계산한 결

과이다. 이들 계산 결과로부터 기준 재료로 사용한 CoFe 박막과 교환 결합력을 갖는 CoFe/MnIr 재료의 이방성 자기장 특성을 도출하였다. $t_{AF} = 0$ 인 CoFe 박막의 $H_k = 40$ Oe이었으며, 유효 포화 자화량 $M_{eff} = 1680$ emu/cc를 얻었다. 한편, $t_{AF} = 10$ nm인 CoFe/MnIr 재료의 $H_k = 28$ Oe, $H_{EB} = 134$ Oe 및 $H_{RA} = 44$ Oe의 값을 얻었다.

CoFe/MnIr 박막 재료에서 MnIr의 임계 두께는 약 3 nm이다[11]. 따라서 CoFe/MnIr 박막 재료의 교환 바이어스는 $t_{AF} > 3$ nm일 때 고정된 비상보성 AF 스핀에 의한 효과이며, 회전 이방성 자기장은 $t_{AF} < 3$ nm일 때 일 때 고정되지 않은 비상보성 AF 스핀에 의해 나타난다. 그러나 Fig. 1에서 보인 $t_{AF} = 10$ nm 박막 재료는 교환 바이어스와 회전 이방성 자기장을 모두 보였다. 이는 CoFe/MnIr 박막 재료에서 MnIr 입도들은 고정된 비상보성 AF 스핀들과 고정되지 않은 비상보성 AF 스핀들이 혼재되어 MnIr 박막을 형성하고 있음을 의미한다. 특히, 고정되지 않은 비상보성 AF 스핀들에 의한 회전 이방성 자기장은 일축 이방성 자기장을 감소시키는 특성으로 나타날 수 있다. 따라서 $t_{AF} = 10$ nm 박막 재료의 일축 이방성 자기장이 $t_{AF} = 0$ 박막에 비하여 약 12 Oe 줄어든 원인은 등방성 특성을 갖는 회전 이방성 자기장의 영향으로 보인다. CoFe/MnIr 박막 재료의 일축 이방성 자기장, 교환 바이어스와 회전 이방성 자기장은 강자성 공명 신호의 선폭 변화 특성에 영향을 준다.

Fig. 2에서 보인 원형 표식(○)과 별표 표식(*)은 $t_{AF} = 0$ 과 $t_{AF} = 10$ nm 재료에서 각각 측정된 선폭 ΔH_{pp} 의 각도 의존성을 나타낸 것이다. $t_{AF} = 0$ 재료의 ΔH_{pp} 는 각도에 따른 변화가 미미하게 나타났다. 그러나 $t_{AF} = 10$ nm 재료에서는 교환 바이어스를 결정하는 일방 이방성 에너지의 자화 용이

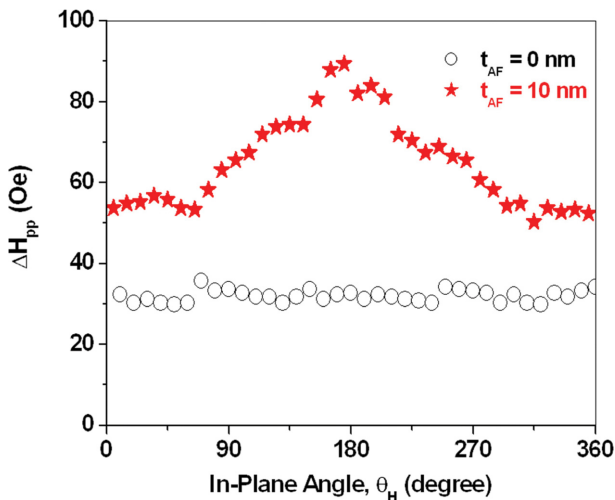


Fig. 2. (Color online) Angular dependence of linewidth (ΔH_{pp}) for $t_{AF} = 0$ and 10 nm in CoFe(30 nm)/MnIr(t_{AF}) bilayers.

축인 $\theta_H = 0^\circ$ 과 $\theta_H = 360^\circ$ 에서는 ΔH_{pp} 가 최소값을 보였으며, 자화 곤란축인 $\theta_H = 180^\circ$ 에서는 ΔH_{pp} 가 최대값을 보였다. $t_{AF} = 10$ nm 재료에서 보인 ΔH_{pp} 의 각도 의존성은 교환 바이어스의 각도 의존성과 유사한 경향을 보였다.

