

Magnetic Field Dependence of Magnetic Bead Signals

Dong Young Kim* and Seok Soo Yoon

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

Jae-Hoon Lee and Cheol-Gi Kim

Department of Emerging Materials Science, DGIST, Daegu 42988, Korea

(Received 10 October 2018, Received in final form 6 December 2018, Accepted 6 December 2018)

The magnetic field dependence of magnetic bead signals were measured by planner Hall resistance (PHR) and self-field (SF) methods by using PHR sensor. The bead signals of $\Delta PHR/PHR_0$ measured with PHR method and $\Delta SF/SF_0$ measured with SF method showed high hysteresis and low stability at $H < H_{eff}$, which was due to the hysteresis of the magnetic materials of NiFe/Cu/MnIr used in PHR sensor. While, the bead signals measured at $H > H_{eff}$ showed very stable and $\Delta SF/SF_0$ showed maximum 14 times improved signal properties than $\Delta PHR/PHR_0$. The stable bead signals measured by SF method at $H > 2H_{eff}$ can be used to the biosensor.

Keywords : planner Hall effect, biosensor, self-field, iron oxide nanoparticles

자성비드 신호의 자기장 의존성 분석

김동영* · 윤석수

안동대학교 물리학과, 경북 안동시 경동로 1375, 36729

이재훈 · 김철기

DGIST신물질과학전공, 대구시 달성군 현풍면 테크노중앙대로 333, 42988

(2018년 10월 10일 받음, 2018년 12월 6일 최종수정본 받음, 2018년 12월 6일 게재확정)

본 연구에서는 PHR (planner Hall resistance) 방법과 SF (self-field) 방법을 이용하여 자기장에 따른 자성비드 신호를 측정하였다. PHR 방법에 의한 비드 신호 $\Delta PHR/PHR_0$ 과 SF 방법에 의한 비드 신호 $\Delta SF/SF_0$ 는 $H < H_{eff}$ 에서 높은 이력 특성과 낮은 안정성을 보였으며, 이는 센서에 사용된 NiFe/Cu/MnIr 재료의 자기 이력 특성에 기인함을 알 수 있었다. 한편 $H > H_{eff}$ 에서 측정된 비드 신호는 매우 안정된 신호 특성을 보였으며, $\Delta SF/SF_0$ 는 $\Delta PHR/PHR_0$ 보다 최대 14배 이상 향상된 특성을 보였다. 따라서 $H > 2H_{eff}$ 의 자기장에서 SF 방법을 사용하여 측정된 안정된 비드 신호는 바이오센서에 응용될 수 있다.

주제어 : 평면홀 효과, 바이오센서, 자체 자기장, 산화철 나노입자

I. 서 론

최근에 DNA, 단백질, 세포, 면역체, 바이러스 등 다양한 종류의 바이오 분자를 감지할 수 있는 차세대 나노-바이오센서 기술 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 자기장에 따른 저항 변화를 이용하는 자기저항(Magnetoresistance) 센서는 표적 바이오 분자가 흡착된 자성비드가 센서 위에 형

성되었을 때, 자성비드 하나의 신호를 측정할 수 있을 정도로 민감도가 매우 우수하므로 고분해능 나노-바이오센서로 유명하다[1].

자기저항 센서는 재료의 구조 및 측정 방법에 따라 다양하게 이용되고 있다. 단일 강자성 박막을 이용한 이방성 자기저항 센서, 강자성/금속/강자성의 구조를 갖는 거대 자기저항 센서, 강자성/절연체/강자성의 재료 구조를 갖는 터널링 자기저항 센서 등이 바이오센서로 이용되고 있다[2-5]. 그러나 이들 센서는 재료의 자체 저항과 자기저항의 신호가 혼합되어 측정되며, 자기저항 신호는 재료의 자체 저항에 의한 신호에 비하여 낮다. 자

