

Harmonic Signals Analysis of Planar Hall Resistance Sensor

Dong Young Kim* and Seok Soo Yoon

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

(Received 19 July 2020, Received in final form 18 August 2020, Accepted 18 August 2020)

We analyzed the magnetic field dependence of 0th, 1st and 2nd order harmonic signals (V_{0f_0} , V_{1f_0} and V_{2f_0}) measured in planar Hall resistance (PHR) sensor. The magnetic field dependence of V_{1f_0} showed the typical PHR signal properties with high sensitivity and linearity near $H=0$. While, the magnetic field dependence of V_{0f_0} ($=\sqrt{2} V_{2f_0}$) and V_{2f_0} showed same as the derivative of the magnetic field dependence of V_{1f_0} , and were very sensitively response to the magnetic film on PHR sensor.

Keywords : planar Hall resistance, harmonic signal, spin current, self field

평면홀 저항 센서의 조화파 신호 분석

김동영* · 윤석수

안동대학교 물리학과, 경북 안동시 경동로 1375, 36729

(2020년 7월 19일 받음, 2020년 8월 18일 최종수정본 받음, 2020년 8월 18일 게재확정)

평면홀 저항 센서에서 측정된 0차, 1차 및 2차 조화파 신호(V_{0f_0} , V_{1f_0} 및 V_{2f_0})의 자기장 의존성은 계산 결과와 일치하였다. V_{1f_0} 는 $H=0$ 근처에서 자기장에 따라 민감도와 선형성이 우수한 전형적인 평면홀 저항 신호 특성을 보였다. 한편, V_{0f_0} ($=\sqrt{2} V_{2f_0}$) 및 V_{2f_0} 의 자기장 의존성은 V_{1f_0} 의 자기장 의존성을 자기장에 따라 미분한 모양과 같았으며, 센서 위에 놓인 자성 재료에 민감하게 반응하는 특성을 보였다.

주제어 : 평면홀 저항, 조화파 신호, 스핀 전류, 자체 자기장

I. 서 론

평면홀 저항 센서(Planar Hall Resistance, PHR)는 투자율이 낮은 초상자성 나노 입자를 탐지하여 병을 조기에 진단하는 바이오센서 개발에 활용되고 있다[1,2]. PHR 센서의 출력 전압은 전류의 방향과 수직인 방향에서 측정하며, 출력 전압은 전류에 비례한다. PHR 센서에 교류 전류를 인가한 경우 교류 전류의 진동수와 같은 진동수를 갖는 출력 전압을 일반적으로 PHR 신호(1차 조화파 신호)라고 한다. 한편 센서에 흐르는 교류 전류에 의하여 발생한 스핀 전류(spin current)가 만드는 유사 자기장(field like, FL)에 의하여 2차 조화파 신호가 출력 전압으로 나타난다[3]. 교류 전류에 의하여 발생한 스핀 전류와 자화에 전달하는 토크가 같은 진동수로 흔들려 2차 조화파 신호가 발생한다. 스핀 전류에 의한 2차 조화파

신호는 스핀 전류가 자성 박막의 자화에 토크를 가해주는 스핀-오빗 토크(spin-orbit torque) 현상을 정량적으로 측정하는 방법의 하나로 이용되고 있다[3-6]. 한편, 자체 자기장(self field)에 의하여 유도된 2차 조화파 신호는 투자율이 낮은 자성 비드를 측정할 수 있을 정도로 민감도가 우수하며, 자성 박막의 투자율 측정에 이용되고 있다[7,8]. 이러한 2차 조화파 신호는 직류 신호(0차 조화파 신호)를 동반하지만 PHR 센서의 직류 신호 특성에 관한 연구는 아직까지 미진하다.

교환 바이어스 특성을 갖는 자성 박막을 사용하여 제작한 PHR 센서의 직류(0차), PHR(1차) 및 2차 조화파 신호 각각을 자기장에 따라 측정하여 계산 결과와 비교 분석하였다. 또한, 비정질 CoFeB(50 nm) 박막의 유무에 따라 0차, 1차 및 2차 조화파 신호를 측정하여 조화파의 물성측정 성능을 분석하였다.

II. 실험 방법

PHR 센서는 Fig. 1의 현미경 사진에서 보인 것과 같이

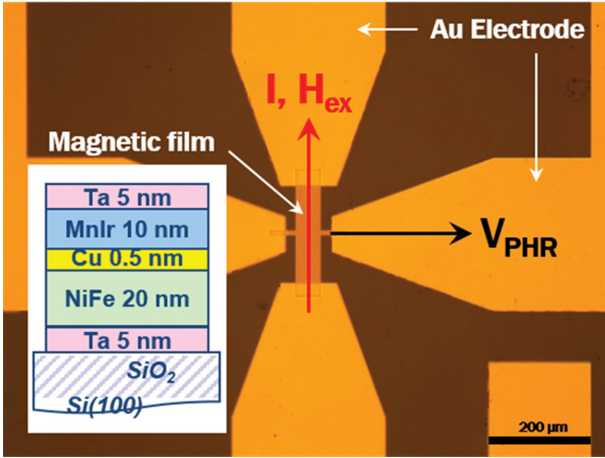


Fig. 1. (Color online) Photography of PHR sensor. The insert figure shows the magnetic film structure used in PHR sensor.

