

자기광학 누설자속법을 응용한 직류전류계측법에 관한 연구

A Study on Direct Current Measurement Using Magneto-Optical LMF Method

이진이

Jinyi Lee

초 록 금속성 도선 뿐 아니라 기상 또는 액상의 직류전류를 계측하기 위해서는 비접촉으로 전류를 측정할 필요가 있다. 본 논문은 직류전류를 비접촉으로 계측하기 위한 방법중 하나로써 패러데이효과와 누설자속을 이용하는 방법을 제안하고, 이론적 고찰 및 실험적 검증결과를 보고한다. 공극을 가진 강자성체 코어를 1차 코일에 의하여 자화하면, 공극 주위에는 누설자속이 발생한다. 이러한 누설자속의 수직성분에 의하여 자기광학소자의 자구는 자화되어, 공극의 중심과 자벽은 평행하게 된다. 한편, 2차 코일에 의하여 자기광학소자에 수직한 방향으로 자장을 인가하면, 누설자속분포는 공극의 중심을 기준으로 좌우 대칭이었던 자구의 분포에 편향이 발생한다. 이때 금속, 기체 또는 액체상태의 전류가 코어를 통과하면 자기광학소자의 자벽이 이동하게 된다. 이러한 원리에 의하여 자구 또는 자벽의 이동량을 측정하면, 코어를 통과하는 직류전류의 세기를 알 수 있다.

주요용어: 직류전류, 비접촉, 전류측정, 패러데이효과, 자기광학, 누설자속

Abstract It is necessary to measure the direct current with a non-contact methodology for the liquid or gas phase, as well as the conducting metals. This paper described a theoretical consideration and experimental verification for a non-contact quantitative direct current measurement system using the Faraday effect and magnetic flux leakage. The leakage of magnetic flux occurs around a gap when a ferromagnetic core including the discontinuous gap is magnetized. Two large anisotropic domains in a magneto-optical film are occurred by the vertical component of leaked magnetic flux and the domain walls are paralleled to the center of the gap. Here, the symmetrical arrangement of domains are deflected when a vertical magnetic field is applied to the magneto-optical film. The domain wall of the magneto-optical film are relocated when a measuring current passes through the ferromagnetic core. Therefore, a direct current passing through the core can be determined quantitatively by the measurement of moving distance of the domain wall.

Keywords: direct current, non-contact, current measurement, Faraday effect, magneto-optic, leakage magnetic flux

1. 서 론

열전자의 이동량 변화, 전기화학분해과정의 정량적 분석 또는 혈류 측정, 생체전기 측정, 압전변환기에 발생하는 전류의 변화, 열전대, 이온 발생량

측정, 정전기의 관찰, 전지의 충전 및 방전과정의 모니터링등을 위해서는 도전성 금속뿐 아니라 기체 또는 액체상태에서 발생하는 직류전류를 비접촉으로 계측할 필요가 있다.

전자기장식 전류변류기는 교류전류의 측정에 유효

하므로, 직류전류를 측정하기 위해서는 자기 multi-vibrator 방식[1] 또는 자속반전 시간차 방식 [2,3]등 여러 가지 부가적인 장치가 필요하다. 한편 직류전류를 계속하기 위하여 자기검출소자를 이용하는 방식[4]은 도넛형의 자기코어의 일부에 불연속부를 설치하고, 이 사이에 홀소자 또는 광자계 센서를 설치한 구조를 하고 있으며, 피검출전선의 전류에 의한 자장을 이들 자기검출소자에 의하여 직접 검출하는 것이다. 그러나 이 방법은 자기검출소자의 설치가 용이하지 않다는 구조적 결함을 내재하고 있다. 한편, 자기장이 인가된 물질내에서 편광광이 선광하는 Faraday 효과를 충분히 가지는 광섬유에 의하여 초고전압 환경하에서 초고전류를 비교적 낮은 비용으로 계속[5]할 수 있다는 장점이 있으나, 광소자의 품질과 제조기술, 가격경쟁력, 그리고 기술인력의 확보 등 기반조건이 취약하며, 광섬유의 Faraday 회전각의 한계에 기인하여 국한된 용도로 사용되어지고 있다.