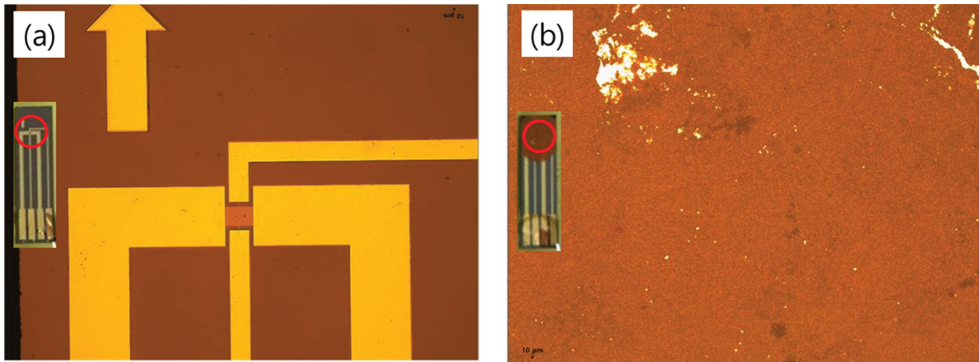


Fig. 1. (Color online) Photography of (a) PHR sensor without magnetic bead and (b) PHR sensor with magnetic bead.

체 저항에 의한 신호는 오프셋(offset) 신호로 작용하므로 자기 저항 센서를 사용하여 미약한 자성비드 신호를 측정할 경우 자체 저항에 의한 오프셋 신호를 제거하는 것이 요구된다.

자체 저항에 의한 오프셋 신호가 제거된 평면홀 저항(planer Hall resistance, PHR) 효과 방법이 자성비드 측정용 바이오 센서에 응용되고 있다[6-8]. PHR 센서는 강자성 박막에 흐르는 전류의 방향과 수직인 방향에서 전기적인 신호를 측정하므로 자체 저항에 의한 오프셋 신호는 사라지고 자기저항 신호만 측정한다. 또한, 자기장에 따른 자기저항 신호의 기울기는 오프셋 신호에 의존하지 않으므로, 자기저항 센서에 교류 자기장을 인가한 후 기울기 성분을 추출하는 주파수 선택적 측정법이 이용되고 있다[9-11]. 이렇듯 오프셋을 제거하는 다양한 측정법은 센서 위의 자성비드를 자화시키기 위하여 자기장을 사용한다. 그러므로 자기장에 의한 센서 신호와 자성비드에 의한 미약한 신호가 혼합되어 측정된다. 따라서 미약한 자성비드에 의한 신호를 추출하기 위하여 자기장에 의한 센서 신호를 제거하는 것이 필요하다. 자기장에 의한 센서 신호를 배제하고 자성비드의 신호를 추출하기 위하여 자기저항 센서의 자체 자기장(Self-field, SF)을 이용하는 SF 방법이 사용되고 있다[12,13].

본 연구에서는 오프셋 신호가 없을 뿐만 아니라 선형성이 우수한 PHR 센서를 자성비드 측정용 센서로 사용하였으며, PHR 방법과 SF 방법을 이용하여 측정된 자성비드 신호의 자기장 의존성을 분석하였다.

II. 실험 방법

본 연구에서 제작한 PHR 센서는 DC 마그네트론 스퍼터링 방법으로 증착한 Ta(5)/NiFe(20)/Cu(0.5)/IrMn(10)/Ta(5)(단위: nm)구조를 갖는 박막을 사용하였다. 증착시 초기 진공은 10^{-8} Torr 이하였으며, Ar 공정 압력은 3 mTorr로 하였다. 150 Oe의 자기장을 박막과 평행하게 인가하여 IrMn에 의한 교환 결

합력의 크기를 향상시켰다. PHR 센서는 Fig. 1(a)에서 보인 것과 같이 광식각 및 건식 에칭 공정을 통하여 $100 \times 200 \mu\text{m}^2$ 크기로 제작하였다. 누설 전류와 전극의 부식을 막기 위한 보호층으로 RF 마그네트론 스퍼터링으로 150 nm 두께의 SiO_2 를 증착하였다.

