

## Angular Dependence of Exchange Bias in NiFe/MnIr Bilayers

Seok Soo Yoon and Dong Young Kim\*

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

(Received 5 February 2017, Received in final form 13 February 2017, Accepted 13 February 2017)

In this report, we calculated the angular dependence of exchange bias ( $H_{ex}$ ) by using single domain model in exchange coupled ferromagnetic (F)/antiferromagnetic (AF) bilayers, which results with AF thickness ( $t_{AF}$ ) were used for the analysis of measured ones in NiFe/MnIr bilayers. Angular dependence of  $H_{ex}$  calculated at  $t_{AF} > t_c$  showed typical unidirectional behaviors, however, calculated one at  $0.5t_c < t_{AF} < t_c$  showed peculiar angular behaviors by fixed AF spins at specified angle near  $\theta_H = 90^\circ$ . Angular dependence of  $H_{ex}$  measured in NiFe/MnIr (20 nm) bilayers showed typical unidirectional behaviors. However, measured one in NiFe/MnIr (4 nm) bilayers showed mixed behaviors including both of unidirectional and peculiar angular behaviors, which was explained by the grain size distribution of polycrystalline MnIr.

**Keywords** : exchange bias, antiferromagnetic, single domain model, critical thickness, grain size

### NiFe/MnIr 박막에서 교환 바이어스의 각도 의존성 연구

윤석수 · 김동영\*

안동대학교 물리학과, 경북 안동시 경동로 1375, 36729

(2017년 2월 5일 받음, 2017년 2월 13일 최종수정본 받음, 2017년 2월 13일 게재확정)

본 연구에서는 교환 결합력을 갖는 강자성/반강자성(AF) 박막에서 단자구 모델을 사용하여 교환 바이어스( $H_{ex}$ )의 각도 의존성을 계산하였으며, NiFe/MnIr 박막에서 측정된 결과와 비교 분석하였다. AF층 두께가 임계 두께 이상에서( $t_{AF} > t_c$ ) 계산한  $H_{ex}$ 의 각도 의존성은 전형적인 일방 이방성 특성을 보였으나,  $0.5t_c < t_{AF} < t_c$ 에서는  $90^\circ$  근처의 특정한 각도에서 AF 스핀의 고정에 의한 독특한  $H_{ex}$ 의 각도 의존성을 보였다. NiFe/MnIr(20 nm) 박막에서 측정된  $H_{ex}$ 의 각도 의존성은 전형적인 일방 이방성 특성을 보였으나, NiFe/MnIr(4 nm) 박막에서는 일방 이방성 특성과 AF 스핀의 고정에 의한 특성이 혼합된 결과를 보였으며, 이는 다결정 구조를 갖는 MnIr의 입도 분포 특성으로 설명되어짐을 알 수 있었다.

**주제어** : 교환 바이어스, 반강자성, 단자구 모델, 임계 두께, 입도

### I. 서 론

강자성(F)/반강자성(AF) 박막은 F/AF의 계면에 존재하는 비상보성 AF 스핀에 의하여 F와 AF를 반강자성으로 결합시키는 교환 결합력(exchange coupling)에 의하여 자화 곡선이 한쪽으로 이동되어 비대칭 구조를 보인다[1, 2]. 이러한 비대칭 자화곡선이 한쪽으로 이동된 자기장을 교환 바이어스(exchange bias,  $H_{ex}$ )이라고 한다. 교환 결합력에 의한 교환 바이어스 특성은 강자성층의 자화 방향을 한쪽으로 고정시키는 역할을 하며, 거대 자기저항 또는 터널링 자기저항 소

자에서는 자기저항 신호를 안정화 시키기 위하여 사용되고 있다[3-7].

