≪연구논문≫ The Journal of Optical Society of Korea (Korean Edition) Volume 4, Number 4, December 1993

Co-Fe-B 자왜변환기를 이용한 간섭계형 광섬유 자계센서의 동작특성

이경식 · 윤병호 · 이유섭 · 문용수
성균관대학교 전자공학과

서 수 정
성균관대학교 금속공학과

(1993년 10월 26일 받음)

Melt-spun법에 의해서 자왜특성을 갖는 Co-Fe-B ribbon을 제작한 후 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계의 sensing-arm에 부착하여 간섭형 자계센서를 구성하였다. Co-Fe-B 자왜변환기로 구성된 자계센서의 동작실험 결과 ac 자왜 응답이 최대가 되는 dc 바이어스 자계는 출력이 0인 바이어스 지점으로부터 0.970e 정도 떨어져 있었으며, 최소 감지자장은 3 kHz에서 3.9×10^{-5} Oe(rms)/$\sqrt{\text{Hz}}$였다. 응답이 최대가 되는 지점에 바이어스를 고정시켰을 때 ac 자계센서의 출력이 포화되기 시작하는 입력 자계신호는 1 Oe(rms) 근처였다. Co-Fe-B 자왜변환기의 주파수 특성곡선에서 응답이 피크가 되는 주파수는 ~500 Hz였다.

I. 서 론

자왜형 광섬유 자계센서는 자계를 인가했을 때 변형되는 자왜재질을 cylinder[1-3]나 stripe form[2-6]으로 광섬유에 부착시켜 광섬유 내의 도파광의 자계에 따른 위상변화를 측정하여 자계를 검출해 내는 간섭형 자계센서[1-6]이다. 자왜재질이란 강자성체에 자계를 걸어 주었을 때 수축 또는 팽창이 되는 재질을 말하며 2차 세계대전 중 SONAR(Sound Navigation and Ranging)용의, 또는 최근에 개발되고 있는 간섭형 자계센서용의 변환기에 적용되면서 자왜재질에 대한 활발한 연구[8,9]가 진행되어 왔다.

자왜형 센서는 고감도가 특징이며 현재 자왜재질 $Fe_{81}B_{13.5}Si_{3.5}C_2$를 사용하여 10pT/$\sqrt{\text{Hz}}$의 감도를 얻었다는 보고도 있다.[4] 이 감도는 warware sensing, geophysical earth exploration 등에 이용이 가능한 고감도에 속한다. 이들 광섬유를 이용한 광자계 센서 외에도 아주 작은 자계를 측정하는 계기로는 SQUID(Superconducting Quantum Interference Device)가 있으나, SQUID는 가격이 비쌀 뿐만 아니라 유지비 및 시설비가 상당히 많이 든다. 이 때문에 저자장 측정을 위해서 고감도등 많은 장점을 갖고 있는 간섭계형 광섬유 자계센서에 관한 연구가 현재까지 활발히 진행되어 왔다.[1-6]

간섭계형 광섬유 자계센서의 감도는 감지부의 길이, 자왜변환기(magnetostrictive transducer)의 재질, 전자회로부의 잡음 레벨 등에 관계하는데, 특히 자왜변환기의 재질은 감도에 크게 영향을 미친다. 지금까지 보고된 자계센서용 변환기의 재질로는 Ni, Ni-Fe, Ni-Co, Fe-B-Si, Fe-B-Si-C가 있다.

본 연구에서는 지금까지 특성이 알려지지 않은 재질인 Co-Fe-B으로 자왜변환기를 제작한 후 이를 이용하여 간섭형 자계센서를 구성하여 보았다. PZT는 간섭계를 quadrature point[7]에 항상 고정시켜 줌으로써 신호 안정화를 시켜 주기 위해서 사용했다. 2장에서는 간섭형 광섬유 자왜센서의 원리 및 측정실험 장치에 대해서, 3장에서는 $Co_{70}Fe_{10}B_{20}$ 자왜변환기를 이용한 자계센서의 성능실험 결과에 대해서 설명하여 보았다.

II. 자왜형 광섬유 자계센서의 원리

1. 자계측정의 원리

Ni, Fe, Fe-Ni과 같은 강자성체를 외부자계 H가 있는

*본 논문은 1992년도 교육부지원 한국학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구조성비에 의해 연구되었음.