본 논문은 박막형 자기광학소자의 자구를 관찰함으로써 비접촉식으로 직류전류를 계속하여 이를 정량적으로 디지털화할 수 있는 시스템의 이론적 연구 및 실험적 검증에 관한 것이다. 이를 이용하여 도전성 금속뿐 아니라 이온 또는 전자의 이동에 의하여 발생하는 전류 즉, 기체상태 또는 액체상태의 직류전류를 비접촉식으로 계속할 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

2. 기본 원리 및 시스템 구성

2.1. 기본원리

단결정기반상에 그 결정의 방위에 맞추어 다른 단결정을 성장시키는 Liquid Phase Epitaxial (LPE) 방법으로 성장시킨 희토류 Garnet (이하 자기광학소자[6-10]라 하고, 특히 배면에 알루미늄을 코팅한 것을 MO.센서[11-14]라 하자)은 자화용이축이 막면에 수직인 1축성 강자성체의 단결정 박막이다. 따라서, 외부 자장을 인가하면, 자기광학소자의 자구는 자화용이축 방향의 외부자장의 성분에 의하여 선택적으로 영향을 받게 된다. 공극을 가진 강자성체에 자기광학소자를 배치하면, 소자는 막면에 수직한 방향에 자화용이축을, 수평방향에 자화곤란축을 가진다.

이때 강자성체를 자화하면 공극 근방에서는 누설 자속이 발생한다. 이러한 누설자속의 수직성분은 Fig. 1과 같이 자기광학소자의 자화용이축인 상향과 하향 자기모멘트를 가지는 각각의 자구의 면적을

크게 한다. 한편, 광원과 편광자에 의한 직선편광은 자기광학소자에 입사한 후 배면의 알루미늄코팅에 의하여 반사되는 과정에서 패러데이 회전하고, 검광자를 통과한 후 관찰된다. 이때 편광과 검광자의 이루는 각도에 의하여 각각의 자구를 통과한 빛은 광량차를 발생하므로 자구를 육안 또는 CCD 카메라에 의하여 관찰할 수 있다.

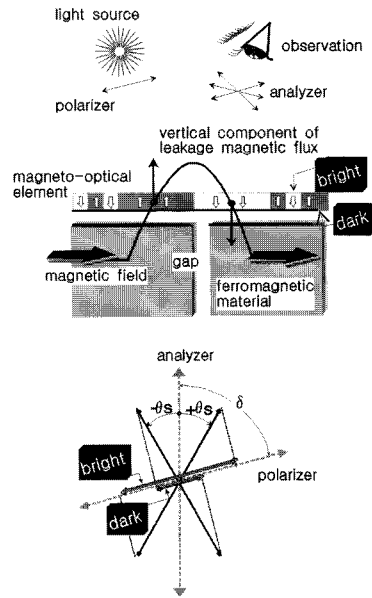


Fig. 1 Magneto-optical film and Faraday effect

2.2. 시스템의 구성

Fig. 2는 자벽이동의 관찰에 의한 비접촉식 직류 전류 계속시스템의 구성을 나타낸다. 상술한 공극을 가진 강자성체 코어(core)를 1차 코일(primary coil)에 의하여 자화하면, 공극 주위에는 누설자속(LMF, leakage magnetic flux)이 발생하여 MO센서의 자구에 영향을 미치게 된다. 따라서, 광원(light)과 편광자(polarizer), 광분할기(bean splitter), 검광자(analyzer) 및 현미경(microscope)에 의하여, MO센서의 포화자장($\pm H_s$)의 절대값보다 큰 곳에서 명암이 확실한 자구를 관찰할 수 있다.

또한, 2차 코일(bias coil)에 의하여 MO센서에 수직한 방향으로 자장(bias magnetic field)을 인가하면, Fig. 3(a)와 같이 누설자속분포는 바이어스자장이 중첩된 형태를 가지며, 공극의 중심(center of gap)을 기준으로 좌우 대칭이었던 자구의 분포에 편향이 발생한다. 한편, 코어의 중심에 임의의 금속, 기체 또는

액체상태의 전류(current)가 흐르면, 전류에 의한 자기장이 코어에 중첩된다. 이는 Fig. 3(b)에 나타난 바와 같이 전체적인 누설자속의 분포에 영향을 미치게 되며, 따라서 MO 센서의 자벽이 이동하게 된다.