F/AF 박막의 자화용이축에서 측정된 교환 바이어스는 AF층의 두께( $t_{AF}$ )가 임계 두께( $t_c$ ) 이상에서 나타나기 시작하며, AF층의 임계 두께 근처에서는 보자력의 증가를 동반하는 경향을 보인다[8]. AF층의 임계 두께 이상에서 나타나는 교환 바이어스는 일방 이방성 특성을 보이며, 이러한 일방 이방성 특성을 분석하기 위하여 교환 바이어스의 각도 의존성에 대한 연구가 이루어지고 있다[9-11]. 한편, 임계 두께 근처에서 보인 보자력의 증가는 AF층의 반전에 의한 영향으로 해석되고 있다[12]. 임계 두께 근처에서 보인 교환 바이어스와 보자력 증가 특성은 임계 두께 이하의 AF층과 임계 두께 이상의 AF층이 함께 혼재하고 있음을 의미하며, 이러한 결과는 다결

정으로 이루어진 AF층의 다결정 입도의 분포 특성과 관련이 있다[13]. 그러나 AF층의 다결정 입도의 분포에 의한 교환 바이어스에 대한 특성 분석은 아직까지도 미진하다.

따라서 본 연구에서는 교환 결합력을 갖는 F/AF 박막에 대하여 단자구 모델을 사용하여 AF층의 두께에 따른 교환 바이어스의 각도 의존성을 계산하였으며, NiFe/MnIr 박막에서 반강자성체인 MnIr의 두께에 따른 교환 바이어스의 각도 의존성을 측정 하였다. 측정 결과는 단자구 모델을 사용하여 계산한 AF층의 두께에 따른 교환 바이어스의 각도 의존성 결과와 비교 분석하였으며, 이들 비교 결과를 바탕으로 MnIr 재료의 증착 과정에서 형성된 다결정 입도의 분포 특성에 의한 교환 바이어스의 각도 의존성을 분석하였다.

### II. 실험 방법

교환 결합력을 갖는 NiFe(20 nm)/MnIr(x nm) 박막은 Si기판 위에 DC 마그네트론 스퍼터 방법을 사용하여 증착하였으며, MnIr의 두께 x는 0, 2, 4, 10 및 20 nm까지 변화시켰다. NiFe/MnIr 박막의 하부층으로는 Ta(5 nm)/Cu(10 nm)/Ta(5 nm)/NiFe(2)/Cu(5 nm)를 사용하였으며, 시편의 산화를 방지하기 위한 상부층으로 Ta(5 nm)를 증착하였다. 제조된 NiFe/MnIr 박막은 1 kOe의 자기장을 인가한 후, 300 °C의 고온에서 1시간 동안 진공 자기장 열처리(10<sup>-6</sup> torr)를 하였다. 열처리된 박막의 자기장 각도에 따른 교환 바이어스( $H_{ex}$ )는 Optical KEER 장치를 사용하여 측정하였다.

### III. 실험 결과 및 고찰

F/AF 박막은 교환 바이어스에 의하여 강자성층의 자화가 단일 자구를 형성한다. 그러므로 F층과 AF층 각각을 단자구

로 가정하여 단자구 모델로 교환 결합력에 의한 자화 곡선을 분석하는 것이 가능하다[14, 15]. 따라서, 본 연구에서는 F/AF 박막의 자화 곡선 분석에 단자구 모델을 사용하였다. 두께  $t_f$ 를 갖는 F층과 두께가  $t_{AF}$ 인 AF층 계면에  $J_c$ 의 교환 결합력이 작용하는 경우, F/AF 박막에 대한 총 에너지( $E$ )는 다음과 같이 표현된다.

$$E = -HM_f t_f \cos(\phi_f - \theta_H) + K_f t_f \sin^2 \phi_f + J_c \cos(\phi_f - \phi_{AF}) + K_{AF} t_{AF} \sin^2 \phi_{AF} \quad (1)$$