광식각 및 건식 에칭 공정을 통하여 $50 \times 250 \mu\text{m}^2$ 의 크기로 제작하였다. 전류는 센서의 길이 방향(교환 바이어스 자기장의 방향)으로 인가하였으며, PHR 센서의 출력 신호 V_{PHR} 은 전류의 방향과 수직인 방향에서 측정하였다. PHR 센서에 사용한 자성 박막은 Fig. 1에 삽입한 그림에서 보인 것과 같이 Ta(5)/NiFe(20)/Cu(0.5)/IrMn(10)/Ta(5)(단위: nm) 구조이며, DC 마그네트론 스퍼터링 방법으로 Si/SiO₂ 기판 위에 상온에서 증착하였다. 박막 증착 시 초기 진공은 10^{-8} Torr 이하였으며, Ar 공정 압력은 3 mTorr로 하였다. IrMn/Cu/NiFe에서 교환 바이어스 자기장 H_{ex} 를 형성하기 위하여 박막의 증착 과정 동안 150 Oe의 자기장을 인가하였다. IrMn과 NiFe 사이에 둔 0.5 nm 두께의 Cu는 교환 바이어스 효과를 감소하여 PHR 센서의 민감도 향상을 위하여 증착하였다.

PHR 센서의 1차 및 2차 조화파 신호 $V_{1\omega}$ 및 $V_{2\omega}$ 는 Lock-in amplifier(SR830)을 사용하여 측정하였다. 이때, PHR 센서에 흐르는 교류 전류의 세기는 $I = 10 \text{ mA}$ 였고, 주파수는 $f_0 = 400 \text{ Hz}$ 였다. PHR 센서의 0차 조화파 신호 $V_{0\omega}$ 는 Pre-amplifier(SR560)을 거쳐 멀티미터(Agilent 34401A)를 사용하여 측정하였다. 비정질 CoFeB(50 nm) 박막을 PHR 센서 위에 올려놓은 경우와 없는 경우 각각에 대하여 -65 Oe~65 Oe의 자기장 범위를 왕복하며 0차, 1차 및 2차 조화파 신호를 각각 측정하여 CoFeB의 유무에 따른 신호차 (ΔV_{PHR})를 도출하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

PHR 센서의 신호는 전류 \vec{I} 와 자화의 단위 벡터 \vec{m} 의 스칼라 곱에 비례한다. 자화의 단위 벡터의 수직 성분 m_{\perp} 에 (전류의 방향과 수직인 방향) 의하여 전류의 방향과 수직인

방향에서 측정되는 출력 전압 V_{PHR} 는 다음과 같이 표현된다 [9].

$$V_{\text{PHR}} = \frac{(\rho_{\parallel} - \rho_{\perp})}{t} m_{\perp} (\vec{I} \cdot \vec{m}) \quad (1)$$

여기서 ρ_{\perp} 및 ρ_{\parallel} 은 \vec{I} 와 \vec{m} 이 서로 수직 및 수평 방향 각각에 대한 비저항이고, t 는 PHR 센서에 사용한 자성 박막 (NiFe)의 두께이다. PHR 센서에 형성된 교환 바이어스 자기장 H_{ex} 와 \vec{I} 는 방향이 같으므로 $\vec{I} \cdot \vec{m} = I \cos \theta$ 가 되고, 자화의 단위 벡터의 수직 성분은 $m_{\perp} = \sin \theta$ 가 된다.

$$V_{\text{PHR}} = \frac{(\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) I}{t} \sin \theta \cos \theta \quad (2)$$

$I = I_0 \sin(\omega_0 t)$ 인 교류 전류를 사용하는 경우 PHR 센서의 출력 전압은 다음과 같다.

$$V_{\text{PHR}} = V_m \sin 2\theta \sin(\omega_0 t) \quad (3)$$

여기서 $V_m = (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) I_0 / 2t$ 이고, ω_0 는 교류 전류의 각진동수 ($\omega_0 = 2\pi f_0$)이다. PHR 센서에 흐르는 전류에 의하여 발생하는 스핀 전류는 유사 자기장 $H_{\text{FL}} = H_{\text{SC}} \sin(\omega_0 t)$ 을 형성하며, 전류에 비례하는 미소 자기장 H_{FL} 은 PHR 센서의 자화 방향 θ 를 미세하게 각진동수 ω_0 로 진동시킨다.