PHR 센서의 자기저항 특성을 분석을 위하여 자기장에 따른 PHR 신호(V_{PHR})를 Lock in amplifier(SR830)을 이용하여 4단자법으로 측정하였다. 측정에 사용된 교류 전류의 주파수(f)는 400 Hz이었고, 전류의 세기(I)는 60 mA를 인가하였다. PHR 신호는 인가한 전류의 주파수인 400 Hz의 출력 신호를 $-400 \text{ e} - 40 \text{ Oe}$ 의 자기장 범위를 양복하며 측정하였다. SF 방법으로 측정된 신호 V_{SF} 는 PHR 측정법과 동일한 구성에서 $2f$ 인 800 Hz의 신호를 $0 \sim 40 \text{ Oe}$ 의 자기장 범위에서 측정하였다. 자성비드의 신호를 측정하기 위하여 산화철 나노입자로 구성된 지름이 $2.8 \mu\text{m}$ 인 자성비드 원액(dynabeads™ 280 Streptavidin)을 PHR 센서 위에 떨어뜨려 말린 후(Fig. 2(b)), 자기장에 따른 V_{wPHR} 과 V_{wSF} 를 각각 측정하였다.

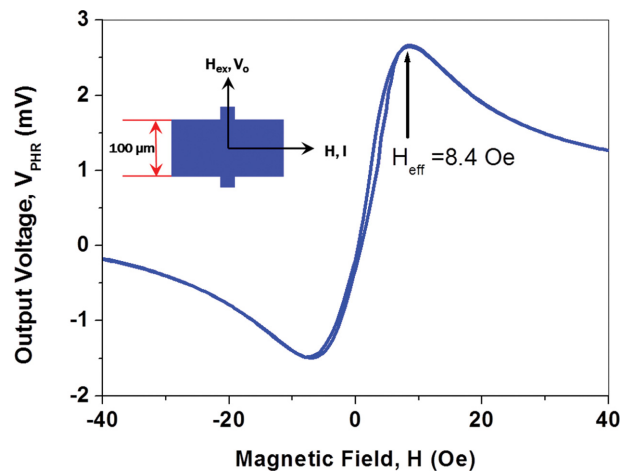


Fig. 2. (Color online) Magnetic field dependence of V_{PHR} . The insert figure shows the PHR sensor configuration.

III. 실험 결과 및 고찰

궤도 전자들의 스핀 산란에(s-d 산란) 기인하는 이방성 자기저항(anisotropic magnetoresistance, AMR)은 강자성 재료에 흐르는 전류 밀도(\vec{J})와 자화벡터(\vec{M})의 사잇각에 따라 비저항이 변화되는 현상이며, 전류 밀도와 자화벡터에 의존하는 전기장(\vec{E})은 다음과 같이 표현된다[14].

$$\vec{E} = \rho_{\perp} \vec{J} + (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \vec{m}(\vec{J} \cdot \vec{m}) \quad (1)$$

여기서 ρ_{\perp} 및 ρ_{\parallel} 은 자구와 전류의 방향이 수직 및 수평인 경우 각각에 대한 비저항이며, $\vec{m} = \vec{M}/M_s$ 은 자구의 단위 벡터이다. 식(1)에서 나타난 전기장은 전류밀도와 평행한 성분과 전류밀도에 수직인 성분으로 나뉘질 수 있다. 이때 전류밀도와 평행한 방향의 전기장 성분 E_{\parallel} 은 이방성 자기저항(anisotropic magnetoresistance, AMR) 효과에 의한 특성이며, 전류밀도와 수직인 방향의 전기장 성분 E_{\perp} 은 평면홀(planar Hall resistance, PHR) 효과에 의한 특성이다.

자기저항 센서에 사용된 강자성 재료의 길이, 폭, 두께가 각각 l , w , t 인 경우, 전류 $I = Jw$ 이고, 저항 $R = \frac{\rho l}{tw}$ 이다. 따라서 AMR 효과에 의한 출력 전압($V_{AMR} = E_{\parallel}l$)은 식(1)로부터 다음과 같이 표현된다.

$$V_{AMR} = I(R_{\perp} + \Delta R \cos^2 \theta) \quad (2)$$

여기서 $\Delta R = R_{\parallel} - R_{\perp}$ 이고, θ 는 전류와 자구 방향의 사잇각이다. AMR 효과에 의한 출력 전압은 R_{\perp} 에 의한 오프셋 전압을 가지며, 전류와 자구 방향의 사잇각 θ 에 따라 $\cos^2 \theta$ 의 형태로 출력 전압이 변한다.