여기서  $M_s$  및  $K_f$ 는 F층의 포화자화량 및 일축 이방성 상수이며,  $K_{AF}$ 는 AF층의 일축 이방성 상수이다.  $\theta_H$ 는 자화 용이축과 자기장 사이의 각도이며,  $\phi_f$  및  $\phi_{AF}$ 는 자화 용이축과 F층의 자화 방향과 AF층의 스핀 방향 사이의 각도를 각각 나타낸다. 식(1)에서 보인 것과 같이 F/AF 박막에서 AF층은  $J_c$ 의 영향을 받는다.  $t_{AF}K_{AF} > J_c$ 인 경우 AF층의 에너지는  $J_c$ 에 비하여 매우 크므로  $J_c$ 는 AF층에 영향을 미치지 못하므로 AF층은 고정된 상태를 유지하며, 교환 바이어스 특성이 나타난다. 한편,  $t_{AF}K_{AF} < J_c$ 인 경우  $J_c$ 가 AF층을 반전시키는 역할을 하여 교환 바이어스 특성은 사라지게 된다.  $t_{AF}K_{AF} = J_c$ 일 때의 AF층의 두께를 임계 두께  $t_c$ 라고 한다.

F/AF 박막에서 F층의 자화 방향은 총 에너지의 최소 조건으로부터 계산된다. 즉, 식(1)로부터  $\partial E / \partial \phi_f = 0$ 과  $\partial E / \partial \phi_{AF} = 0$ 을 모두 만족하고 총 에너지 값이 최소가 되는 조건으로부터 강자성층의 평형 자화 각도  $\phi_f^{eq}$ 를 구한다. F/AF 박막의 자화 곡선은 자기장 세기에 따른  $\phi_f^{eq}$ 로부터 다음과 같이 구한다.

$$M = M_s \cos(\phi_f^{eq} - \theta_H) \quad (2)$$

본 연구에서는 교환 결합력을 갖는 F/AF재료의 AF층의 두께에 따른 자화 곡선과 교환 바이어스의 각도 의존성을 계산

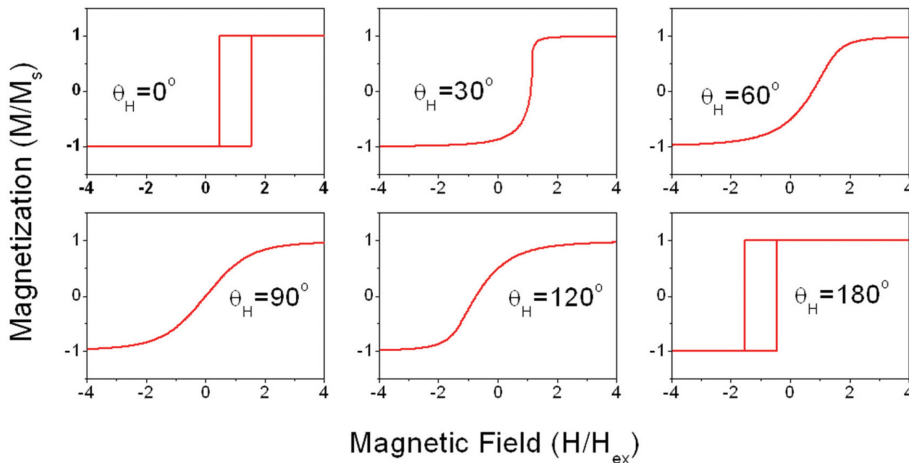


Fig. 1. (Color online) M-H loops calculated by using single domain model at  $\theta_H = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 180^\circ$ , respectively.

하기 위하여  $J_c = 1.0 \text{ erg/cm}^2$  및  $t_F K_F = 0.1 \text{ erg/cm}^2$ 의 값을 사용하였다.