교환 결합력이 선폭 변화에 미치는 영향을 분석하기 위하여 $t_{AF} = 10$ nm과 $t_{AF} = 0$ 재료에서 측정된 ΔH_{pp} 의 차를 ΔH_{pp}^{EC} 로 정의하였다. Fig. 1에서 보인 것과 같이 $t_{AF} = 10$ nm 재료에서 교환 결합력에 이방성 특성은 교환 바이어스와 회전 이방성 자기장으로 나타났다. 따라서, 이들 영향을 반영하는 ΔH_{pp}^{EC} 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta H_{pp}^{EC} = \Delta H_{pp}(RA) + \Delta H_{pp}(EB) \quad (2)$$

자화 용이축에서 최소값을 자화 곤란축에서 최대값을 보인 ΔH_{pp} 의 각도 의존성을 교환 바이어스에 의한 영향으로 분석할 경우 ΔH_{pp}^{EC} 의 각도 의존성은 $\sin^2(\theta_H/2)$ 에 비례하여야 한다. 그러나, 측정된 ΔH_{pp}^{EC} 는 Fig. 3에서 보인 것과 같이 $\sin^4(\theta_H/2)$ 에 비례하였다. 따라서 교환 바이어스가 선폭에 미치는 영향인 $\Delta H_{pp}(EB)$ 는 $2H_{EB}\sin^2(\theta_H/2)$ 에 비례하는 것으로 표현될 수 있다.

$$\Delta H_{pp}(EB) = k_{EB}(2H_{EB})\sin^4(\theta_H/2) \quad (3)$$

여기서 k_{EB} 는 교환 바이어스가 선폭에 미치는 영향을 나타내는 비례 상수이다. $2H_{EB}$ 는 자화 용이축과 자화 곤란축에서 측정된 교환 바이어스의 각도 의존성의 최대 폭을 나타낸다.

자화 용이축에서 측정된 ΔH_{pp}^{EC} 는 각도 의존성이 없는 회전 이방성의 영향으로 해석될 수 있다. 따라서 회전 이방성의 선폭에 미치는 영향인 $\Delta H_{pp}(RA)$ 는 H_{RA} 에 비례하는 것으로 표

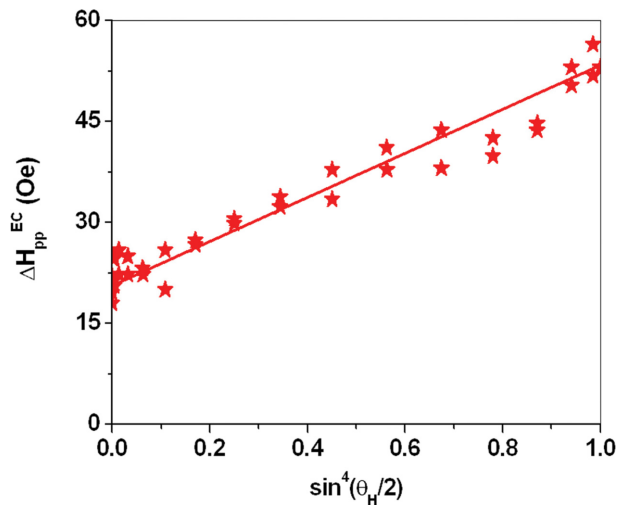


Fig. 3. (Color online) Linear relationship between ΔH_{pp}^{EC} and $\sin^4(\theta_H/2)$. ΔH_{pp}^{EC} was the linewidth difference of CoFe and CoFe/MnIr(10 nm) bilayers.

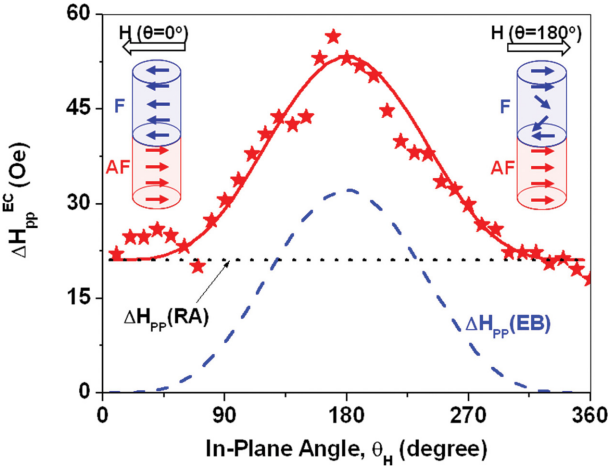


Fig. 4. (Color online) Angular dependence of ΔH_{PP}^{EC} . The solid line was fitted by Eq. (2). The dot and dash lines were calculated by Eqs. (3) and (4) for $\Delta H_{PP}(RA)$ and $\Delta H_{PP}(EB)$, respectively. The insert figures indicate the twist of CoFe magnetization near CoFe/MnIr interface at $\theta_H = 0^\circ$ and $\theta_H = 180^\circ$, respectively.

