

Improvement of Output Signals by Square Wave Driving in Planar Hall Resistance Sensor

Tae Geun Moon, Seok Soo Yoon, and Dong Young Kim*

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

(Received 14 February 2021, Received in final form 9 March 2021, Accepted 9 March 2021)

In PHR sensor, PHR signals V_{PHR} was proportional to the driving current, V_{DC} and V_{2f} signals were caused by self field by sine wave driving current. The V_{PHR} and V_{2f} by sine wave driving were well fitted with calculated one by single domain model. The V_{PHR} by square wave driving were measured as the $1f, 3f, 5f \dots$ signals, which higher order harmonics were included in square wave. The V_{DC} and V_{DC}^{Squ} by sine and square wave driving showed same magnetic field dependence and $V_{DC}^{Squ} = 2V_{DC}$. The magnetic bead signals by square wave driving were 2 times higher than that by sine wave driving. Thus square wave driving can be used for the accuracy improvement of biosensors.

Key words : Planar Hall, magnetoresistance, harmonic signal, driving method

사각파 구동에 의한 평면홀 저항 센서의 출력 신호 향상

문태근 · 윤석수 · 김동영*

안동대학교 물리학과, 경북 안동시 경동로 1375, 36729

(2021년 2월 14일 받음, 2021년 3월 9일 최종수정본 받음, 2021년 3월 9일 게재확정)

평면홀 저항(PHR) 센서의 구동 전류에 비례하는 PHR 신호 V_{PHR} 및 사인파 구동 전류가 만든 자체 자기장에 의한 직류 신호 V_{DC} 및 2차 조화파 신호 V_{2f} 의 자기장 의존성을 먼저 분석하였다. 사각파 구동에 따른 V_{PHR} 는 사각파의 고차 조화파에 포함된 $1f, 3f, 5f \dots$ 신호가 각각 측정되었다. 사인파와 사각파 구동에 의한 직류 신호 V_{DC} 및 V_{DC}^{Squ} 는 동일한 자기장 의존성을 보였으며, $V_{DC}^{Squ} = 2V_{DC}$ 로 나타났다. 또한, 사각파 구동에 의한 자성 비드 신호는 사인파 구동에 의한 자성 비드 신호보다 2배 향상되었다. 따라서 사각파 구동 방법은 바이오 센서의 정밀도 향상을 위하여 사용할 수 있다.

주제어 : 평면홀, 자기저항, 조화파 신호, 구동 방법

I. 서 론

평면홀 저항(Planar Hall Resistance, PHR) 센서는 투자율이 낮은 초상자성 나노 입자를 탐지하여 병을 조기에 진단하는 바이오센서 개발에 활용되고 있다[1,2]. PHR 센서는 Hall 센서와 같이 구동 전류의 방향과 수직인 방향에서 출력 전압을 측정하며, 센서의 평면과 나란한 자기장을 측정한다. PHR 센서의 출력 전압은 구동 전류에 비례한다. PHR 센서를 교류 전류로 구동하는 경우, 구동 전류와 같은 주파수를 갖는 출력 전압이 PHR 신호가 된다. 한편 센서에 흐르는 구동 전

류는 자체 자기장(self field)을 발생하며, 자체 자기장은 PHR 신호를 교란하여 새로운 유도 전압 신호를 발생시킨다[3]. 주파수가 f 인 구동 전류에 의한 유도 전압 신호는 직류(DC) 신호와 주파수가 $2f$ 인 2차 조화파 신호를 발생시킨다. 이러한 자체 자기장에 의하여 유도된 2차 조화파 신호는 민감도가 우수하여 자성 박막의 자성 물성 측정에 이용하고 있다[4-8]. 사인파 구동인 경우, 직류 신호는 2차 조화파 신호와 함께 생성된다. 그러나 여러 가지 주파수가 합성된 사각파 구동에 의한 직류 신호 특성에 대한 분석은 아직까지 이루어지지 않고 있다.