Figure 1은  $t_{AF} = 2t_c$ 인 F/AF 박막에 대하여  $\theta_H = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 180^\circ$ 에서 단자구 모델로 계산한 자화 곡선을 보인 것이다.  $\theta_H = 0^\circ$ 에서 계산한 자화 곡선은 오른쪽으로 이동되어 (+)값을 갖는 교환 바이어스 특성을 보이고 있으며, F층의 일축 이방성 상수인  $t_F K_F = 0.1 \text{ erg/cm}^2$ 에 의한 보자력 특성을 보인다. 그러나  $\theta_H$ 가  $30^\circ$ 에서  $90^\circ$ 로 증가함에 따라 교환 바이어스 값이 줄어들었을 뿐만 아니라 보자력은 나타나지 않았다. 보자력이 없는 자화 곡선은 자기장에 따른 자화 변화가 가역적으로 일어나고 있음을 의미하며, 이는 교환 바이어스에 의해 형성된 단일 자구의 회전 효과로 설명된다. 한편,  $\theta_H > 90^\circ$ 에서는 각도가 증가에 따라서 (-)값을 갖는 교환 바이어스가 감소하는 특성을 보이다가,  $\theta_H = 180^\circ$ 에서는 왼쪽으로 이동한 자화 곡선에서 보자력이 다시 나타나는 특성을 보인다. 본 연구에서는 자기장 각도에 따른 자화 곡선 각 각으로부터 도출한 교환 바이어스를 이용하여 AF층의 두께에 따른 교환 바이어스의 각도 의존성을 계산하였다.

Figure 2는 AF층의 두께에 따른 교환 바이어스의 각도 의존성을 단자구 모델로 계산한 결과를 보인 것이다.  $t_{AF} < 0.5t_c$ 에서는 교환 바이어스가 전혀 나타나지 않았다. 그러나  $0.5t_c < t_{AF} < t_c$ 에서는  $90^\circ$  근처의 특정한 각도에서 교환 바이어스가 나타나기 시작하였으며,  $t_{AF}$ 가 증가함에 따라 교환 바이어스가 나타나는 특정한 각도의 폭이 증가하는 독특한 특성을 보였다.  $t_{AF} > t_c$ 에서는 일방 이방성 상수에 의한 전형적인 교환 바이어스의 각도 의존성을 보였다.  $t_{AF} = 2t_c$ 에 대한 교환 바이어스의 각도 의존성은 Fig. 1의 자화 곡선으로부터 도출한 결과이다.

F/AF 박막에서 외부에서 인가한 자기장은 식(1)에서 보인

첫 번째 항인 Zeeman 에너지에 의하여 F층의 자화 방향에 영향을 미치고, F/AF 계면의 교환 결합에너지  $J_c$ 의 영향으로 AF층의 스핀 방향이 영향을 받는다. 이때, 외부에서 인가한 자기장 방향에 따라  $J_c$ 에 의한 AF층의 영향력은  $J_c$ 의 자화 용이축 방향인  $\theta_H = 0^\circ$ 에서 가장 크게 작용하며,  $\theta_H = 90^\circ$ 에서 가장 작게 작용한다. 따라서  $\theta_H = 0^\circ$  근처에서는 AF 스핀이  $J_c$ 에 의하여 반전함으로써 대칭적인 자화 곡선을 형성하여 교환 바이어스가 나타나지 않으나,  $\theta_H = 90^\circ$  근처에서는 AF 스핀이  $J_c$ 에 의하여 반전하지 못하고 고정된 AF로 남게 되어 교환 바이어스가 나타나게 된다. 따라서,  $0.5t_c < t_{AF} < t_c$ 에서 나타나는 교환 바이어스의 각도 의존성은  $J_c$ 의 영향을 받는 AF층 스핀의 반전과 관련되며, 이러한 AF층 스핀의 반전 특성은 토오크 측정기로 측정된 토오크 신호에서 회전 손실 (Rotational loss)로 나타났다[12]. 이러한 AF층의 두께에 따른 교환 바이어스의 각도 의존성에 대한 계산 결과는 NiFe/MnIr 박막에서 측정된 교환 바이어스의 각도 의존성 분석에 사용하였다.