곳에 놓으면 자성체의 길이 l이 Δl 만큼 수축 또는 팽창되는데 이것을 자왜(magnetostriction) 현상이라고 한다. 이와 같이 외부자계에 의한 자기변형(strain) $e(=\Delta l/l)$은 $H=0$ 근처에서 아래와 같이

$$e=CH^2 \tag{1}$$

(여기서 C=재질의 자왜파라미터)

외부자계의 제곱에 비례하는 식으로 표시된다.[3]

만일 측정하고자 하는 주파수가 ω인 자계 $H_\omega\cos\omega t$에 dc 자계 H_0를 혼합하여 강자성체로 만들어진 metallic glass에 인가해 주는 경우 자왜는

$$e=C(H_0^2+H_\omega^2/2)+2CH_0H_\omega\cos\omega t+\frac{1}{2}CH_\omega^2\cos2\omega t \tag{2}$$

와 같이 된다. 강자성체로 된 metallic glass를 광섬유로 구성된 Mach-Zehnder 간섭계의 한쪽 광섬유 경로(sensing arm)에 부착하여 광섬유 방향으로 자계를 인가하면 metallic glass가 부착된 광섬유 구간 L을 지나가는 빔에 위상 변화가 생기게 된다. 이 때 생기는 위상 변화량(phase shift) ϕ는 다음과 같다.[6]

$$\phi=k_{eff}LCH^2 \tag{3}$$

여기서 $k_{eff}=(2\pi/\lambda_0)n[1-n^2\{(1-\sigma)P_{12}-P_{11}\}/2]$

$=$광섬유 코아에서의 유효 전파상수

$\cong 0.78(2\pi/\lambda_0)n$ (실리카 광섬유)

n $=$광섬유 코아의 굴절율

σ $=$Poisson ratio

$P_{ij}=$Strain optic tensor의 성분

$\lambda_0=$진공중에서의 파장.

따라서 dc 및 주파수 ω인 ac 자계로 감지부를 변조시킬 때 야기되는 위상변화량의 ω성분은 (2)식과 (3)식으로부터

$$\phi_\omega=2k_{eff}LCH_0H_\omega \tag{4}$$

로 주어진다. (4)식에 있는 파라미터 k_{eff}, L 및 C 값들은 알 수 있으므로 고정 dc 바이어스 자계 H_0를 자왜변환기(magnetostrictive transducer)에 인가한 다음 Mach-Zehnder 간섭계로부터 측정되는 ϕ_ω로부터 외부 자계 H_ω는 계산된다.

반자화성(demagnetization effects), loading, metallic glass가 광섬유에 주는 strain 전달효율, annealing 상태 및 변환기의 mechanical resonances와 같은 파라미터들도 외부자계에 의한 위상변화에 크게 영향을 미치기 때문에 식 (1)-(4)의 C에 포함시킬 수 있다. 위에 언급한 영향을 고려하면 대체로 순수한 재질의 C 값이 크게 줄어들며, 위 파라미터들의 영향을 포함시킨 자왜 파라미터 C를 유효 자왜 파라미터(effective magnetostrictive parameter) C_{eff}라고 한다.

식 (4)와 Ceff를 사용하여 저주파 자계신호에 대한 intrinsic 및 extrinsic 응답(responsivity)을 정의할 수 있는데, 흔히 아래와 같이 각각을 정의한다.

$$\frac{\phi_\omega}{H_0L}=2k_{eff}C_{eff}H_\omega \tag{5a}$$

$$\frac{\phi_\omega}{H_0}=2k_{eff}C_{eff}LH_\omega \tag{5b}$$

2. 측정실험장치

위상변화량의 ω성분 ϕ_ω 또는 자왜변환기를 이용하여 교류자장 H_ω를 측정하기 위하여 사용한 Mach-Zehnder 간섭계의 구성도는 그림 1과 같다. 간섭계는 He-Ne 레이저(파장 632.8 nm), 광 결합기(fused coupler, FC), 포토다이오드(D_1, D_2)로 되어 있다. 간섭계의 sensing fiber에는 자왜변환기가 부착되어 있고 reference fiber에는 PZT(Piezoelectric translator: EDO사, Model EC-70)가 연결되어 있다. 자왜변환기는 metallic glass ribbon 사이에 광섬유의 코팅부분을 5.7 cm 가량 벗기고 왕복 접착시켜서 제작하였으며, turn수가 16.8회/cm이고 길이가 31.5 cm인 솔레노이드 코일 중앙에 놓았다. PZT는 간섭계를 quadrature point[7]에 항상 고정시켜, 외부 잡음(phase drift)의 영향을 없애 줌으로써 신호를 안정화시키기 위해서 사용했다. 즉, 포토다이오드의 출력은 차동증폭기를 거친 뒤에 $\cos\phi$에 비례하는 신호가 되며, $\phi=\pi/2$ (quadrature point) 근처에서 자계신호에 의한 위상변화가 가장 민감하다. 이 때문에 quadrature point에서 벗어나는 오차신호는 저주파 통과 필터, 적분기 등으로 구성된 신호처리부(signal processing electronics) SPE를 통해서 증폭, 처리되어 PZT에 궤환된다. 이 때문에 외부로부터 생기는 위상잡음(phase drift)은 궤환시 보상되어 Mach-Zehnder 간섭계는 항상 안정된 동작을 할 수 있다. 간섭계의 성능 실험을 하기 위해서 PZT에 ac 신호(주파수$=\omega_0$)를 인가해 줄 수 있다.