따라서 이러한 원리 및 구조를 가진 시스템에 의하여 자구를 관찰하면, 코어를 통과하는 고체, 기체 및 액체상의 미소직류전류를 측정할 수 있다. 한편, 실린더형 광학렌즈(cylindrical lens)와 화소간격(interval)이 수 μm 인 라인스캔센서 (Line scan camera)를 사용하면 직접 자구를 관찰하지 않더라도 자구의 분포를 정량적으로 디지털화 할 수 있다.

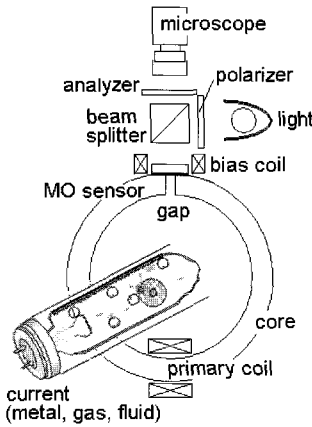
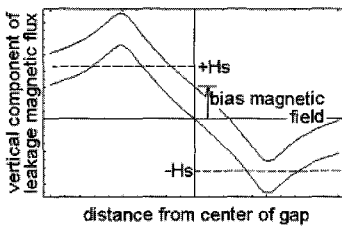
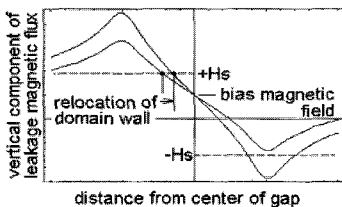


Fig. 2 Schematics of non-contact current measurement system



(a) Deflection of leakage magnetic field by bias magnetic field



(b) relocation of domain wall by applying of direct current

Fig. 3 Principle of non-contact direct current measurement using relocation of domain wall

3. 이론적 해석 및 고찰

Fig. 1에서 공극의 길이를 l , 폭을 w , 그리고 깊이를 d 라고 하자. xy 평면은 강자성체의 표면을 나타내고, z 방향은 강자성체 표면의 법선방향을 나타낸다. 1차 코일에 의한 자화방향을 x 방향으로 할 경우, xz 평면에 수직방향을 y 방향으로 하면, 공간중의 누설자속 H 의 z 방향의 성분 H_z [15]는 다음 식 (1), (2)에 의하여 나타낼 수 있다.

$$H_z = \frac{m'}{4\pi} \int_{-l/2}^{l/2} \int_{-y}^y \int_0^d \frac{z+u}{\left((x+w/2)^2 + y^2 + (z+u)^2 \right)^{3/2}} du dy dx - \frac{m'}{4\pi} \int_{-l/2}^{l/2} \int_{-y}^y \int_0^d \frac{z+u}{\left((x-w/2)^2 + y^2 + (z+u)^2 \right)^{3/2}} du dy dx + H_{bias} \tag{1}$$

$$m' = m + m_i \tag{2}$$

여기에서 m 과 m_i 는 각각 1차 코일과 코어를 통과하는 전류에 의해 발생하는 단위 면적당 자기량, m' 은 이들의 합이며, u 는 공극의 깊이를 나타내며, H_{bias} 는 2차 코일에 의하여 발생한 자장을 나타낸다.