Figure 3은 NiFe/MnIr 박막의 자화 용이축에서 MnIr의 두께에 따라 교환 바이어스를 측정된 결과를 보인 것이다. 교환 바이어스는 MnIr의 두께가 2 nm에서  $H_{ex} = 12.3 \text{ Oe}$ 로 측정되었으며, 4 nm에서는  $H_{ex} = 83.4 \text{ Oe}$ 로 최대값을 보인 후 감소하여 10 nm 및 20 nm에서는  $H_{ex} = 36.4 \text{ Oe}$  및  $H_{ex} = 43.0 \text{ Oe}$ 로 측정되었다. 이들 결과로부터 NiFe/MnIr 박막에서 교환 바이어스가 나타나는 MnIr의 임계 두께  $t_c$ 는 약 2 nm임을 알 수 있다. 따라서 2 nm 이상에서는 MnIr 박막의 계면에 존재하는 고정된 비상보성 AF 스핀에 의하여 교환 바이어스가 나타날 것으로 예상된다. MnIr의 두께에 따른 교환 바이어스 특성을 분석하기 위하여 임계 두께 이상인 4 nm와 20 nm에서 교환 바이어스의 각도 의존성을 측정하였다.

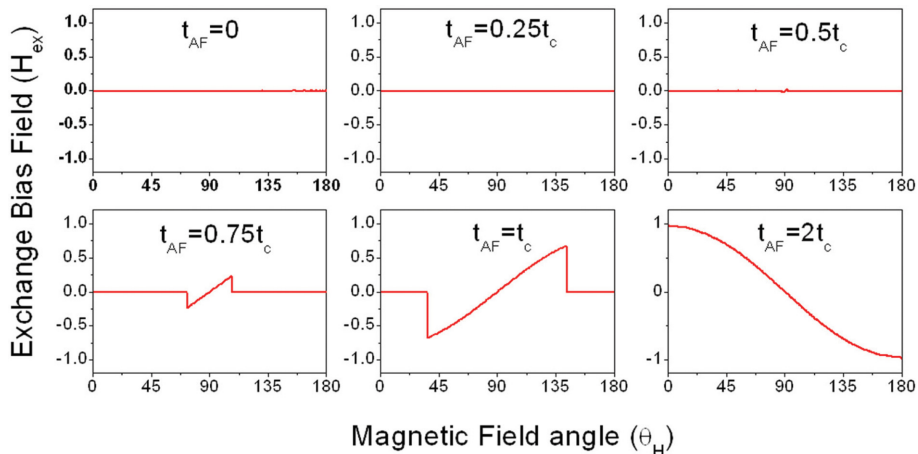
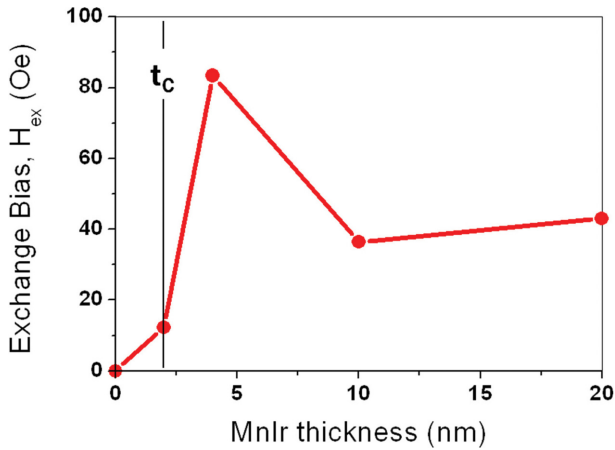
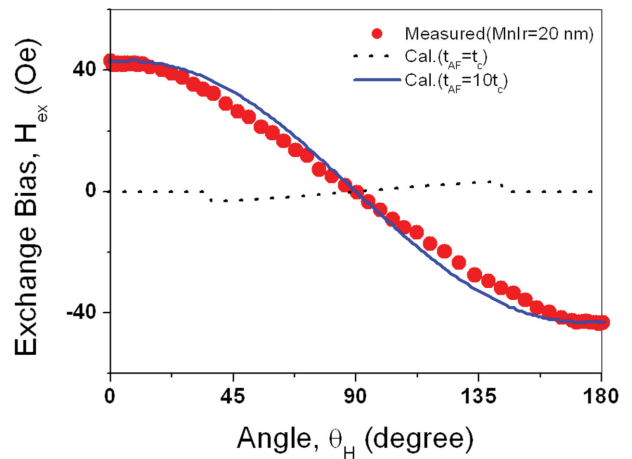