현될 수 있다.

$$\Delta H_{PP}(RA) = k_{RA} H_{RA} \tag{4}$$

여기서 k_{RA} 는 회전 이방성이 선폭에 미치는 영향을 나타내는 비례 상수이다.

Fig. 4에서 보인 별표 표식(*)은 ΔH_{PP}^{EC} 의 각도 의존성을 나타낸 것이며, 실선은 식(2)를 사용하여 계산한 결과이다. 점선과 일점 쇄선으로 나타낸 $\Delta H_{PP}(RA)$ 와 $\Delta H_{PP}(EB)$ 는 식(3)과 (4)를 사용하여 각각 계산한 결과이다. 측정된 ΔH_{PP}^{EC} 와 가장 적절하게 부합되는 k_{EB}/k_{RA} 는 1/4이었다. 이는 교환 바이어스가 선폭에 미치는 영향이 회전 이방성이 미치는 영향에 비하여 4배 작다는 것을 의미하며, 교환 바이어스에 의한 선폭 변화 특성은 회전 이방성에 의한 영향 보다 미미하게 나타남을 알 수 있다. 선폭은 분해능이 낮은 측정 방법이다. 따라서 교환 바이어스에 의한 ΔH_{PP}^{EC} 의 각도 의존성을 분석하기 위해서는 회전 이방성 자기장이 작고 교환 바이어스가 커야 된다.

교환 바이어스에 의한 ΔH_{PP}^{EC} 의 각도 의존성은 Fig. 4에 삽입한 그림으로부터 분석할 수 있다. 자화 용이축 방향($\theta_H = 0^\circ$)에서 최소값을 보인 선폭은 CoFe의 자화 방향이 MnIr의 비상보성 스핀과 반대 방향으로 정렬되기 때문이다. 즉, CoFe의 모든 자구가 동일한 방향으로 정렬되므로 선폭이 줄어든다. 그러나 자화 곤란축 방향($\theta_H = 180^\circ$)는 MnIr의 비상보성 스핀에 의하여 CoFe/MnIr의 계면에서는 CoFe 자화가 MnIr의 스핀과 반대 방향으로 정렬되지만, 계면에서 멀어지면 CoFe의 자화가 자기장 방향으로 꼬여있는(twist) 형태를 형성한다. 따라서, 꼬여있는 CoFe의 자화 방향이 선폭을 증가시키는 원인으로 작용한다.

한편, 각도 의존성이 없는 회전 이방성은 임계 두께 이하의 MnIr 표면에 있는 비상보성 스핀이 CoFe 자구와 함께 회전하는 특성이다. 이때 CoFe의 자구는 자화 용이축 방향($\theta_H = 0^\circ$)에서 나타나는 각도 특성과 같다. 이러한 경우 회전 이방성에 의한 선폭은 CoFe의 선폭과 같아야 한다. 그러나 측정된 ΔH_{PP}^{EC} 에서 각도 의존성이 없는 선폭은 CoFe 단일 박막의 선폭에 비하여 증가되어 나타났다. 이러한 선폭 증가는 CoFe 자화의 꼬임과 관련되며, 이러한 CoFe 자화의 꼬임이 회전 이방성 특성에 반영되어 있음을 알 수 있다.

MnIr은 입도(grain)로 구성되어 있으며, MnIr 입도의 일축 이방성은 무작위 방향으로 배열되어 있다[11]. 이러한 경우 비상보성 스핀은 교환 결합력에 의하여 CoFe 자구의 반대 방향으로 정렬되려고 하지만, MnIr 입도의 무작위한 용이축 방향으로 인하여 교환 바이어스의 용이축에서 벗어난 각도로 정렬한다. MnIr 입도의 용이축 방향의 무작위한 분포는 선폭의 증가 특성으로 나타날 수 있다. 따라서, 각도 의존성이 없는 회전 이방성 자기장과 관련된 $\Delta H_{PP}(RA)$ 의 선폭 증가의 원인은 MnIr 입도의 자화 용이축 분포 특성과 관련된다.