식(1)로부터 PHR 효과에 의한 출력 전압($V_{PHR} = E_{\perp}w$)은 다음과 같이 표현된다.

$$V_{PHR} = I \frac{\Delta \rho}{t} \sin \theta \cos \theta \quad (3)$$

PHR 효과에 의한 출력 전압은 오프셋 전압이 0이며, 전류와 자구 방향의 사잇각 θ 에 따라 $\sin \theta \cos \theta$ 의 형태로 출력 전압이 변한다. 본 연구에서는 오프셋 전압이 0인 장점을 갖는 PHR 센서를 이용하여 5 nm 크기의 산화철 나노입자로 구성되어 초상자성 특성을 갖는 직경이 2.8 μm 인 자성비드 신호를 측정하였다. PHR 센서는 초소형화 하더라도 출력 신호가 유지되는 장점이 있으므로 마이크로 크기의 자성비드 측정에 유리하다.

Fig. 1(a)에서 보인 PHR 센서는 $l = 200 \mu\text{m}$, $w = 100 \mu\text{m}$, $t = 20 \text{ nm}$ 인 직사각형 모양의 NiFe 박막을 사용하였다. Fig.

2에 삽입한 그림과 같이 자화 용이축으로 작용하는 교환 결합력(H_{ex})의 방향과 수직으로 전류와 자기장을 인가하였으며, 출력 전압 V_{PHR} 은 교환 결합력(H_{ex})과 동일한 방향에서 측정하였다. 자기장에 따른 PHR 센서의 출력 전압 V_{PHR} 은 Fig. 2에서 보인 것과 같다.

식(3)에서 PHR 센서의 출력 전압은 전류와 자구 방향의 사잇각 θ 가 45°인 경우 최대가 된다. 자화 용이축과 자기장의 방향은 서로 수직이므로 전류와 자구 방향의 사잇각은 자기장과 유효 이방성 자기장 H_{eff} 이 같을 때 $\theta = 45^\circ$ 가 된다. 따라서 NiFe/Cu/MnIr 다층 박막의 H_{eff} 는 출력 전압이 최대가 되는 자기장인 8.4 Oe임을 알 수 있다. 본 연구에서 사용한 NiFe/Cu/MnIr 다층 박막은 $H < H_{eff}$ 에서 이력 특성이 두드러지게 나타나고 있다. Fig. 2에서 보인 것과 같이 PHR 센서의 출력 전압은 식(3)에 따라 $H < H_{eff}$ ($\theta < 45^\circ$ 인 영역)에서는 자기장에 따라서 증가하는 θ 에 의하여 선형성이 우수한 출력 전압 특성을 보이고 있으며, $H > H_{eff}$ ($\theta > 45^\circ$ 인 영역)에서는 출력 전압이 자기장의 세기에 따라서 감소하는 특성을 보인다.

자기장에 따른 자성비드 신호를 측정하기 위하여 PHR 센서 위에 자성비드 원액을 떨어뜨린 후 약 12시간 이상 건조시켰다(Fig. 1(b)). 자성비드가 있는 PHR 센서의 출력 신호는 교류전류의 주파수 f 와 동일한 주파수를 갖는 신호를 자기장에 따라 측정하였다. Fig. 1(b)에서 비드가 있는 PHR 센서의 출력신호는 자기장에 의한 PHR 센서 신호와 자성비드에 의한 미약한 신호가 혼합되어 측정된다. 따라서 자기장에 의한 PHR 센서 신호를 배제하고 자성비드의 신호를 나타내기 위하여 PHR 방법에 의한 비드 신호는 다음과 같이 정의하였다.