본 연구에서는 PHR 센서의 사인파와 사각파 구동에 따른 PHR 전압 신호의 자기장 의존성과 자체 자기장에 의하여 유도된 직류(DC) 및 2차 조화파 신호의 자기장 의존성을 비교

분석하였다. 자체 자기장에 의하여 유도된 DC 및 2차 조화파 신호를 이용하여 구동 방법에 따른 자성 비드 검출 성능을 분석하였다.

II. 실험 방법

평면홀 저항 (PHR) 센서는 Fig. 1의 현미경 사진에서 보인 것과 같이 광식각 및 건식 에칭 공정을 통하여 $50 \times 250 \mu\text{m}^2$ 의 크기로 제작하였다. 센서 구동을 위한 전류는 사인파와 사각파를 각각 사용하였으며, 센서에 흐르는 전류는 교환 바이어스 자기장의 방향과 수직 방향(Fig. 1에서 센서의 길이 방향으로 인가하였다. PHR 센서의 출력 전압 신호는 구동 전류의 방향과 수직인 방향(Fig. 1에서 센서의 길이에 수직 방향)에서 측정하였다. PHR 센서에 사용한 강자성 박막은 비등방성 자기저항이 우수한 NiFe(20 nm)를 사용하였으며, 센서의 민감도 및 자기 이력 특성을 향상하기 위하여 교환 결합력을 갖는 구조로 제작하였다. PHR 센서에 사용한 Ta(5)/NiFe(20)/Cu(0.5)/IrMn(10)/Ta(5) (단위: nm) 구조의 자성 박막은 상온에서 Si/SiO₂ 기판 위에 DC 마그네트론 스퍼터링 방법으로 증착하였다. IrMn과 NiFe 박막 사이에서 형성되는 교환 바이어스 자기장을 정렬하기 위하여 박막의 증착 과정 동안 150 Oe의 자기장을 인가하였다. IrMn과 NiFe 사이에 증착한 Cu는 교환 바이어스 자기장 H_{ex} 를 감소하여, PHR 센서의 민감도 향상하였다.

PHR 센서 구동을 위한 사인파 및 사각파 전류 신호의 구동 주파수는 $f=400 \text{ Hz}$ 이었고, 최대 전류는 $I_D = 30 \text{ mA}$ 가

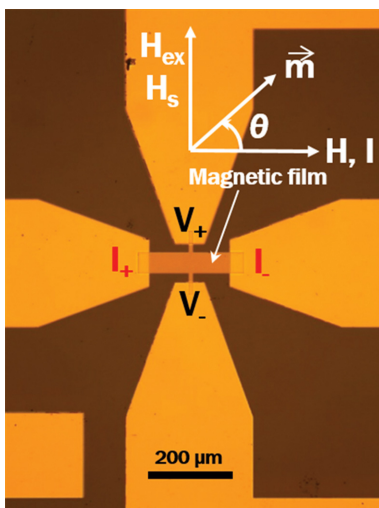


Fig. 1. (Color online) Photography of PHR sensor. The insert figure shows the coordinates for magnetization vector with angle θ from driving current I . Here, H_{ex} , H_i and H are exchange bias field, magnetic field induced by driving current and applied magnetic field, respectively.

되도록 조절하였다. PHR 센서의 출력 전압의 교류(AC) 신호는 Lock-in amplifier(SR830)을 사용하여 측정하였으며, 직류(DC) 신호는 Pre-amplifier(SR560)의 저주파수 통과 필터를 거쳐 멀티미터(Agilent 34401A)를 사용하여 측정하였다. PHR 센서의 출력 전압 신호는 $-40 \text{ Oe} \sim 40 \text{ Oe}$ 의 자기장 범위를 왕복하며 자기장 의존성을 측정하였다. 자성 비드(Dynabeads™ M-280 Streptavidin) 원액을 유리판에 떨어뜨려 말린 비드 시료를 제작하였다. PHR 센서 위에 비드 시료를 올려놓은 경우(V^w)와 비드 시료가 없는 경우($V^{w/o}$) 각각에 대하여 자체 자기장에 의한 직류(DC) 및 2차 조화파 신호를 측정하여 비드 신호($V_{bead} = V^w - V^{w/o}$)를 도출하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