또한 상기 식 (1)을 풀면 다음과 같이 표현할 수 있다. 즉,

$$H_z = \frac{m'}{4\pi} \left[\begin{aligned} & -\log \frac{-(y-l) + \left\{ \left(x + \frac{w}{2} \right)^2 + (y-l)^2 + (z+d)^2 \right\}^{1/2}}{-(y+l) + \left\{ \left(x + \frac{w}{2} \right)^2 + (y+l)^2 + (z+d)^2 \right\}^{1/2}} \\ & + \log \frac{-(y-l) + \left\{ \left(x + \frac{w}{2} \right)^2 + (y-l)^2 + z^2 \right\}^{1/2}}{-(y+l) + \left\{ \left(x + \frac{w}{2} \right)^2 + (y+l)^2 + z^2 \right\}^{1/2}} \\ & - \log \frac{-(y-l) + \left\{ \left(x - \frac{w}{2} \right)^2 + (y-l)^2 + (z+d)^2 \right\}^{1/2}}{-(y+l) + \left\{ \left(x - \frac{w}{2} \right)^2 + (y+l)^2 + (z+d)^2 \right\}^{1/2}} \\ & + \log \frac{-(y-l) + \left\{ \left(x - \frac{w}{2} \right)^2 + (y-l)^2 + z^2 \right\}^{1/2}}{-(y+l) + \left\{ \left(x - \frac{w}{2} \right)^2 + (y+l)^2 + z^2 \right\}^{1/2}} \end{aligned} \right] + H_{bias} \tag{1'}$$

한편, 누설자속의 수직성분 H_z 의 분포는 Fig. 3에서 표시한 바와 같으며, H_z 가 자기광학소자의 포화자장 H_s 보다 크면 H_z 와 같은 방향의 자기모멘트를 가지는 단일자구가 발생하고, 자벽에 의하여 반대 방향의 자기모멘트를 가지는 자구와 경계가 형성된다. 이때 자벽의 위치는 2차 코일에 의한 바이어스 자장에 의해서도 영향을 받지만, 특히 코어를 통과하는 전류에 의해 발생하는 단위면적당 자기량에 의하여 민감하게 반응하게 된다. 전류에 의한 자기량의 변화를 1차 코일에 의해 발생하는 자기량의 $\pm 40\%$ 에 해당하도록 변경하였을 때, 상기 식 (1)에 의하여 해석한 결과를 Fig. 4, 5에 표시한다. 이때 해석 조건은 Table 1과 같으며 식 (1)이 H_s 값과 동일하게 되는 x 값(이후 Δx 라 한다) 을 $-1.0 \sim 0.0$ mm 근방에서 구한 것을 점으로 표시 하였다.

Table 1 Condition of analysis using dipole model

item	symbol	value
Width of gap	w	0.5~2.0 mm
Length of gap	l	11.5 mm
Depth of gap	d	7.0 mm
Lift-off	z	0.1~0.4 mm
Bias magnetic field	H_{bias}	$1.0 (\times 10^{-4} \text{ T})$
Magnetic charge per unit area by primary coil	m	$1.0 \pm 0.4 (\times 10^{-4} \text{ T/mm})$
Saturated magnetic field of MO sensor	H_s	$\pm 2.0 (\times 10^{-4} \text{ T})$

Fig. 4에서 나타낸 바와 같이 공극으로부터 자기광학소자까지의 리프트오프가 0.1 ~ 0.4 mm의 위치에 있을 때, 자벽중 하나가 공극의 중심으로부터 약 $-0.05 \sim -0.4$ mm 이내에서 위치하며, 1차 코일에 의한 자기량(m)과 피측정 전류에 의해 발생하는 자기량(m')이 증가함에 따라 자벽의 이동거리도 커지고 있음을 알 수 있다. 특히 리프트오프가 작을수록 변화량이 커서 보다 높은 감도를 가질 수 있음을 알 수 있다.

또한, 공극의 넓이에 따른 자기량과 자벽의 위치와의 상관관계를 해석한 결과, Fig. 5에 나타낸 바와 같이 공극이 넓을수록 자기량의 변화에 대하여 민감한 자벽의 이동이 있음을 알 수 있다.