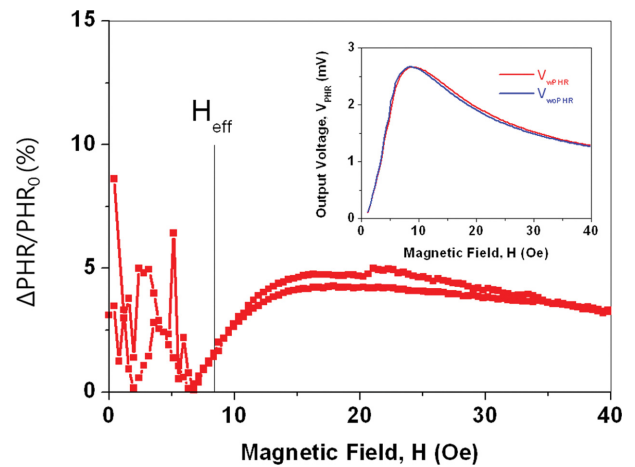


Fig. 3. (Color online) Magnetic field dependence of bead signal $\Delta\text{PHR}/\text{PHR}_0$ obtained by PHR method. The insert figure shows the magnetic field dependence of $V_{w\text{PHR}}$ and $V_{wo\text{PHR}}$ with and without the magnetic bead measured by PHR method.

$$\frac{\Delta PHR}{PHR_o} = \left| \frac{V_{wPHR} - V_{woPHR}}{V_{woPHR}} \right| \times 100 \quad (4)$$

여기서 V_{wPHR} 는 비드가 있는 상태에서 측정된 PHR 센서의 출력 전압이고, V_{woPHR} 는 비드가 없는 상태에서 측정된 PHR 센서의 출력 전압이다.

Fig. 3에 삽입한 그림은 자성비드의 유무에 대하여 자기장에 따른 PHR 센서의 출력 신호를 보인 것이다. 청색 실선은 Fig. 2에서 측정된 자성비드가 없는 출력 전압인 V_{woPHR} 이며, 붉은색 실선은 자성비드가 있는 PHR 센서의 출력 전압인 V_{wPHR} 이다. 비드의 유무에 따른 PHR 센서의 출력 전압의 차이는 미미하게 나타났다. 이는 자성비드가 만드는 신호가 PHR 센서의 출력 신호보다 매우 작음을 의미한다. 실제로 자성비드가 만드는 자기장은 자성비드의 자화율 χ_{bead} , 자기장 H , 자성비드의 부피 V_{bead} 에 비례한다[13].

$$H_{bead} = \frac{\chi_{bead} H V_{bead} A_{bead}}{d^3 A_{sensor}} \quad (5)$$

여기서 d 는 자성비드의 반지름이다. 본 연구에서 사용한 지름이 $2.8 \mu\text{m}$ 자성 비드의 $\chi_{bead} \approx 0.1$ 이고, $V_{bead} A_{bead} / d^3 A_{sensor} \approx 0.1$ 인 경우 $H_{bead} \approx 0.01H$ 가 된다. 즉, 자성비드가 만드는 자기장 H_{bead} 는 비드를 자화시키기 위하여 인가한 자기장 H 에 비하여 매우 작다. 자성비드가 있는 PHR 센서의 출력 전압인 V_{wPHR} 은 자기장에 의한 신호와 식(5)의 비드가 만든 미약한 자기장에 의한 신호를 포함하고 있다. 따라서 미약한 자성비드 신호를 분석하기 위하여 식(4)와 같이 비드의 유무에 따른 신호의 차이를 비드가 없는 신호로 나누어 백분율로 정의하였다.

PHR 방법으로 측정된 자기장에 따른 비드 신호 $\Delta PHR / PHR_o$ 는 Fig. 3에 보인 것과 같다. 자기장에 따른 비드 신호는 $H < H_{eff}$ 에서 신호의 요동폭이 매우 크게 나타났으며, $H > H_{eff}$ 에서는 요동폭이 작은 안정적인 신호 특성을 보였다. $H < H_{eff}$ 에서 보인 비드 신호의 요동은 센서에 사용된 NiFe/Cu/MnIr 박막의 자기 이력 특성의 영향으로 보인다. 자성비드 신호가 안정한 특성을 보이는 $H > H_{eff}$ 에서, 자성비드 신호의 최댓값은 약 5%로 측정되었다. 그러나 $H > H_{eff}$ 측정된 자성비드 신호는 이력 특성이 크게 나타났으며, 이는 비드 신호 측정시 오차가 크게 발생할 수 있음을 의미한다.