PHR 센서의 출력 전압 신호 V_{PHR} 는 센서에 흐르는 구동 전류 \vec{I} 와 강자성 박막의 자화의 단위 벡터 \vec{m} 의 스칼라 곱인 $\vec{I} \cdot \vec{m} = I \cos \theta$ 에 비례한다. 또한, 자화 방향이 전류와 수직과 수평일 때 각각에 대한 비저항의 차이($\rho_{\perp} - \rho_{\parallel}$)에 비례하고, 강자성 박막인 NiFe의 두께 t 에 반비례한다. PHR 센서에 흐르는 전류의 방향을 Fig. 1에서 보인 것과 같이 센서의 길이 방향으로 일정하게 유지한 경우, 전류의 방향과 수직인 방향에서 측정되는 출력 전압 V_{PHR} 는 다음과 같이 표현된다 [9].

$$V_{PHR} = \frac{(\rho_{\perp} - \rho_{\parallel})I}{t} \sin \theta \cos \theta = V_o \sin 2\theta \quad (1)$$

여기서 $V_o = (\rho_{\perp} - \rho_{\parallel})I/2t$ 이고, θ 는 전류와 자화 방향 사이의 각이다.

식(1)에서 V_{PHR} 신호는 θ 에 의존하며, 전류의 방향은 일정하게 유지되므로 θ 는 자기장에 따라 변하는 자화 방향의 각도를 의미한다. 본 연구에서는 V_{PHR} 의 자기장 의존성을 분석하기 위하여 단일 자구(Single Domain) 모델을 사용하여 강자성 박막의 자기장에 따른 자화 각도 θ 를 계산하였다. 단일 자구 모델을 위하여 사용한 강자성 박막의 에너지 밀도는 다음과 같다[10].

$$E = -M_s H \cos \theta + K_u \sin^2 \theta + \frac{J_k}{t_F} \cos \theta \quad (2)$$

여기서 M_s 는 포화 자화, K_u 는 강자성 박막의 일축 이방성 상수, J_k 는 교환 결합에너지, 및 t_F 는 강자성 박막의 두께이다. 식(2)에서 교환 결합에너지 J_k 는 교환 바이어스 자기장 $H_{ex}(=J_k M_s / t_F)$ 를 형성하며, 강자성 박막의 자화를 한쪽으로 정렬하여 단일 자구를 형성한다. 또한 J_k 는 자화 곤란축의 이력 특성을 제거하여 이력 특성이 없는 V_{PHR} 신호를 얻을 수 있

도록 한다.

1. 사인파 구동 특성

단일 주파수 f 를 갖는 사인파(Sine wave) 전류인 $I = I_D \sin \omega t$ 를 사용하여 PHR 센서를 구동하는 경우, 식(1)의 V_{PHR} 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$V_{PHR} = V_D \sin 2\theta \sin \omega t \quad (3)$$

여기서 $V_D = (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) I_D / 2r$ 이고, ω 는 구동 전류의 각진동수 ($\omega = 2\pi f$)이다. 식(3)에서 보인 것과 같이 단일 주파수 f 를 갖는 사인파 전류 구동의 경우, V_{PHR} 신호는 주파수가 f 이고, 자화 각도 θ 에 의존한다.

Fig. 2는 단일 주파수 특성을 갖는 사인파 구동에 의한 V_{PHR} 신호의 자기장 의존성을 나타낸 것이다. Fig. 2에서 원형 마크(붉은색)는 측정 결과이고, 실선(청색)은 단일자구 모델을 이용하여 계산한 결과이다. 단일 자구 모델 계산을 위하여 교환 바이어스 자기장 $H_{ex} = J_k / M_s t_F = 7.4$ Oe, 일축 이방성 자기장 $H_k = 2K_u / M_s = 5$ Oe를 각각 변수로 사용하였다. Fig. 2에서 V_{PHR} 에 대한 자기장 의존성 측정 결과는 계산 결과와 일치하였으며, H_{ex} 를 갖는 강자성 재료에서 보이는 전형적인 신호 특성을 보였다.