자계측정실험을 하기 위해서 솔레노이드 코일에 전원공급기를 연결하여 ac (주파수$=\omega$) 및 dc 전류를 흘려주었다. 여기서 ac 전류는 자왜변환기에 시험용 자계신

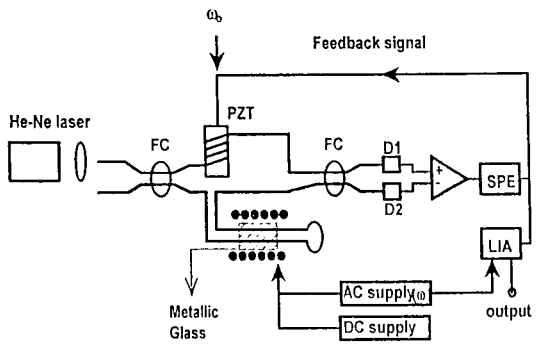

그림 1. All fiber Mach-Zehnder interferometer for the detection of low magnetic field.

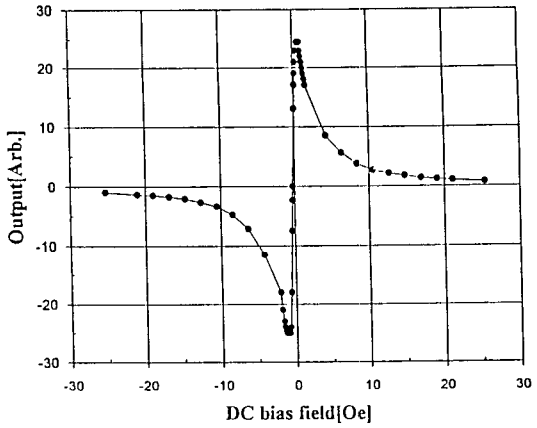

그림 2. AC magnetostrictive response as a function of DC-bias field (f=1 kHz, ac field=0.41 Oe rms)

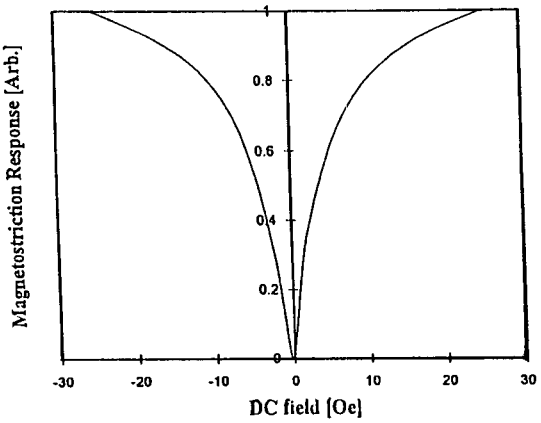

그림 3. Magnitude of the magnetostriction at 1 kHz as a function of DC magnetic field (f=1 kHz, ac field=0.41 Oe rms)

호를, *dc* 전류는 바이어스 자계를 인가해 주기 위해서 사용되었다. 인가된 *ac* 자계신호 $H_\omega \cdot \cos\omega t$에 의해서 생기는 주기적인 위상변화 ϕ_ω는 신호처리부(SPE)와 lock-in amplifier(LIA)를 거쳐서 결정된다. Mach-Zehnder 광섬유 간섭계에 사용된 광섬유는 코아직경이 4 μm이고 632.8 nm에서 단일모우드인 금성 광통신사 제품의 Ge이 함유된 실리카 광섬유이다. 광 결합기 FC는 KAIST에서 동일 광섬유로 제작한 분배율이 대략 50 : 50인 방향성 결합기이다. 실험에 사용된 Co-Fe-B 자왜재질은 Ar 가스 분위기의 고주파 결합기이다.