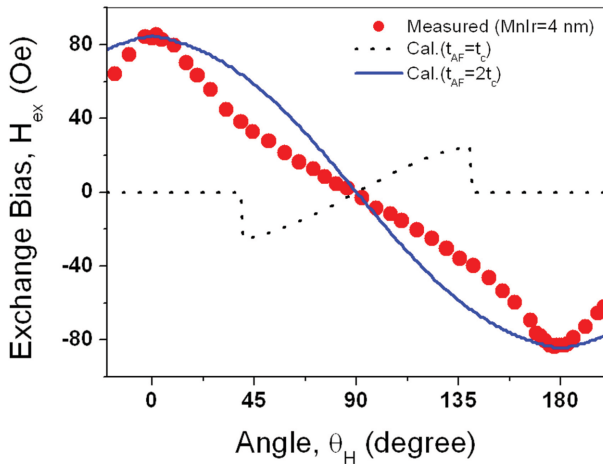
Fig. 2. (Color online) Angular dependence of exchange bias calculated by using single domain model at  $t_{AF} = 0 t_c, 0.25 t_c, 0.5 t_c, 0.75 t_c, 1.0 t_c, 1.5 t_c$ , respectively. The  $t_c$  is critical thickness of antiferromagnetic layer.



**Fig. 3.** (Color online) Exchange bias with MnIr thickness measured at easy axis in NiFe/MnIr bilayers. The  $t_c$  is about 2 nm in NiFe/MnIr bilayers.



**Fig. 5.** (Color online) Angular dependence of exchange bias measured in NiFe/MnIr(20 nm) bilayers. The dot and solid lines are calculated by using single domain model at  $t_{AF} = t_c$  and  $10t_c$ , respectively.



**Fig. 4.** (Color online) Angular dependence of exchange bias measured in NiFe/MnIr(4 nm) bilayers. The dot and solid lines are calculated by using single domain model at  $t_{AF} = t_c$  and  $2t_c$ , respectively.

Figure 4는 NiFe/MnIr(4 nm) 박막에서 측정된 교환 바이어스의 각도 의존성을 보인 것이다. Fig. 4에서 둥근 마크(●)는 측정 결과이며, 굵은 실선과 점선은  $t_{AF} = 2t_c$ 와  $t_{AF} = t_c$  조건에서 단자구 모델로 계산한 결과를 각각 나타낸다. NiFe/MnIr 박막에서 MnIr의 임계 두께  $t_c$  약 2 nm이므로 4 nm의 MnIr 두께는 약  $2t_c$ 에 해당한다. 따라서 NiFe/MnIr(4 nm) 박막에서 측정된 교환 바이어스의 각도 의존성은  $t_{AF} = 2t_c$  조건을 만족하는 일방 이방성에 의한 교환 바이어스의 각도 의존성만으로 설명되어야 한다. 그러나, Fig. 4에서  $t_{AF} = 2t_c$  조건에서 단자구 모델로 계산한 결과(굵은 실선)와 측정 결과는 큰 차이를 보였다. 이러한 큰 차이는 점선으로 표시한  $t_{AF} = t_c$  조건을 만족하는 교환 바이어스의 각도 의존성에 의한 영향으로 해석이 가능하다.