PHR 센서는 전류에 의하여 구동되며, 센서에 흐르는 사인파 구동 전류는 전류의 수직 방향으로 사인파 자체 자기장 $H_s = H_{sD} \sin \omega t$ 를 유도한다. 자체 자기장은 PHR 센서에 사용된 강자성 박막의 자화를 각진동수 ω 로 진동시키며, 이러한 진동은 새로운 출력 신호 V_s 를 발생시킨다. 자체 자기장에 의한 출력 신호 V_s 는 V_{PHR} 과 함께 독립적으로 발생하며, V_{PHR} 신호의 미분과 자체 자기장의 방향에 의존한다. 자체 자기장 H_s

의 방향은 자화 벡터의 $\cos \theta$ 방향이므로 $V_s = \frac{dV_{PHR}}{dH} H_s \cos \theta$ 가 된다. 따라서 자체 자기장 H_s 에 의한 출력 신호 V_s 는 다음과 같이 표현된다.

$$V_s = \frac{2V_D \cos 2\theta \cos \theta \sin \omega t \sin \omega t}{H M_s \cos \theta + 2K_u \cos 2\theta + J_k / t_F \cos \theta} H_s D \quad (4)$$

식(4)에서 $\sin \omega t \sin \omega t = \frac{1}{2}(1 - \sin 2\omega t)$ 를 적용하면, 자체 자기장에 의한 출력 신호 V_s 는 직류(DC) 신호 V_{DC} 와 2차 조화파 신호 V_{2f} 를 발생시킨다.

$$V_s = V_{DC} + V_{2f} \quad (5)$$

V_{DC} 와 V_{2f} 는 주파수 특성을 제외하면 모든 특성이 같다.

직류 전류를 사용하는 경우, V_{PHR} , V_{DC} 및 V_{2f} 신호는 각각 따로 분리하여 나타낼 수 없다. 그러나 주파수가 f 인 사인파 전류를 사용하는 경우, V_{PHR} , V_{DC} 및 V_{2f} 는 각각 주파수가 다르므로 각각 분리하여 측정하는 것이 가능하다. 교류 신호를 측정하는 Lock-in amplifier는 제곱근 평균 제곱(Root mean square)값을 출력하므로 식(2)의 V_{PHR} 과 식(5)의 V_{2f} 는 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 만큼 작게 측정된다. 한편, 직류 신호를 측정하는 멀티미터는 식(5)의 V_{DC} 를 출력 신호로 측정한다. 따라서 측정값의 $V_{DC} = \sqrt{2} V_{2f}$ 가 된다. 즉, 사인파 구동의 경우, 자체 자기장에 의한 DC 신호는 2차 조화파 신호보다 $\sqrt{2}$ 만큼 크게 측정된다.

Fig. 3은 단일 주파수 특성을 갖는 사인파 구동에 의한 V_{2f}

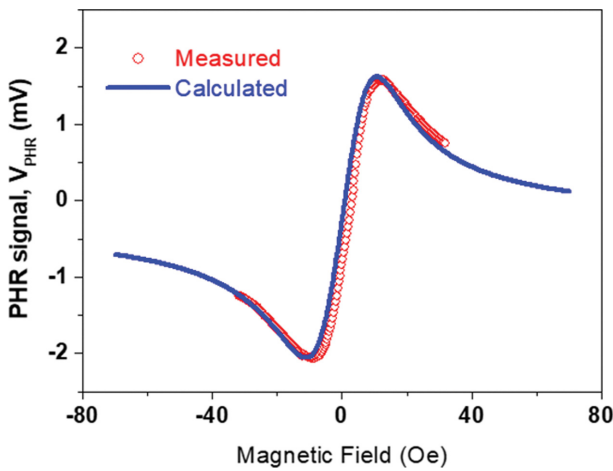


Fig. 2. (Color online) Magnetic field dependence of V_{PHR} (red circle) measured by sine wave driving method. The blue line was calculated by single domain model.