$$V_{\text{PHR}} = V_m \sin 2(\theta + \Delta \theta) \sin(\omega_0 t) \quad (4)$$

$\sin 2(\theta + \Delta \theta)$ 를 테일러 급수와 $\Delta \theta = \cos \theta H_{\text{FL}}$ 를 이용하여 식 (4)를 정리하면 다음과 같다[3,4].

$$V_{\text{PHR}} = V_m \sin 2\theta \sin(\omega_0 t) + V_m H_{\text{SC}} \cos 2\theta \cos \theta \sin(\omega_0 t) \sin(\omega_0 t) \quad (5)$$

식(5)의 두 번째 항인 $\sin(\omega_0 t) \sin(\omega_0 t)$ 를 삼각 함수의 곱의 항등식인 $\sin A \sin A = \frac{1}{2}(1 - \cos 2A)$ 를 적용하면 식(5)는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} V_{\text{PHR}} &= V_m \sin 2\theta \sin(\omega_0 t) + \frac{1}{2} V_m H_{\text{SC}} \cos 2\theta \cos \theta (1 - \cos(2\omega_0 t)) \\ &= V_{0f_0} + V_{1f_0} + V_{2f_0} \end{aligned} \quad (6)$$

교류 전류에 의한 유사 자기장 H_{FL} 은 각진동수가 0(직류)인 0차 조화파 신호 $V_{0\omega}$ 와 각진동수가 $2\omega_0$ 인 2차 조화파 신호 $V_{2\omega}$ 를 각각 발생시킨다. Lock-in amplifier (SR830)는 제곱근 평균(root mean square)값을 측정하므로 교류 신호인 1차 및 2차 조화파의 출력은 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 배 만큼 감소한다. 따라서 PHR 센서의 0차, 1차 및 2차 조화파 신호 각각의 측정값은 다음과 같다.

$$V_{0f_0} = \frac{1}{2} V_m H_{SC} \cos 2\theta \cos \theta \quad (7-1)$$

$$V_{1f_0} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_m \sin 2\theta \quad (7-2)$$

$$V_{2f_0} = \frac{1}{2\sqrt{2}} V_m H_{SC} \cos 2\theta \cos \theta \quad (7-3)$$

0차 조화파 신호 V_{0f_0} 와 2차 조화파 신호 V_{2f_0} 는 자화 각도 θ 에 따라 같은 모양의 함수 형태를 가지며, 0차 조화파 신호는 2차 조화파 신호보다 $\sqrt{2}$ 배 크게 측정됨을 알 수 있다.

$$V_{0f_0} = \sqrt{2} V_{2f_0} \quad (8)$$

교환 바이어스 자기장을 갖는 자성 박막은 단일 자구 (single domain) 형태를 유지하므로 단일 자구 모델(single domain model)의 적용이 가능하다[10]. 단일 자구 모델을 이용하여 자기장의 세기에 따른 각도 θ 를 계산하고, 이들 결과를 이용하여 식(7-1), (7-2) 및 (7-3)에 기술한 0차, 1차 및 2차 조화파 신호 각각에 대하여 자기장에 따른 출력 신호를 계산하였다.

Fig. 2(a)는 진동수가 f_0 인 교류 전류를 인가했을 때, PHR 센서에 흐르는 전류의 주파수 스펙트럼을 나타낸 것이다. Fig. 2(b)는 자기장이 $H=0$ 일 때, V_{PHR} 의 주파수 스펙트럼을 계산한 결과를 나타낸 것이다. 0차 및 2차 조화파는 $H=0$ 일 때 최대가 되어 나타나고 있으며, 0차 조화파 신호와 2차 조화

파 신호는 $H=0$ 일 때 $\theta=0$ 이 되어 신호의 크기가 최대가 되며, 0차 조화파 신호는 2차 조화파 신호보다 $\sqrt{2}$ 배 크게 계산하였다. 한편, 1차 조화파 신호는 $H=0$ 일 때, 신호의 크기가 0이 되어 나타나지 않았다.

Fig. 2(c-e)는 식(7-1), (7-2) 및 (7-3)에서 기술한 0차, 1차 및 2차 조화파 각각의 출력 신호의 자기장 의존성을 단일 자구 모델을 이용하여 계산한 결과를 나타낸 것이다. 단일 자구 모델 계산을 위하여 교환 바이어스 자기장 $H_{ex} = 5.0$ Oe, 일축 이방성 자기장 $H_k = 3.0$ Oe, 자기 저항비 2%, 스핀 전류에 의한 미소 교류 자기장의 크기 $H_{SC} = 0.1$ Oe를 각각 변수로 사용하였다. Fig. 2(d)에서 보인 1차 조화파의 출력 신호 V_{1f_0} 는 $H=0$ 근처에서 민감도 및 선형성이 우수한 교환 바이어스를 갖는 재료에서 보이는 전형적인 평면홀 전압 특성을 보였다. Fig. 2(c)와 Fig. 2(e)에서 보인 0차 조화파 신호 V_{0f_0} 및 2차 조화파 신호 V_{2f_0} 는 자기장에 따라 같은 모양을 보였으며, 0차 조화파 신호는 2차 조화파 신호보다 $\sqrt{2}$ 배 크게 나타났다.