따라서 PHR 방법을 이용하여 자성비드 신호를 측정할 경우 자성 박막의 이력 특성에 의한 오차를 줄이는 것이 필요하다. 또한 비드 신호는 PHR 센서의 출력 전압 V_{woPHR} 에 비하여 최대 약 5%의 신호로 측정되므로, PHR 센서의 출력 전압 V_{woPHR} 를 감소시키는 것이 필요하다. PHR 센서를 이용한 비드 신호 측정시 나타나는 이러한 단점을 보완하기 위하

여, 센서에 흐르는 전류가 만드는 자체 자기장(self-field, SF) H_{SF} 을 이용하여 자성비드 신호를 측정하는 SF 방법을 사용하였다.

SF 방법은 H_{SF} 가 센서 표면에 있는 자성비드를 자화시키고, 자화된 비드가 만든 자기장에 의한 전압 V_{SF} 를 측정하는 방법으로 센서에 흐르는 교류전류의 주파수의 2배인 $2f$ 의 주파수를 갖는 신호이다. PHR 방법에 의한 출력 전압 V_{PHR} 은 교류 전류의 주파수 f 의 특성을 갖는 신호이지만, SF 방법에 의한 출력 전압 V_{SF} 는 교류 전류의 주파수인 f 와 자체 자기장 H_{SF} 에 의한 주파수인 f 의 합성 효과인 $2f$ 의 신호 특성이다. SF 방법에 의한 비드 신호는 다음과 같이 정의하였다.

$$\frac{\Delta SF}{SF_o} = \left| \frac{V_{wSF} - V_{woSF}}{V_{woSF}} \right| \times 100 \quad (6)$$

여기에서 V_{wSF} 는 비드가 있는 상태에서 SF 방법으로 측정된 출력 전압이고, V_{woSF} 는 비드가 없는 상태에서 SF 방법으로 측정된 출력 전압이다.

Fig. 4에 삽입한 그림은 자성비드의 유무에 대하여 자기장에 따른 SF 방법으로 측정된 출력 신호를 보인 것이다. 청색 실선은 자성비드가 없는 출력 전압인 V_{woSF} 결과이며, 붉은색 실선은 자성비드가 있는 출력 전압인 V_{wSF} 를 나타낸 결과이다. SF 방법으로 측정된 출력 신호는 비드의 유무에 따른 차이가 매우 두드러지게 나타났으며, 이러한 신호 특성으로부터 SF 방법이 비드 신호 측정에 유리함을 알 수 있다.

SF 방법으로 측정된 자기장에 따른 비드 신호 $\Delta SF / SF_o$ 는 Fig. 4에 보인 것과 같다. 자기장에 따른 비드 신호 $\Delta SF / SF_o$ 는 $H < H_{eff}$ 에서 약 300% 이상의 매우 큰 신호로 나타났으나 신호의 요동 또한 매우 크게 나타났다. $H > H_{eff}$ 에서는 자

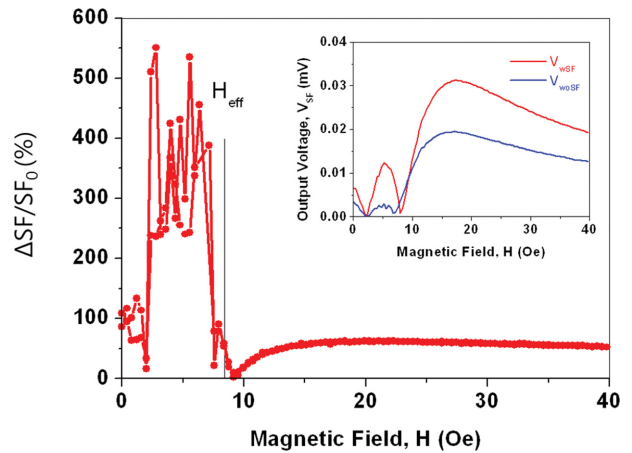


Fig. 4. (Color online) Magnetic field dependence of bead signal $\Delta SF / SF_o$ obtained by SF method. The insert figure shows the magnetic field dependence of V_{wSF} and V_{woSF} with and without the magnetic bead measured by SF method.