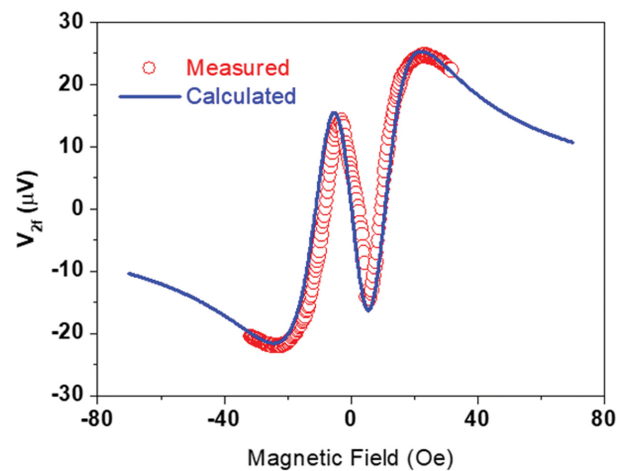


Fig. 3. (Color online) Magnetic field dependence of V_{2f} (red circle) measured by sine wave driving method. The line was calculated by single domain model.

신호의 자기장 의존성을 나타낸 것이다. Fig. 3에서 원형 마크(붉은색)는 측정 결과이고, 실선(청색)은 단일자구 모델을 이용하여 계산한 결과이다. 단일 자구 모델 계산을 위한 변수는 V_{PHR} 계산에 사용한 것과 동일한 변수를 사용하였으며, 자체 자기장 $H_{SD} = 0.5 \text{ Oe}$ 를 추가로 사용하였다. Fig. 3에서 V_{2f} 에 대한 자기장 의존성 측정 결과는 계산 결과와 일치하였다.

단일 주파수 특성을 갖는 사인파 구동에 의한 V_{PHR} 과 V_{2f} 측정 결과는 단일 자구 모델 계산 결과와 일치하였으며, 이러한 결과를 다중 주파수 특성을 갖는 사각파 구동 방식에 의한 출력 특성과 비교하였다.

2. 사각파 구동 특성

구동 주파수가 f 인 사각파(Square wave) 전류는 구동 주파수 f 의 홀수배 고차 조화파로 이루어져 있다[11].

$$I = I_D \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin((2n-1)\omega t)}{2n-1} \quad (6)$$

이러한 사각파 전류를 사용하여 PHR 센서를 구동하는 경우, 사각파 구동 전류에 포함된 고차 조화파 전류 각각이 V_{PHR} 신호에 기여한다.

$$V_{PHR} = \frac{4V_D}{\pi} \sin 2\theta \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots \right) \quad (7)$$

Fig. 4는 다중 주파수 특성을 갖는 사각파 구동에 의한 V_{PHR} 신호의 자기장 의존성을 나타낸 것이다. Fig. 4에서 사각파에 포함된 $f, 3f, 5f$ 주파수를 갖는 전류 각각에 의한 V_{PHR} 신호는 Fig. 3에서 보인 사인파 구동에 의한 신호와 동일한 자기장 의존성을 보였으며, 각각의 주파수에 해당하는

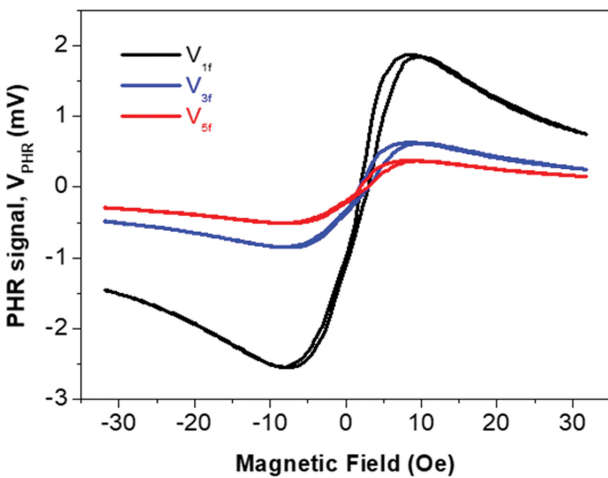


Fig. 4. (Color online) Magnetic field dependence of V_{PHR} ($1f, 2f, 3f$ signals) measured by square wave driving method.