0차 및 2차 조화파 신호는 1차 조화파 신호를 자기장에 따라 미분한 모양과 같았다. 또한, 0차 및 2차 조화파 신호는 스핀 전류가 만드는 유사 자기장에 의한 신호이므로 1차 조화파 신호의 기울기에 비례하며, 이들 신호는 전류 및 스핀 전류가 만드는 교류 자기장에 비례하는 특성을 보였다. 이들 0차, 1차 및 2차 출력 전압 신호를 계산한 결과는 교환 바이어스를 갖는 PHR 센서의 0차, 1차 및 2차 출력 전압 신호

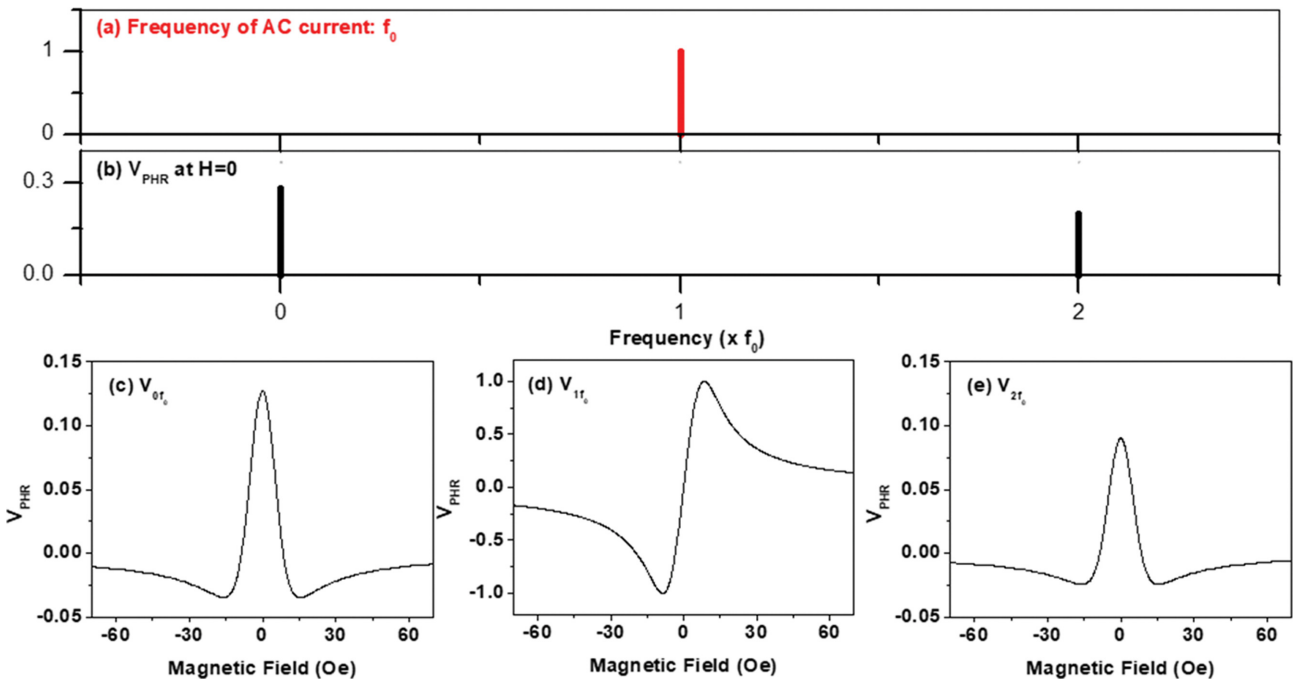


Fig. 2. (Color online) Frequency spectrum of (a) AC current with f_0 frequency and (b) V_{PHR} at $H=0$. Calculated magnetic field dependence of (c) V_{0f_0} , (d) V_{1f_0} , and (e) V_{2f_0} .