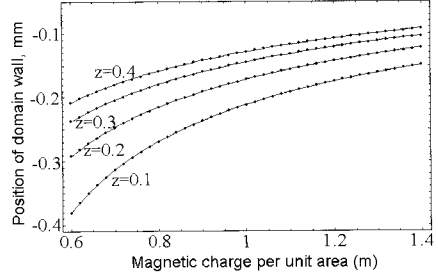


Fig. 4 Change of sensitivity caused by lift-off

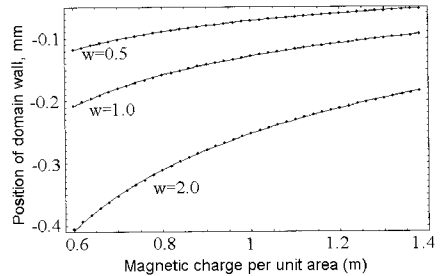


Fig. 5 Change of sensitivity caused by width of gap

한편, 공극의 넓이(w)와 리프트오프(z)를 고정하고, 공극의 중앙(y=0)에서 자벽의 위치(x)를 고려하면, 식 (1)에서 y 및 z를 포함한 항은 상수로 취급할 수 있다. 또한, 바이어스 자장 H_{bias} 를 포함한 누설자속분포가 MO센서의 포화자장 H_s 와 같게 되는 x 를 구하기 위하여 식 (1)'에서

$$H_z = H_s \tag{3}$$

로 하면 H_{bias} 와 H_s 는 각각 상수이므로 임의의 상수 \tilde{c}_H 를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다. 즉,

$$\tilde{c}_H = H_s - H_{bias} \tag{3'}$$

또한, 고정된 리프트오프 z, 공극의 깊이 d 및 길이 l을 포함하는 각각의 상수항 및 x를 포함하는 항을

$$f_1^2 = \left(x + \frac{w}{2}\right)^2 + l^2 + (z+d)^2 \tag{4}$$

$$f_2^2 = \left(x + \frac{w}{2}\right)^2 + (z+d)^2$$

$$g_1^2 = \left(x - \frac{w}{2}\right)^2 + l^2 + (z+d)^2 \tag{5}$$

$$g_2^2 = \left(x - \frac{w}{2}\right)^2 + (z+d)^2$$

라 하면, 식 (1)'은 다음과 같이 표현할 수 있다. 즉,

$$\frac{(f_1-l)(f_2+l)(g_1+l)(g_2-l)}{(f_1+l)(f_2-l)(g_1-l)(g_2+l)} = e^{\frac{4\pi m_i}{m'}} = ce^{\frac{1}{m'}} \quad (6)$$

또는,

$$(f_1-l)(f_2+l)(g_1+l)(g_2-l) - ce^{\frac{1}{m'}}(f_1+l)(f_2-l)(g_1-l)(g_2+l) = 0 \quad (6')$$

여기에서 최고차항인 $f_1 f_2 g_1 g_2$ 를 포함한 식 (6)'은 식 (4)와 (5)로부터 x 의 4차 방정식이므로, Fig. 4와 5에서 피측정 전류에 의해 코어에 발생하는 자기량(m_i)에 대한 자벽의 위치(x)와의 관계는, 다음과 같은 형식을 취한다. 즉,

$$x = c_1 + c_2 e^{\frac{1}{m'}} + c_3 e^{\frac{1}{m'}} \\ = c_1 + c_2 e^{\frac{1}{m+m_i}} + c_3 e^{\frac{1}{m+m_i}} \quad (7)$$

여기에서 c_1 과 c_2 , c_3 는 Table 2에 나타낸 바와 같이 바이어스 자장(H_{bias})과 센서의 포화자장(H_s), 공극의 폭(w), 길이(l), 깊이(d) 및 센서의 리프트오프(z)에 의하여 특성지어지며, 코어의 투자율에 무관한 상수이다. 이들 상수와 식 (7)에 의하여 구해진 식을 Fig. 4와 Fig. 5에서 실선으로 나타내었다. 1차 코일의 전류는 일정하므로 이에 기인한 자기량 m 이 일정하게 되고, 따라서 자벽의 위치는 피측정 전류에 의해 발생하는 자기량 m_i 에 의존하게 된다. 이러한 관계는 차후 자벽이동의 관찰에 의한 비접촉 미소직류전류 계측을 위한 시스템의 최적화에 유용하게 사용될 수 있다.