F/AF 재료의 선폭 증가는 F/AF의 계면에 작용하는 교환 결합력 특성에 기인한다. 따라서 교환 결합력을 갖는 F/AF 재료의 선폭 증가 특성 분석은 F/AF 재료의 계면 특성뿐만 아니라 AF 입도의 이방성 특성 분석에 활용할 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 기준으로 사용한 $t_{AF} = 0$ 인 CoFe(30 nm) 박막 재료와 교환 결합력을 갖는 CoFe(30 nm)/MnIr($t_{AF} = 10$ nm) 박막 재료의 각도에 따른 강자성 공명 신호를 측정하여 강자성 공명 자기장과 선폭 특성을 비교 분석하였다. $t_{AF} = 10$ nm 재료에서 측정된 교환 바이어스 $H_{EB} = 134$ Oe였으며, 회전 이방성 자기장 $H_{RA} = 44$ Oe를 얻었다. 교환 결합력을 갖는 재료의 선폭은 교환 결합력이 없는 CoFe 재료보다 증가하였으며, 자화 용이축 방향에서 최대값을 보였다.

교환 결합력이 선폭의 각도 의존성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 $t_{AF} = 10$ nm 재료에서 측정된 선폭과 $t_{AF} = 0$ 재료에서 측정된 선폭의 차를 ΔH_{PP}^{EC} 로 정의하였다. ΔH_{PP}^{EC} 는 교환 바이어스와 회전 이방성 특성을 반영하고 있었다. 교환 바이어스에 의한 선폭 변화 특성은 $2H_{EB}\sin^4(\theta_H/2)$ 에 비례하였으며, 각도 의존성이 없는 선폭 증가는 회전 이방성 자기장 H_{RA} 에 비례하였다. 교환 결합력을 갖는 CoFe/MnIr 재료에서 교환 바이어스가 선폭에 미치는 영향은 회전 이방성 자기장에 의한 영향보다 4배 작았다.

교환 바이어스에 의한 최대 선폭은 고정된 MnIr 스핀의 반대 방향에서 자기장 방향으로 꼬여있는(twist) CoFe의 자화

방향에 기인한다. 한편, CoFe 단일 박막에 비하여 증가된 최소 선풍은 각도 의존성이 없는 회전 이방성 자기장과 관련되며, 선풍 증가의 원인은 MnIr 입도의 자화 용이축 분포 특성으로 설명된다. F/AF 재료의 선풍 ΔH_{pp} 는 F/AF의 계면에 작용하는 교환 결합력 특성에 기인한다. 따라서 교환 결합력을 갖는 F/AF 재료의 선풍 ΔH_{pp} 의 특성 분석은 F/AF 재료의 계면 특성뿐만 아니라 AF 입도의 이방성 특성 분석에 활용될 수 있다.

감사의 글

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

References

[1] W. H. Meiklejohn and C. P. Bean, Phys. Rev. **102**, 1413

(1956).
 [2] W. H. Meiklejohn, J. Appl. Phys. **33**, 1328 (1962).
 [3] K. I. Imakita, M. Tsunoda, and M. Takahashi, Appl. Phys. Lett. **85**, 3182 (2004).
 [4] M. Tsunoda, T. Sato, T. Hashimoto, and M. Takahashi, Appl. Phys. Lett. **84**, 5222 (2004).
 [5] D. Y. Kim, J. Korean Magn. Soc. **22**, 204 (2012).
 [6] D. Y. Kim, Sae Mulli **58**, 308 (2009).
 [7] D. Y. Kim and S. S. Yoon, J. Korean Magn. Soc. **23**, 37 (2013).
 [8] S. Misukami, Y. Ando, and T. Miyazaki, Jpn. J. Appl. Phys. **40**, 580 (2001).
 [9] S. Yuan, K. Yu, L. M. Yu, S. X. Cao, C. Jing, and J. C. Zhang, J. Appl. Phys. **101**, 113915 (2007).
 [10] R. L. R. Suarez, L. H. V. Leao, T. Bueno, A. B. Oliveira, J. R. L. de Almeida, P. Landeros, S. M. Rezende, and A. Azevedo, Phys. Rev. B **83**, 224418 (2011).
 [11] D. Y. Kim and S. S. Yoon, J. Korean Magn. Soc. **24**, 140 (2014).