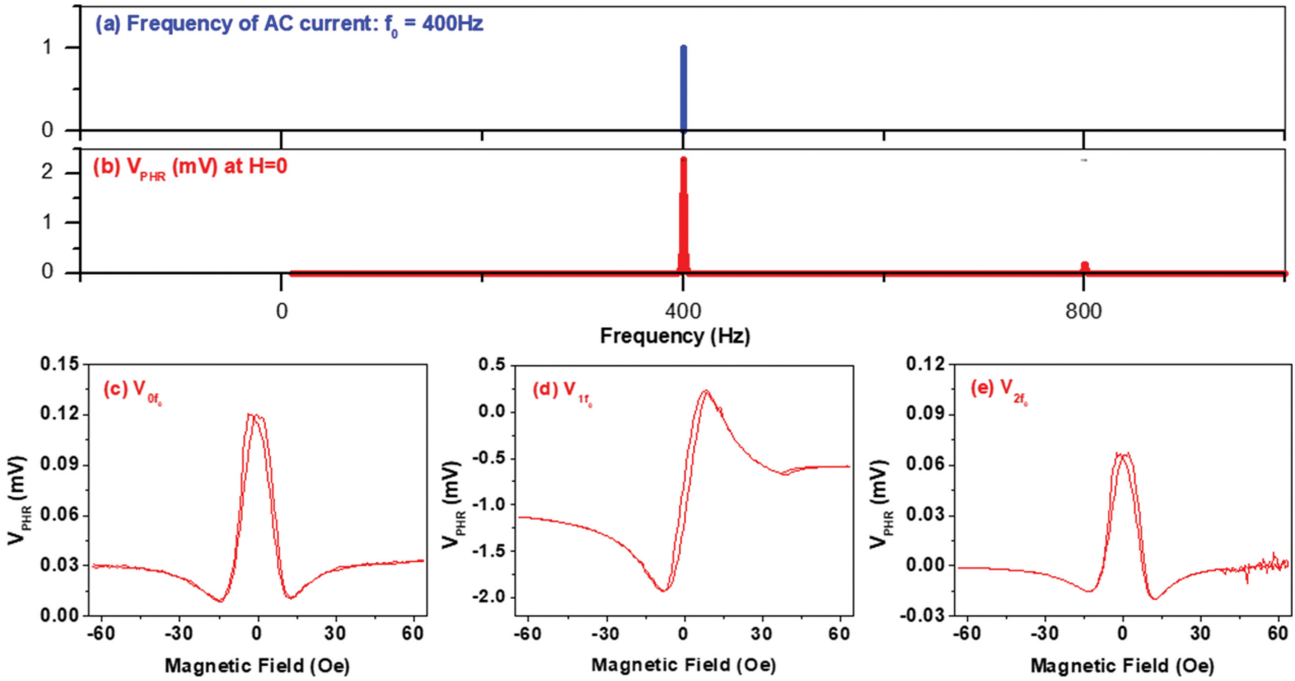


Fig. 3. (Color online) Frequency spectrum of (a) AC current with $f_0 = 400$ Hz frequency and (b) V_{PHR} at $H=0$. Measured magnetic field dependence of (c) V_{0f_0} , (d) V_{1f_0} , and (e) V_{2f_0} .

측정 결과를 비교 분석하는 데 사용하였다.

Fig. 3(a)는 진동수가 $f_0 = 400$ Hz인 교류 전류를 인가했을 때, PHR 센서에 흐르는 전류의 주파수 스펙트럼을 나타낸 것이다. Fig. 3(b)는 자기장이 $H=0$ 일 때, PHR 센서의 V_{PHR} 을 10 Hz-1 kHz 범위에서 Lock-in Amp로 측정된 주파수 스펙트럼을 나타낸 것이다. 식(7-2)에 의하면, 1차 조화파 신호는 $H=0$ 일 때 $V_{1f_0} = 0$ 이 되어야 한다. 그러나 V_{1f_0} 가 2차 조화파 신호 V_{2f_0} 보다 크게 측정된 이유는 PHR 센서의 오프셋(offset) 전압이 V_{2f_0} 보다 크기 때문으로 보인다. 오프셋 전압은 PHR 센서의 광식각 제조 공정에서 생긴 형상 오차 및 교환 바이어스 방향과 전류 방향의 사잇각 오차 등에 기인한다.

Fig. 3(c~e)는 0차, 1차 및 2차 조화파 각각의 출력 신호의 자기장 의존성을 측정된 결과를 나타낸 것이다. 이들 측정 결과는 Fig. 2(c~e)에서 보인 계산 결과와 일치하는 경향을 보였다. Fig. 3(c~e)에서 보인 0차, 1차 및 2차 조화파 출력 신호의 자기장 의존성은 계산 결과와 달리 $H=0$ 근처에서 이력 특성이 나타났다. 이는 교환 바이어스보다 큰 형상 이방성 자기장의 영향으로 $H=0$ 근처에서 다중 자구 (multi domain)가 형성되고, 이로 인한 자화 곡선의 이력 특성이 0차, 1차 및 2차 조화파의 출력 신호에 영향 미친 것으로 보인다. 이러한 이력 특성은 센서의 성능을 감소시키는 역할을 하므로 PHR 센서의 폭을 50 μm 보다 넓게 하여, 형상 이방성 자기장이 교환 바이어스 자기장보다 작아지게 센

서를 설계할 필요가 있다. Fig. 2(c)와 Fig. 2(e)에서 보인 0차 및 2차 조화파 신호는 자기장에 따라 유사한 모양을 보였으며, 계산 결과와 유사하게 1차 조화파 신호를 자기장에 따라 미분한 모양과 같은 결과로 측정되었다. 또한, 0차 조화파 신호는 계산 결과와 같이 2차 조화파 신호보다 약 $\sqrt{2}$ 배 크게 측정되었다. 측정 결과에서 나타난 $H > 40$ Oe에서의 노이즈 신호는 헬름홀츠 코일에 연결된 전원 공급장치의 불안정 때문이었다.