Table 2 Coefficients of equation for the location of domain wall

conditions		coefficients		
Lift-off, [mm]	Width of gap, [mm]	C ₁	C ₂	C ₃
0.1	1	-0.163793	-0.0160738	0.214218
0.2		-0.17567	-0.0201017	0.232663
0.3		-0.187044	-0.0289062	0.254257
0.4		-0.171013	-0.0484061	0.247154
0.1	0.5	-0.0874432	-0.0100161	0.115834
	1	-0.163793	-0.0160738	0.214218
	2	-0.326667	-0.0304992	0.425435

4. 실험적 검증

Table 3에 나타낸 바와 같이 내경 19.8 mm, 외경 33.0 mm, 폭 11.5 mm인 코어(iron powder core)에 간격 1.4 mm의 공극을 도입하고, 1차 코일에 전류를 흘려 2.0×10^2 T의 자장을 생성하였다. 공극위에 자기광학센서를 0.1 mm의 리프트오프로 설치하고, Fig. 2의 비접촉식 직류전류 계측시스템의 구성에 의하여 자구를 관찰하였다. 한편 MO 센서는 GGG(Gadolinium Gallium Garnet, $(\text{GdCa})_3(\text{MgZrGa})_5\text{O}_{12}$) 기반에 Bismuth를 첨가한 철가넷(Bismuth doped iron garnet, $(\text{GdBi})_3(\text{FeAl})_5\text{O}_{12}$)을 약 $1 \mu\text{m}$ 의 두께로 생성한 후, 알루미늄으로 반사막을 생성한 것으로써 포화자장이 약 1.0×10^4 T이며, $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 의 크기이다.

먼저 바이어스 자장(H_{bias})을 부여하지 않은 상태에서 1차 코일에 의한 자장을 2.0×10^2 T로 설정하였을 때의 자구의 분포를 Fig. 6에 나타낸다. 코어를 통과하는 직류전류가 0A와 8A인 각각의 경우에 있어서 상향 자기모멘트를 가지는 자구(MO센서 좌측의 밝은 영역)와 하향 자기모멘트를 가지는 자구(MO센서 우측의 밝은 영역)의 면적 변화는 없으며, 이것은 Fig. 3 (a)에서 설명한 바와 같이 누설자속의 크기에 관계없이 수직성분의 절대값은 좌우 대칭인데 기인한다. 한편, 2차 코일에 의하여 바이어스 자장을 0.8 mT 인가하면, Fig. 7에 나타낸 바와 같이 좌우 대칭이었던 자구의 면적에 편향이 발생하여 상향 자기모멘트를 가지는 자구와 하향 자기모멘트를 가지는 자구의 경계, 즉 자벽이 $280 \mu\text{m}$ 이동하게 된다. 바이어스 자장에 의하여 Fig. 3(a)에서 설명한 바와 같이 누설자속에 편향이 발생하였기 때문이다. 또한 코어를 통과하는 피측정전류가 8A인 경우(Fig. 7(b))는 0A인 경우(Fig. 7(a))에 비하여 자벽이 약 $13 \mu\text{m}$ 이동하여, 바이어스 자장의 인가에 의하여 피측정전류의 유무를 확인할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 바이어스 자장을 1.6 mT로 크게 하면 바이어스 자장을 인가하지 않은 경우(Fig. 6)에 비하여 자벽이 약 $513 \mu\text{m}$ 이동(피측정전류 0A, Fig. 8(a))하고, 피측정전류가 8A인 경우(Fig. 8(b))에는 약 $46.6 \mu\text{m}$ 의 자벽의 추가이동이 확인되었다. 이상의 결과로부터 바이어스 자장을 인가할 경우 자벽의 이동량으로부터 피측정전류의 측정이 가능하다는 것과 바이어스 자장이 클수록 자벽의 이동량이 커지므로 보다 높은 감도를 얻을 수 있다는 이론적 고찰을 검증할 수 있다.

한편 Table 4는 Table 3의 조건을 식 (1)'과 (3)에 대입하여 피측정 전류에 의해 발생하는 미지 자기량, m_i 를 구한 것이다. 각각의 바이어스 자장에 상관없이 피측정전류가 0A일 경우에는 상대오차가 0.02209%로써 거의 일치함을 알 수 있다. 그러나, 피측정 전류가 8A일 때의 상대오차 및 차이는 각각 0.14235%와 0.02789 mT로써, 바이어스 자장이 0.8 mT일 때의 0A와 8A의 차이에 상당한다. 이러한 차이는 m , m_i 및 H_{bias} 가 코어의 투자율에 의하여 영향을 받는데 비하여 식 (1)'은 투자율이 일정하다고 가정하였기 때문에 발생한다. 따라서, 상술한 이론식들은 정성적인 분석에 유용하며, 코어의 투자율이 일정하거나 알려져 있는 경우에 한하여 정량적인 분석이 가능하다.