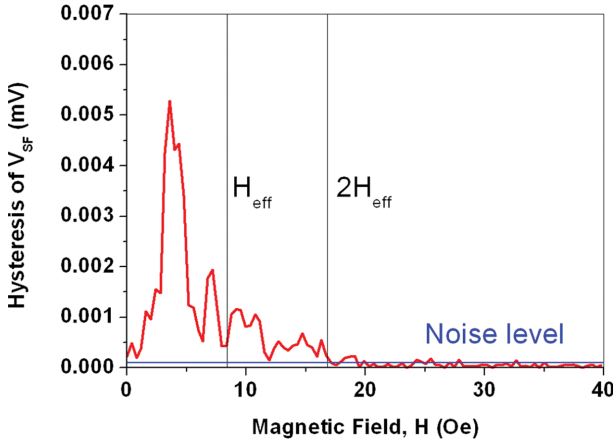


Fig. 5. (Color online) Magnetic field dependence of hysteresis of V_{SF} .

자기장에 따라 매우 안정적인 신호 특성을 보였다. $H < H_{eff}$ 에서 보인 신호의 요동은 PHR 방법으로 측정된 비드 신호에서 나타난 것과 같이 센서에 사용된 자성 박막의 자기 이력 특성에 의한 영향으로 보인다. 안정한 특성을 보이는 $H > H_{eff}$ 에서 비드 신호의 최대값은 약 68%로 나타났으며, SF 방법에 의한 비드 신호 $\Delta SF/SF_o$ 는 PHR 방법에 의한 비드 신호 $\Delta PHR/PHR_o$ 보다 최대 14배 이상 향상된 특성을 보였다. 이로부터 비드 측정 성능은 SF 방법이 PHR 방법보다 우수함을 알 수 있었다. SF 방법으로 측정된 비드 신호는 센서의 이력 특성에 의하여 측정값의 오차를 유발할 수 있다. 따라서 이력 특성이 적은 자기장 조건을 확보하기 위하여 자기장의 증가 및 감소에 따른 SF 방법으로 측정된 출력 전압 V_{SF} 의 이력 특성을 분석하였다.

Fig. 5는 자기장의 증감에 따른 V_{SF} 의 이력 특성을 보인 것이다. V_{SF} 의 이력 특성은 자화 곤란축에서 H_{SF} 에 의한 minor loop의 이력 특성을 반영하며, $H < H_{eff}$ 에서는 크게 나타났다. 그러나 $H > H_{eff}$ 에서는 자기장에 따라서 감소하는 경향을 보였으며, $H > 16$ Oe 이상의 자기장에서는 장비의 노이즈 전압인 $0.1 \mu V$ 보다 낮게 나타났다. 즉, V_{SF} 의 이력 특성이 노이즈 전압보다 적은 자기장 구간은 $H > 2H_{eff}$ 이며, SF 방법을 사용하여 비드 신호를 측정할 경우 $H > 2H_{eff}$ 에서 측정하는 것이 유리함을 알 수 있었다. Fig. 4에서 보인 것과 같이 $H > 2H_{eff}$ 에서 SF 방법으로 측정된 비드의 유무에 따른 출력 신호의 최대 차이는 $11.8 \mu V$ 였으므로 비드 농도가 118배 감소한 비드 신호 분석이 가능하다.