0차, 1차 및 2차 조화파 신호를 활용하여 자성 재료의 물성을 측정하는 성능을 검증하기 위하여 비정질 CoFeB(50 nm) 박막 재료를 사용하였다. 성능 검증에 사용한 비정질 CoFeB(50 nm) 박막의 보자력은 $H_c = 1.7$ Oe, 포화 자화량은 $M_s = 1303$ emu/cc, 일축 이방성 자기장은 $H_k = 35$ Oe였다[8]. 비정질 CoFeB 박막 재료의 유무에 대하여 자기장에 따른 0차, 1차 및 2차 조화파 신호의 자기장 의존성을 각각 측정하였다.

Fig. 4는 PHR 센서 위에 CoFeB(50 nm) 박막을 올려놓은 경우와 CoFeB(50 nm) 박막이 없는 경우 각각에 대하여 0차, 1차 및 2차 조화파 신호의 자기장 의존성을 측정된 결과를 나타낸 것이다. 청색 실선은 CoFeB 박막이 없는 경우에 측정된 조화파 신호의 자기장 의존성 결과이며, 붉은 실선은 CoFeB 박막이 있는 경우에 측정된 조화파 신호의 자기장 의존성 결과이다. Fig. 4(a)와 Fig. 4(c)에서 보인 0차 및 2차 조화파 신호는 CoFeB 박막이 있는 경우가 CoFeB 박막이

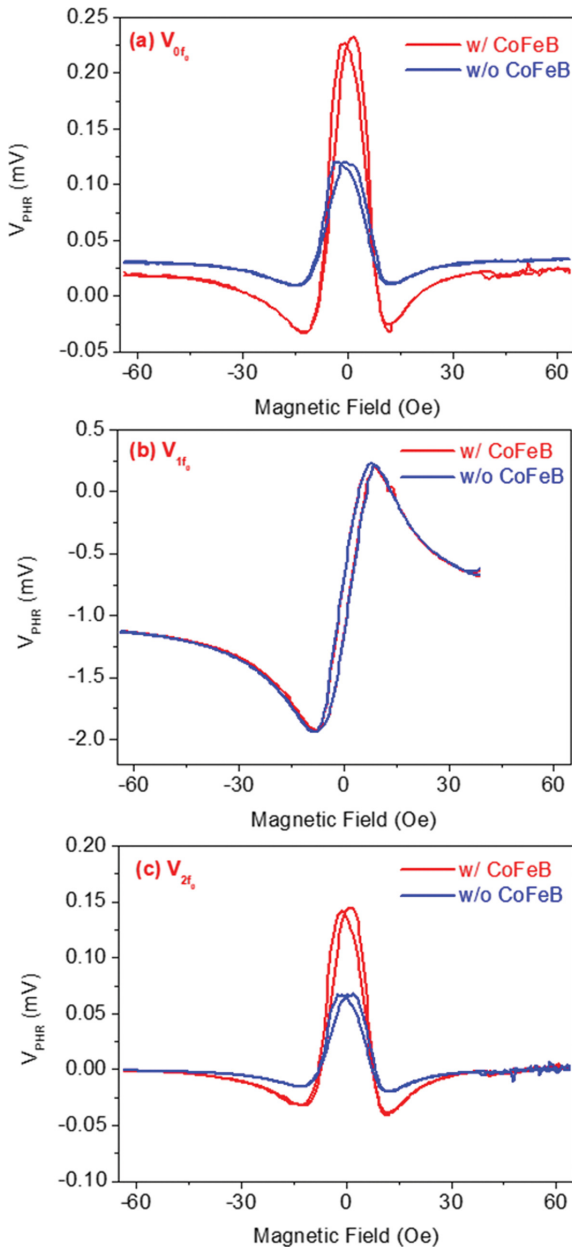


Fig. 4. (Color online) Measured magnetic field dependence of (a) V_{0f_0} , (b) V_{1f_0} , and (c) V_{2f_0} with (red line) and without (blue line) CoFeB(50 nm) thin film, respectively.