Table 3 Condition of experiment

item	symbol	value
Material of core	-	Iron powder
Inner diameter of core	D_{IN}	19.8 mm
Outer diameter of core	D_{OUT}	33.0 mm
Width of gap	w	1.4 mm
Length of gap	l	11.5 mm
Depth of gap	d	6.6 mm
Lift-off	z	0.1 mm
Magnetic field for core by primary coil	m	$2.0 \times 10^{-2} T$
Bias magnetic field	H_{bias}	$0.8 \times 10^{-3} T$
		$1.6 \times 10^{-3} T$
Saturated magnetic field of MO sensor	H_S	$1.0 \times 10^{-4} T$
Direct current pass through core	I_{DC}	0A/8A

Table 4 Calculated results for m_i using experiment and equation (1) and (1)'

Hbias & error	calculated results m_i , [mT]		difference, [mT]
	0A	8A	
0.8 mT	-19.5711	-19.5922	0.0211559
1.6 mT	-19.5668	-19.6201	0.0533692
relative err.	0.02209%	0.14235%	-
difference	0.0043233mT	0.02789mT	-

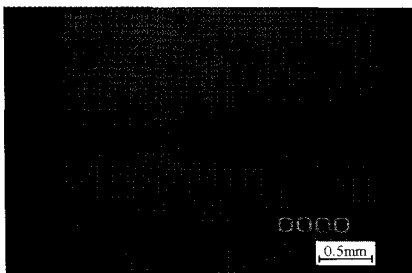
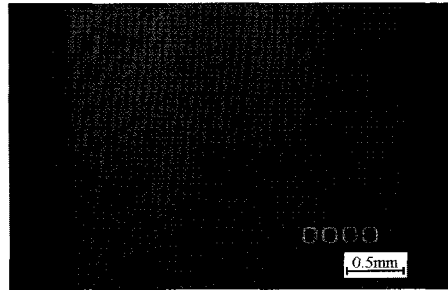
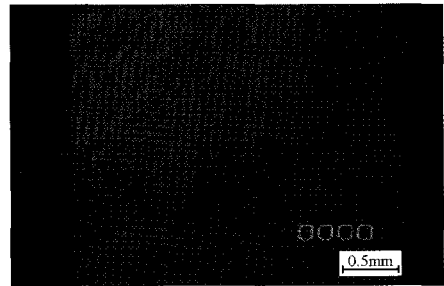


Fig. 6 Experimental result in the case of $H_{bias} = 0T$, $m = 2.0 \times 10^{-2} T$ and $I_{DC} = 0A(8A)$

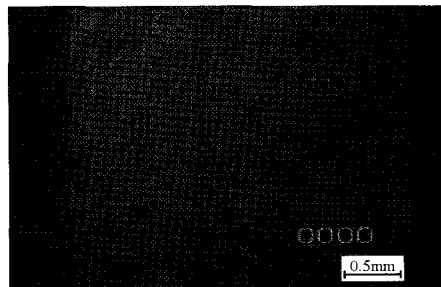


(a) $I_{DC} = 0A$

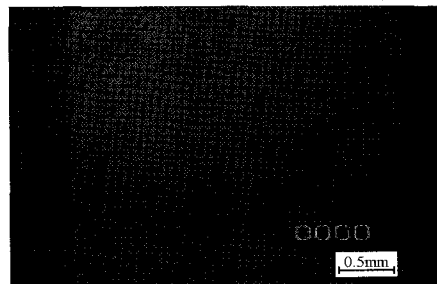


(b) $I_{DC} = 8A$

Fig. 7 Experimental results in the case of $H_{bias} = 0.8 \times 10^{-3} T$ and $m = 2.0 \times 10^{-2} T$



(a) $I_{DC} = 0A$



(b) $I_{DC} = 8A$

Fig. 8 Experimental results in the case of $H_{bias} = 1.6 \times 10^{-3} T$ and $m = 2.0 \times 10^{-2} T$