전류의 세기에 따라 신호의 크기 차이를 보였다.

사각파 구동 전류에 포함된 고차 주파수를 갖는 전류는 각각 자체 자기장을 형성하며, 이들 고차 주파수를 갖는 사인파 구동 전류 각각은 직류(DC) 신호를 발생시킨다. 따라서 사각파에 포함된 고차 주파수를 갖는 사인파 진폭의 합은 $\frac{4}{\pi} \left(1 + \frac{1}{3} + \frac{1}{5} + \dots \right) = 2$ 이므로 사각파 구동에 의한 직류 신호 V_{DC}^{Squ} 는 사인파 구동과 비교해 2배 증가하게 된다.

$$V_{DC}^{Squ} = 2V_{DC} \quad (8)$$

사각파 구동에 의한 DC 신호의 측정값 V_{DC}^{Squ} 은 사인파 구동의 2차 조화파 신호의 측정값 V_{2f} 보다 $2\sqrt{2}$ 배 크다. 따라서 사각파 구동에 의한 DC 신호 V_{DC}^{Squ} 는 사인파 구동에 의한 DC 신호 V_{DC} 보다 2배, 사인파 구동에 의한 V_{2f} 신호보다 $2\sqrt{2}$ 배 향상 효과가 있다.

Fig. 5는 다중 주파수 특성을 갖는 사각파 구동에 의한 V_{DC}^{Squ} 와 비교를 위하여 단일 주파수 특성을 갖는 사인파 구동에 의한 V_{DC} 신호의 자기장 의존성을 각각 나타낸 것이다. Fig. 5에서 사각파 구동에 의한 V_{DC}^{Squ} 와 사인파 구동에 의한 V_{DC} 신호는 자기장에 따라 같은 모양을 보였으며, 사각파 구동에 의한 V_{DC}^{Squ} 신호는 사인파 구동에 의한 V_{DC} 신호보다 2 배 크게 나타났다.

V_{PHR} 신호는 자기장 민감도가 우수하여 pT급의 초고감도 자기장 센서에 이용되고 있다[12]. 한편 구동 전류가 만든 자체 자기장에 의한 직류(DC) 신호 V_{DC} 와 2차 조화파 신호 V_{2f} 는 자성 박막의 물성 분석에 이용되고 있다[8]. 본 연구에서는 사인파 구동에 의한 V_{2f} 와 V_{DC} , 사각파 구동에 의한 V_{DC}^{Squ} 신호를 각각 이용하여 자성 비드 신호($V_{bead} = V^w - V^{w/o}$)

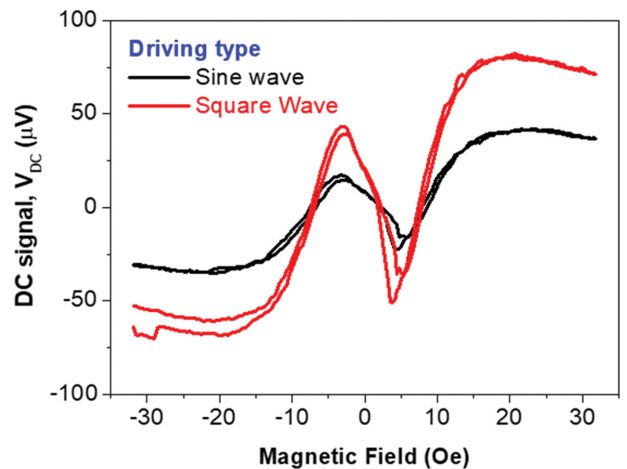


Fig. 5. (Color online) Magnetic field dependence of V_{DC}^{Squ} (red line) and V_{DC} (black line) measured by square wave and sine wave driving method, respectively.

를 측정하였다.

3. 자성 비드 검출 성능 향상

사인파와 사각파 구동 방법에 따른 자성 비드 신호를 측정하기 위하여 PHR 센서 위에 비드 시료를 올려놓은 경우(V^w)와 비드 시료가 없는 경우(V^{wo}) 각각에 대하여 자체 자기장에 의한 V_{2f} , V_{DC} , V_{DC}^{Squ} 신호를 각각 측정하였다. 비드 신호는 V_{2f} , V_{DC} , V_{DC}^{Squ} 신호 각각에 대하여 자성 비드의 유무에 따른 신호차인 $V_{bead} = V^w - V^{wo}$ 으로 정하였다.