없는 경우보다 약 2배 큰 신호 특성을 보였다. 한편, Fig. 4(b)에서 보인 1차 조화파 신호는 CoFeB 박막이 있는 경우와 CoFeB 박막이 없는 경우 신호의 차이가 거의 없었다. 이들 결과로부터 0차 및 2차 조화파 신호는 1차 조화파 신호보다 센서 위에 놓인 자성 재료에 민감하게 반응하는 특성을 보였으며, 자성 재료의 물성을 측정하는 성능이 우수함을 알 수 있었다. 0차, 1차 및 2차 조화파 신호에 대하여 CoFeB 박막의 유무에 따른 조화파의 신호차 $\Delta V_{\text{PHR}} = (V_{\text{PHR}}^w - V_{\text{PHR}}^{w/o})$ 를 각각 도출하였다.

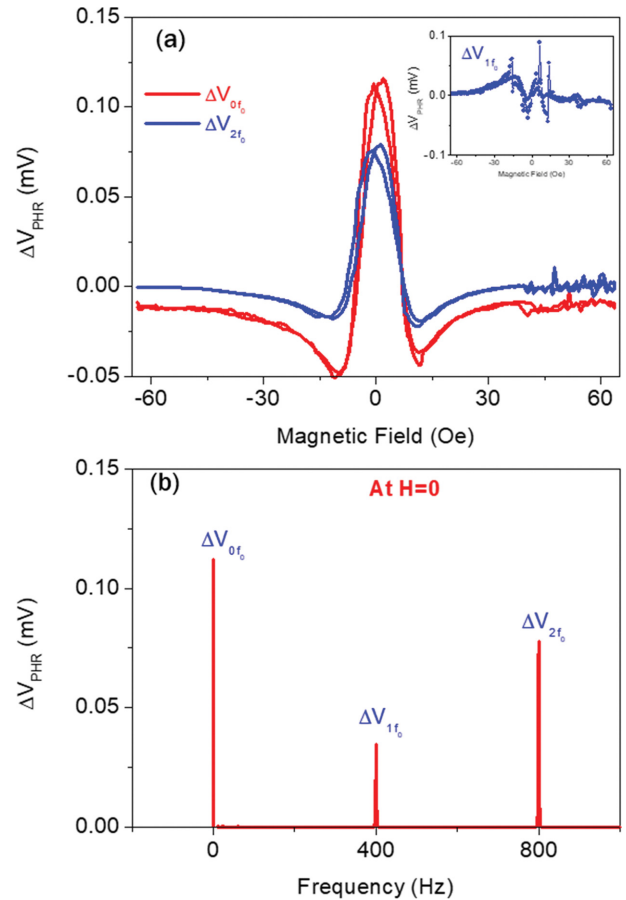


Fig. 5. (Color online) (a) Measured magnetic field dependence of ΔV_{PHR} for ΔV_{0f_0} (red line) and ΔV_{1f_0} (blue line). The inset figure shows the measured magnetic field dependence of ΔV_{PHR} for ΔV_{1f_0} . (b) Frequency spectrum of ΔV_{PHR} at $H=0$.

Fig. 5(a)는 0차 및 2차 조화파의 자기장 의존성에서 도출한 ΔV_{PHR} 를 각각 나타낸 것이다. 청색 실선은 2차 조화파를 이용한 ΔV_{2f_0} 의 자기장 의존성이고, 붉은 실선은 0차 조화파를 이용한 ΔV_{0f_0} 의 자기장 의존성이다. ΔV_{2f_0} 및 ΔV_{0f_0} 모두 박막이 없는 경우에 측정된 결과와 같은 자기장 의존성을 보였다. 이는 자성 재료의 물성을 측정하는 성능이 조화파의 신호 크기에 의존함을 의미한다. 따라서 0차 조화파 신호의 ΔV_{0f_0} 가 2차 조화파 신호의 ΔV_{2f_0} 보다 약 $\sqrt{2}$ 배 크게 나타난 것도 0차 조화파 신호가 2차 조화파 신호보다 약 $\sqrt{2}$ 배 크기 때문임을 알 수 있었다. Fig. 5(a)에 삽입한 1차 조화파 신호의 ΔV_{1f_0} 는 신호가 작고 자기장 의존성을 파악하기 어려운 신호 특성을 보였다. 0차, 1차 및 2차 조화파 각각에 대한 자성 재료의 물성측정 성능을 확인하기 위하여 $H=0$ 에서 ΔV_{PHR} 의 주파수 스펙트럼을 측정하였다.