따라서, NiFe/MnIr(4 nm) 박막에서는  $t_{AF} > t_c$ 에서 나타나는 일방 이방성 특성과  $0.5t_c < t_{AF} < t_c$ 에서 AF 스핀의 고정에 의해 나타나는 독특한  $H_{ex}$ 의 각도 의존성이 혼재하고 있음을 알 수 있다. 즉, MnIr의 두께가 4 nm인 박막에서는  $t_{AF} > t_c$  조건을 만족하는 AF층과  $t_{AF} < t_c$  조건을 만족하는 AF층이 모두 존재함을 의미하며, 다결정으로 이루어진 MnIr의 입도 분포 특성을 고려하여야 한다. 4 nm의 MnIr 박막은 2 nm 이하의 두께를 갖는 다결정 입도와 2 nm 이상의 두께를 갖는 다결정 입도들이 함께 존재하는 다결정 입도 분포 특성을 갖고 있으며, 이러한 입도 분포가 NiFe/MnIr(4 nm) 박막에서 측정된 교환 바이어스의 각도 의존성에 영향을 미친 것으로 해석할 수 있다. 따라서 교환 바이어스의 각도 의존성은 다결정 구조를 갖는 MnIr의 입도 분포에 따른 영향을 고려해야 한다.

Figure 5는 NiFe/MnIr(20 nm) 박막에서 측정된 교환 바이어스의 각도 의존성을 보인 것이다. 20 nm의 MnIr 두께는 약  $10t_c$ 에 해당한다. 따라서 NiFe/MnIr(20 nm) 박막에서 측정된 교환 바이어스의 각도 의존성은  $t_{AF} = 10t_c$  조건을 만족하는 일방 이방성에 의한 교환 바이어스의 각도 의존성만으로 설명되어야 한다.  $t_{AF} = 10t_c$  조건에서 단자구 모델로 계산한 결과는 실선으로 표시하였다. 측정 결과는 계산 결과와 거의 일치하였으나 여전히 작은 차이를 보였다. 이러한 작은 차이는 점선으로 표시한  $t_{AF} = t_c$ 인 조건에서 나타나는 AF 스핀의 고정에 의한 영향으로 해석된다. 따라서, NiFe/MnIr(20 nm) 박막에서 측정된 교환 바이어스의 각도 의존성은 일방 이방성 특성에 의한 영향이 두드러지게 나타났으며, 여전히 AF 스핀의 고정에 의한 영향도 작게 나타났다. 20 nm 두께의 MnIr을 증착한 경우에도 2 nm 이하의 두께를 갖는 MnIr 결정 입도들이 적은 분량으로나마 생성되었음을 알 수 있다.

한편, MnIr의 두께가 20 nm인 박막에서 측정된 교환 바이어스는 MnIr의 두께가 4 nm인 박막에서 측정된 교환 바이어스 보다 2배 정도 감소하였다. 이러한 결과는 비상보성 AF 스핀의 양이 반으로 줄어들었음을 의미한다. 교환 바이어스에 영향을 주는 비상보성 AF 스핀은 자기장 하에서 증착 과정 또는 자기장 열처리 과정에서 형성된다. 예를 들어, 자기장 열처리 과정의 고온에서  $J_c > t_{AF}K_{AF}$ 인 경우  $J_c$ 에 의하여 AF 스핀이 반전을 일으켜 비상보성 AF 스핀을 형성한다. 그러나 고온에서  $J_c < t_{AF}K_{AF}$ 인 경우에는 비상보성 AF 스핀이 형성되지 못하게 되어 교환 바이어스가 감소하게 된다. 20 nm인 MnIr 박막에서는 0~20 nm의 결정 입도가 분포할 수 있으며, 이 경우  $J_c < t_{AF}K_{AF}$ 인 두께를 갖는 입도는 고온 열처리 과정에서 비상보성 AF 스핀을 형성하지 못하게 된다. 따라서, NiFe/MnIr(20 nm) 박막에서 교환 바이어스가 반으로 줄어든 원인은 고온 열처리 과정에서 형성된 비상보성 AF 스핀의 양이 NiFe/MnIr(40 nm) 박막보다 반으로 줄어들었기 때문으로 해석된다. 이러한 교환 바이어스의 감소 특성 역시 MnIr의 결정 입도 분포 특성으로 해석할 수 있다. 결국, 교환 바이어스의 크기 및 각도 의존성은 다결정 구조를 갖는 MnIr의 결정 입도 분포에 따른 영향을 고려해야 함을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 교환 결합력을 갖는 F/AF 박막에 대하여 단자구 모델을 사용하여 AF층의 두께( $t_{AF}$ )에 따른 교환 바이어스의 각도 의존성을 계산하였다. 이러한 계산 결과는 NiFe/MnIr 박막에서 MnIr의 두께에 따른 교환 바이어스의 각도 의존성 측정 결과와 비교 분석하였다.