V. 결 론

본 연구에서는 박막형 자기광학소자의 자구를 관찰함으로써 비접촉식으로 미소직류전류를 계측하여 이를 정량적으로 디지털화할 수 있는 시스템에 대하여 이론적으로 검토하고, 피측정 전류에 의해 발생하는 자벽의 위치 이동식을 구하였다. 이론적 해석에 의하여 공극의 넓이가 넓을 수록 감도가 높으며, 또한 공극과 자기광학소자와의 거리가 짧을수록 감도가 높음을 알 수 있었다. 또한, 실험에 의하여 바이어스 자장을 인가함으로써 자벽의 이동량에 의한 피측정전류의 측정이 가능하다는 이론적 고찰을 검증할 수 있었다. 또한, 바이어스 자장이 클수록 자벽의 이동량이 커지므로 보다 높은 감도를 얻을 수 있다.

후 기

이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음 (KRF-2003-003-D00123)

참고문헌

- [1] M. Kawakami, "직류전류센서", 대한민국특허, 특1995-0020819, (1995)
- [2] M. Kawakami and S. Yamaguchi, "직류전류센서", 대한민국특허, 특1994-0005959, (1994)
- [3] M. Kawakami and S. Yamaguchi, "직류전류센서", 대한민국특허, 특1995-0012078, (1995)
- [4] N. Itoh, et. al., "Photomagnetic field sensor and photocurrent sensor using the same," Japanese patents, P2000-230968A, (2000)
- [5] 김수길, 이용욱, 이병호, 송민호, 임용훈, "Faraday 효과를 이용한 클램프형 광-전류 변류기의 특성 및 분석", 한국광학회지, Vol. 14, No. 4, pp. 399-405, (2003)
- [6] O. Kamada, H. Minemoto and N. Itoh, "Magneto-optical properties of (BiGdY)₃Fe₅O₁₂ for optical magnetic field sensors," Journal of Applied Physics, Vol. 75, No. 10, pp. 6801-6803, (1994)
- [7] M. Kaneko, T. Okamoto, H. Tamada and T. Yamada, "Optical operation of a magnetic bubble," IEEE Transactions of Magnetics, Vol. MAG-22, No. 1, pp. 2-10, (1986)
- [8] E. Sawatzky and E. Kay, "Some Magnetic and Structural Properties of Epitaxial Garnet Films Prepared by rf Sputtering," Journal of Applied Physics, Vol. 40, No. 3, pp. 1460-1462, (1969)
- [9] R. J. Gambino and T. R. McGuire, "Enhanced magneto-optic properties of light rare-earth-transition metal amorphous alloys," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 54-57, pp. 1365-1370, (1986)
- [10] F. Schmidt, W. Rave and A. Hubert, "Enhancement of Magneto-Optical Domain Observation by Digital Image Processing," Vol. MAG-21, No. 5, pp. 1596-1598, (1985)
- [11] M. Ishihara, T. Sakamoto, K. Haruna, N. Nakamura, K. Machida and Y. Asahara, "Advanced Magnetic Flux Leakage Testing System Using Magneto-optical Film," JSNDT, Vol. 45, No. 4, pp. 283-289, (1996)
- [12] G. L. Fitzpatrick, D. K. Thome, R. L. Skaugset, E. Y. C. Shih and W. C. L. Shih, "Magneto-Optic/Eddy Current Imaging of Aging Aircraft," Material Evaluation, Vol. 51, No. 12, pp. 1402-1407, (1993)
- [13] J. Lee, T. Shoji, D. Minkov and M. Ishihara, "Novel NDI by use of magneto-optical film," Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 64, No. 619, pp. 825-830, (1998)
- [14] J. Lee, T. Shoji and D. Seo, "Theoretical Consideration of Nondestructive Testing by use of Vertical Magnetization and Magneto-Optical Sensor," KSME International Journal, Vol. 18, No. 4, pp. 640-648, (2004)
- [15] J. Lee, S. Lyu and Y. Nam, "An algorithm for the characterization of surface crack by use of dipole model and magneto-optical non-destructive inspection system," KSME International Journal, Vol. 14, No. 10, pp. 1072-1080, (2000)