Fig. 6은 사인파 구동에 의한 2차 조화파 신호인 V_{2f} 를 이용하여 측정된 비드 신호의 자기장 의존성을 나타낸 것이다. Fig. 6에 삽입한 그림은 PHR 센서 위에 자성 비드 시료를 올려놓은 경우와 자성 비드 시료가 없는 경우 각각에 대하여 사인파 구동에 의한 2차 조화파 신호의 자기장 의존성을 측정된 결과를 나타낸 것이다. 비드 신호는 비드 시료의 유무에 따른 신호차인 $V_{bead} = V_{2f}^w - V_{2f}^{wo}$ 이었다. 비드 신호는 자체 자기장에 의해 발생하는 2차 조화파 신호의 자기장 의존성과 동일한 자기장 의존성을 보였다. 따라서 비드 신호는 자체 자기장에 의해 발생하는 유도 신호 V_s 에 비례함을 알 수 있었다. 구동 방법에 따른 비드 신호를 비교하기 위하여 사인파 구동에 의한 2차 조화파 신호 V_{2f} 와 DC 신호 V_{DC} 및 사각파 구동에 의한 DC 신호 V_{DC}^{Squ} 를 이용하여 비드 신호를 각각 측정하였다.

Fig. 7은 구동 방법에 따른 비드 신호의 자기장 의존성과 신호의 크기를 비교한 결과를 나타낸 것이다. 청색 실선 및 막대는 사인파 구동에 의한 2차 조화파 신호 V_{2f} 와 DC 신호 V_{DC} 를 이용하여 측정된 비드 신호의 자기장 의존성과 크

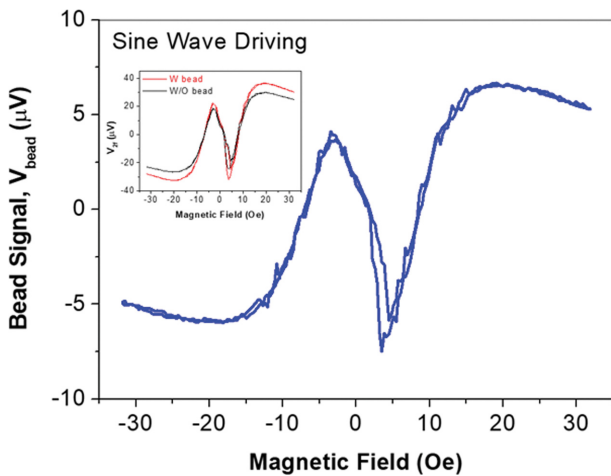


Fig. 6. (Color online) Magnetic field dependence of bead signal V_{bead} measured by V_{2f} . The inset figure shows measured magnetic field dependence of V_{2f} with (red line) and without (black line) magnetic bead sample, respectively.

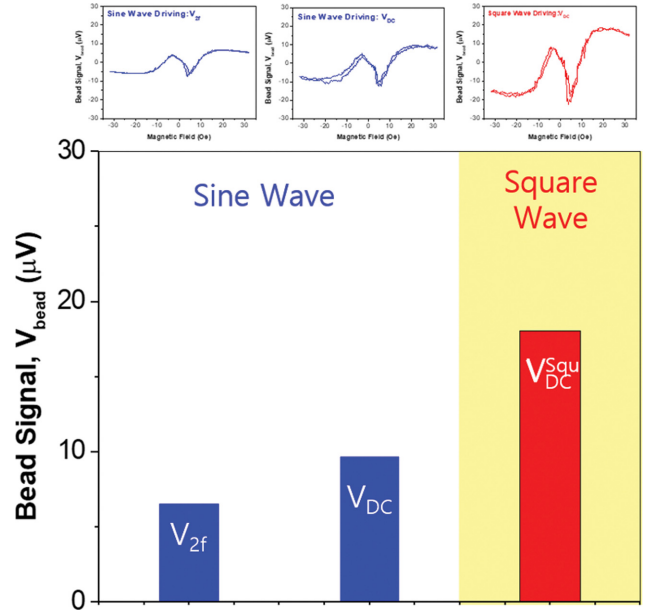


Fig. 7. (Color online) Magnetic field dependence of bead signal V_{bead} measured by V_{2f} , V_{DC} and V_{DC}^{Squ} , respectively.