단자구 모델에 의한 계산 교환 바이어스의 각도 의존성은  $t_{AF} > t_c$ 인 경우 전형적인 일방이방성 특성을 보였다. 한편,  $0 < t_{AF} < 0.5t_c$ 에서는 교환 바이어스가 나타나지 않았다. 그러나  $0.5t_c < t_{AF} < t_c$ 에서는  $\theta_H = 90^\circ$  근처의 특정한 각도에서 AF 스핀의 고정에 의한 독특한 교환 바이어스가 나타났으며, 이러한 교환 바이어스가 나타나는 각도의 폭은 AF층의 두께가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다.

NiFe/MnIr 박막에서 MnIr의 임계 두께  $t_c$ 는 약 2 nm임을 확인하였다. NiFe/MnIr(20 nm) 박막에서 측정된 교환 바이어스의 각도 의존성은  $t_{AF} > t_c$ 의 조건에서 나타나는 전형적인 일방 이방성 특성을 보였다. 그러나 NiFe/MnIr(4 nm)에서는

$t_{AF} > t_c$ 의 조건과  $0.5t_c < t_{AF} < t_c$ 의 조건에서 나타나는 교환 바이어스의 각도 의존성이 혼재하고 있는 결과를 보였다. 이로 부터 4 nm의 MnIr층에는 2 nm 이하의 두께를 갖는 결정 입도와 2 nm 이상의 두께를 갖는 결정 입도가 혼재함을 알 수 있었다. 이러한 분석 결과는 다결정 구조를 갖는 MnIr의 결정 입도 분포에 따라 교환 바이어스의 각도 의존성이 다르게 나타나고 있음을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

이 논문은 2016학년도 안동대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

#### 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] E. Berkowitz and K. Takano, J. Magn. Magn. Mater. **200**, 552 (1999).
- [4] M. Kiwi, J. Magn. Magn. Mater. **234**, 584 (2001).
- [5] G. Binash, P. Grunberg, F. Saurenbach, and W. Zinn, Phys. Rev. B **39**, 2489 (1989).
- [6] S. S. Parkin, C. Kaiser, A. Panchula, P. M. Rice, B. Hughes, M. Samant, and S. H. Yang, Nature Mat. **3**, 862 (2004).
- [7] S. Yuasa, T. Nagahama, A. Fukushima, Y. Suzuki, and K. Ando, Nature Mat. **3** 868 (2004).
- [8] M. Ali, C. H. Marrows, M. Al-Jawad, B. J. Hickey A. Misra, U. Nowak, and K. D. Usadel, Phys. Rev. B **68**, 214420 (2003).
- [9] H. Xi and R. M. White, J. Appl. Phys. **86**, 5169 (1999).
- [10] H. Xi, M. H. Kryder, and R. M. White, Appl. Phys. Lett. **74**, 2687 (1999).
- [11] J. Camarero, 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 and S. S. Yoon, J. Kor. Mag. Soc. **24**, 140 (2014).
- [13] K. Imakita, M. Tsunoda, and M. Takahashi, J. Magn. Magn. Mater. **286**, 284 (2005).
- [14] T. Sato, M. Tsunoda, and M. Takahashi, J. Appl. Phys. **95**, 7513 (2004).
- [15] M. Tsunoda, Y. Tsuchiya, T. Hashimoto, and M. Takahashi, J. Appl. Phys. **87**, 4375 (2000).