Fig. 5(b)는 $H=0$ 에서 측정된 ΔV_{PHR} 의 주파수 스펙트럼을 나타낸 것이다. 0차 및 2차 조화파 신호의 ΔV_{0f_0} 과 ΔV_{2f_0} 모두는 1차 조화파 신호의 ΔV_{1f_0} 보다 크게 측정되었으며, 0차

조화파 신호의 $\Delta V_{0\%}$ 가 2차 조화파 신호의 $\Delta V_{2\%}$ 보다 $\sqrt{2}$ 배 크게 측정되었다. 이들 결과로부터 0차 및 2차 조화파 신호는 자성 재료의 물성측정에 활용할 수 있으며, 특히 0차 조화파를 이용하면 2차 조화파보다 $\sqrt{2}$ 배 향상된 신호를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

IV. 결 론

교환 바이어스 특성을 갖는 NiFe/Cu/MnIr 자성 박막을 사용하여 $50 \times 250 \mu\text{m}^2$ 크기의 PHR 센서를 제작하였으며, 센서에 교류 전류를 인가한 경우 나타나는 0차(직류) 및 1차 (PHR) 및 2차 조화파 신호의 자기장 의존성을 분석하였다. PHR 센서에서 측정된 0차, 1차 및 2차 조화파 신호의 자기장 의존성은 단일 자구 모델로 계산한 결과와 일치하였다. 1차 조화파 신호의 자기장 의존성은 $H=0$ 근처에서 자기장에 따라 민감도와 선형성이 우수한 전형적인 PHR 신호의 모양이 나타났다. 0차 및 2차 조화파 신호의 자기장 의존성은 1차 조화파 신호를 자기장에 따라 미분한 모양과 같았으며, 0차 조화파 신호가 2차 조화파 신호보다 $\sqrt{2}$ 배 크게 나타났다.

0차, 1차 및 2차 조화파 신호의 자성 재료의 물성 측정 성능을 검증하기 위하여 비정질 CoFeB 박막을 사용하였다. CoFeB 박막을 PHR 센서 위에 올린 경우와 CoFeB 박막이 없는 경우에 대하여 0차, 1차 및 2차 조화파 신호의 자기장 의존성을 각각 측정하였다. 1차 조화파 신호의 자기장 의존성은 CoFeB의 유무에 따라 변화가 거의 없는 반면, 0차 및 2차 조화파 신호는 CoFeB의 유무에 따른 신호 차이가 크게 나타났다. 특히, 0차 조화파 신호의 차이가 2차 조화파 신호의 차이보다 $\sqrt{2}$ 배 크게 나타났다. 이들 결과로부터 0차 및 2차 조화파 신호는 자성 박막의 유무에 따른 신호 차이가 크므로 자성 재료의 물성측정에 활용할 수 있으며, 특히 0차 조화파는 2차 조화파보다 자성 박막의 물성측정 성능을

$\sqrt{2}$ 배 향상할 수 있다.

따라서 자기장에 따른 민감도 및 선형성이 우수한 $\Delta V_{1\%}$ 는 자기장 센서에 이용할 수 있으며, 센서 위에 놓인 자성 재료에 민감하게 반응하는 $\Delta V_{0\%}$ 및 $\Delta V_{2\%}$ 는 자성 물성분석 센서에 이용할 수 있다. 특히, $\Delta V_{0\%}$ 를 이용한 자성 물성분석 센서는 $\Delta V_{0\%}$ 를 이용한 자성 물성분석 센서보다 감도를 $\sqrt{2}$ 배 향상할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 안동대학교 기본 연구 지원 사업에 의하여 연구되었습니다. PHR 센서를 제작해 주신 DGIST 김철기 교수님과 이재훈 학생에게 감사드립니다.

References

- [1] S. J. Han, L. Xu, R. J. Wilson, and S. X. Wang, IEEE Trans. Magn. **42**, 3560 (2006).
- [2] L. Ejsing, M. F. Hansen, A. K. Menon, H. A. Ferreira, D. L. Graham, and P. P. Freitas, J. Magn. Mater. **293**, 667 (2005).
- [3] L. Neumann and M. Meinert, AIP ADVANCES **8**, 095320 (2018).
- [4] S. Lee, J. Ryu, J. G. Choi, J. M. Kim, J. W. Lee, J. Y. Park, J. Kang, and B. G. Park, J. Korean Magn. Soc. **29**, 108 (2019).
- [5] Y. Wen, J. Wu, P. Li, Q. Zhang, Y. Zhao, A. Manchon, J. Q. Xiao, and X. Zhang, Phys. Rev. B **95**, 104403 (2017).
- [6] Y. C. Lau and M. Hayashi, Jpn. J. Appl. Phys. **56**, 0802B5 (2017).
- [7] S. S. Yoon, D. Y. Kim, J. H. Lee, S. J. Kim, and C. G. Kim, J. Korean Magn. Soc. **29**, 166 (2019).
- [8] S. S. Yoon and D. Y. Kim, J. Korean Magn. Soc. **30**, 19 (2020).
- [9] T. McGuire and R. Potter, IEEE Trans. Magn. **11**, 1018 (1975).
- [10] S. S. Yoon and D. Y. Kim, J. Korean Magn. Soc. **27**, 30 (2017).