기 결과이며, 붉은색 실선과 막대는 사각파 구동에 의한 DC 신호 V_{DC}^{Squ} 를 이용하여 측정된 비드 신호의 자기장 의존성과 크기 결과이다. 사인파 구동의 경우, DC 신호를 이용한 비드 신호가 2차 조화파 신호를 이용한 비드 신호보다 $\sqrt{2}$ 배 크게 나타났다. 한편, 사각파 구동에 의한 DC 신호를 이용한 비드 신호는 사인파 구동에 의한 DC 신호를 이용한 비드 신호보다 2배 크게 나타났다.

이들 결과로부터 사인파 구동에 의한 DC 및 2차 조화파 신호와 사각파 구동에 의한 DC 신호는 자성 재료의 물성 측정에 모두 활용할 수 있으며, 특히 사각파 구동에 의한 DC 신호를 이용하면 사인파 구동에 의한 DC 신호보다 2배, 2차 조화파 신호보다 $2\sqrt{2}$ 배 향상된 신호를 얻을 수 있다.

IV. 결 론

평면홀 자기저항(PHR) 센서에서 사인파와 사각파 구동 방법에 따른 측정된 PHR 신호 V_{PHR} 및 구동 전류가 만든 자체 자기장에 의한 직류(DC) V_{DC} 및 2차 조화파 신호 V_{2f} 의 출력 신호를 비교 분석하였다. 사인파 구동에 따른 V_{PHR} 및 V_{2f} 의 자기장 의존성 측정값은 단일 자구 모델로 계산한 결과와 일치하였다. 한편, 사각파 구동에 따른 V_{PHR} 신호는 사각파에 포함된 조화파 특성을 반영한 $1f$, $3f$, $5f$...의 구동 주파수의 홀수배 주파수 특성을 갖는 신호가 측정되었으며, 신호 각각의 크기는 사각파의 고동 전류에 포함된 배수 주파수 신호의 크기에 비례하였다. 또한, 사각파 구동에 의한 직

류(DC) 신호 V_{DC}^{Squ} 는 사인파 구동에 의한 직류(DC) 신호와 동일한 자기장 의존성을 보였으며, 크기는 사인파 구동에 의한 신호보다 2배 크게 나타났다.

이들 결과로부터 사인파 구동에 의한 DC 및 2차 조화파 신호와 사각파 구동에 의한 DC 신호는 자성 재료의 물성 측정에 모두 활용할 수 있으며, 특히 사각파 구동에 의한 DC 신호를 이용하면 사인파 구동에 의한 DC 신호보다 2배, 2차 조화파 신호보다 $2\sqrt{2}$ 배 향상된 신호를 얻을 수 있었다. 따라서 사각파 구동은 자성비드의 측정 정밀도를 향상하기 위하여 자성 바이오 센서의 구동 방법으로 응용 가능성을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 안동대학교 기본 연구 지원 사업에 의하여 연구되었습니다. PHR 센서를 제작해 주신 DGIST 김철기 교수님과 전태형 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] D. Y. Kim, B. S. Park, and C. G. Kim, J. Appl. Phys. **88**, 3490 (2000).
- [5] N. T. Thanh, M. G. Chun, N. D. Ha, K. Y. Kim, C. O. Kim, and C. G. Kim, J. Magn. Mater. **305**, 432 (2006).
- [6] 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).
- [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).
- [11] https://en.wikipedia.org/wiki/Square_wave.
- [12] H. Nhalil, P. T. Das, M. Schultz, S. Amrusi, A. Grosz, and L. Kleinl, Appl. Phys. Lett. **117**, 262403 (2020).