본 연구의 결과로부터 SF 방법을 사용하여 비드 신호를 측정할 경우 $H > 2H_{eff}$ 의 자기장 영역에서 측정하는 것이 유리함을 알 수 있었다. 따라서 $H > 2H_{eff}$ 의 자기장에서 SF 방법을 사용하여 측정된 안정한 비드 신호는 바이오센서에 응용될 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 NiFe/Cu/MnIr 자성 박막 재료를 사용하여 $100 \times 200 \mu m^2$ 크기의 PHR 센서를 제작하였으며, PHR 방법과 SF 방법을 이용하여 자기장에 따른 자성비드 신호를 측정하였다. PHR 방법은 교류전류의 주파수와 동일한 f 주파수를 갖는 출력 전압을 측정하였으며, SF 방법은 교류전류의 주파수의 2배인 $2f$ 주파수를 갖는 출력 전압을 측정하였다. PHR 방법으로 측정된 비드 신호 $\Delta PHR/PHR_o$ 은 $H < H_{eff}$ 에서 신호의 요동이 매우 크게 나타났으며, $H > H_{eff}$ 에서는 안정한 신호특성을 보였다. PHR 방법으로 측정된 비드 신호는 $H > H_{eff}$ 에서 최대 5%로 측정되었다. SF 방법으로 측정된 비드 신호 $\Delta SF/SF_o$ 은 $H < H_{eff}$ 에서 신호 특성은 크게 나타났으나 PHR 방법으로 측정된 비드 신호와 같이 신호의 요동 또한 매우 크게 나타났다. $H > H_{eff}$ 에서는 이력 특성이 현저히 감소하여 매우 안정적인 신호 특성을 보였으며, 자성비드 신호는 최대 68%로 측정되었다. $H > H_{eff}$ 에서는 SF 방법에 의한 비드 신호가 PHR 방법에 의한 비드 신호인 보다 최대 14배 이상 향상된 특성을 보였으며, 높은 비드 신호를 안정적으로 측정하기 위하여 SF 방법을 사용하는 것이 유리함을 알 수 있었다. 또한 $H > 2H_{eff}$ 에서 측정된 V_{SF} 의 이력 특성은 노이즈 신호보다 적게 나타났으며, 최적의 비드 측정 자기장 구간은 $H > 2H_{eff}$ 임을 알 수 있었다.

따라서 비드 신호의 향상 및 안정성을 확보하기 위하여 SF 방법을 사용하여 $H > 2H_{eff}$ 에서 측정하는 것이 최적의 조건이며, 이러한 조건에서 측정된 안정한 비드 신호는 바이오센서에 응용될 수 있다.

감사의 글

이 논문은 안동대학교 기본연구지원사업에 의하여 연구되었음.

References

- [1] D. R. Baselt, G. U. Lee, M. Mohan, S. W. Metzger, P. E. Sheehan, and R. J. Colton, Biosens. Bioelectron **13**, 731 (1998).
- [2] M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen, and F. Petroll, Phys. Rev. Lett. **61**, 2472 (1988).
- [3] G. Binasch, P. Grunberg, F. Saurenbach, and W. Zinn, Phys. Rev. B **39**, 2489 (1989).
- [4] S. S. Parkin, C. Kaiser, A. Panchula, P. M. Rice, B. Hughes, M. Samant, and S. H. Yang, Nature Mat. **3**, 862 (2004).
- [5] S. Yuasa, T. Nagahama, A. Fukushima, Y. Suzuki, and K. Ando, Nature Mat. **3**, 868 (2004).
- [6] D. Y. Kim, B. S. Park, and C. G. Kim, J. Appl. Phys. **88**, 3490

- (2000).
- [7] N. T. Thanh, M. G. Chun, N. D. Ha, K. Y. Kim, C. O. Kim, and C. G. Kim, *J. Magn. Magn. Mater.* **305**, 432 (2006).
- [8] N. T. Thanh, L. T. Tu, N. D. Ha, C. O. Kim, C. G. Kim, K. H. Shin, and P. Rao, *J. Appl. Phys.* **101**, 053702 (2007).
- [9] J. Lee, N. Sato, D. J. B. Bechstein, S. J. Osterfeld, J. Wang, A. W. Gani, D. A. Hall, and S. X. Wang, *Sci. Rep.* **6**, 18692 (2016).
- [10] D. J. B. Bechstein, J. Lee, C. C. Ooi, A. W. Gani, K. Kim, R. J. Wilson, and S. X. Wang, *Sci. Rep.* **5**, 11693 (2015).
- [11] S. J. Han, L. Xu, R. J. Wilson, and S. X. Wang, *IEEE Trans. Magn.* **42**, 3560 (2006).
- [12] L. Ejsing, M. F. Hansen, A. K. Menon, H. A. Ferreira, D. L. Graham, and P. P. Freitas, *J. Magn. Magn. Mater.* **293**, 667 (2005).
- [13] S. Kamara, Q. Tran, V. Davesne, G. Félix, L. Salmon, K. Kim, C. Kim, A. Bousseksou, and F. Terki, *Adv. Mater.* 1703073 (2017).
- [14] T. McGuire and R. Potter, *IEEE Trans. Magn.* **11**, 1018 (1975).