실험에 사용된 Co-Fe-B 자왜재질은 Ar 가스 분위기의 고주파 유도 용해로에서 melt-spun법에 의해 ribbon 형상으로 제조하였다. 제조시 Cu wheel의 속도는 40 μm /sec로 하였으며, orifice의 지름은 0.6 mm로 고정시켰으며, 0.8 kg/mm^2 Ar 가스 압력으로 분사시켰다. 제조한 ribbon의 크기는 두께 ~10 μm, 폭 1 mm였다. 일반적으로 비정질 재질은 결정질에 비해서 기계적인 강도와 투자율이 높은 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 비정질화 촉진 원소인 B을 20 at% 첨가하였고, 냉각속도는 40 m/sec로하여 비정질화 시켰다. $Co_{80}B_{20}$의 saturation magnetostriction은 음의 값을 가지나 Co 대신 Fe를 치환시키면 점차 양의 값으로 변하며 $Co_{70}Fe_{10}B_{20}$의 조성에서 saturation magnetostriction값이 양호하게 된다. 따라서 본 연구에서는 기계적인 강도와 투자율이 높고 saturation magnetostriction이 좋은 재질인 비정질 $Co_{70}Fe_{10}B_{20}$를 magnetostrictive transducer의 재질로 선택하였다.

III. 광섬유 자계센서의 성능실험 결과

간섭계형 광섬유 자계센서의 성능을 실험해 보기 위해서 자왜변환기($Co_{70}Fe_{10}B_{20}$)로 구성된 감지부에 그림 1과 같이 솔레노이드를 감아서 자계를 인가해 주었다. *dc* 바이어스 자계신호는 전류공급기를, *ac* 자계신호는 발진기의 출력 전압을 솔레노이드에 연결해 줌으로써 감지부에 인가해 주었다. 솔레노이드에 1A의 전류를 인가해 주었을 때 생기는 솔레노이드 내부의 자계는 21.11 Oe 정도된다.

외부 잡음으로부터 간섭계를 안정화시켜 주기 위해 구성된 전자회로의 대역폭은 대략 5 kHz이다. 그림 2는 *dc* 바이어스 자계의 크기 변화에 따라서 *ac* 자계센서의 감도가 어떻게 변화하는가를 나타내 주는 주파수 1 kHz에서의 *ac* 자왜응답 특성곡선이다. 이 특성곡선은

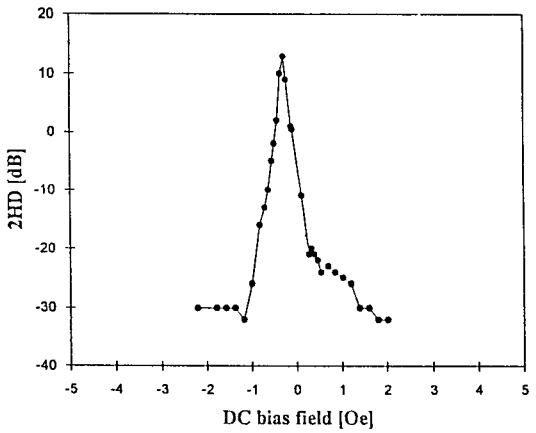

그림 4. 2nd harmonic distortion of the magnetostrictive sensor as a function of DC-magnetic field (f=1 kHz, ac field=0.61 Oe rms).

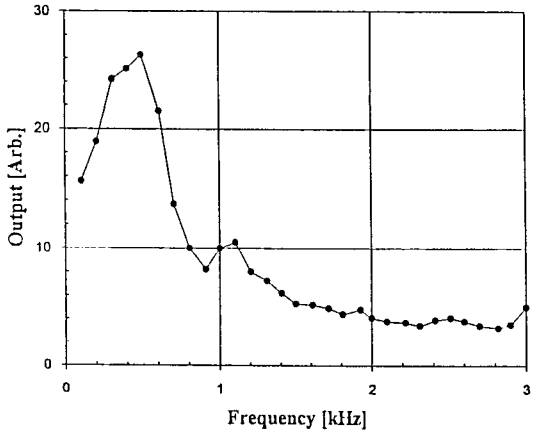

그림 5. Frequency responce of a $Co_{70}Fe_{10}B_{20}$ magnetostrictive transducer (*ac* field=0.42 Oe rms, *dc* field=－1.28 Oe)

인가 *ac* 자계신호의 크기를 0.41 Oe(rms)로 고정시키고 *dc* 자계 바이어스를 －25 Oe에서 ＋25 Oe까지 변화시켜 가면서 센서의 출력변화를 측정함으로써 얻어졌다. 이 특성곡선으로부터 감도가 최대인 *dc* 바이어스 지점은 출력이 0인 바이어스 지점에서부터 0.97 Oe 정도 떨어져 있음을 알 수 있다. 또한, 출력이 0인 바이어스 지점이 zero 바이어스 지점에서 shift된 것은 지자계등 외부 잡음 자계에 의한 바이어스 영향 때문인 것으로 추정된다.

그림 3은 측정한 *ac* 자왜 응답 곡선으로부터 계산된 자계센서의 *dc* 자왜 응답 특성 곡선이다. 이 특성 곡선은 $H=0$ 근처에서 자계에 의한 변형 특성이 식 (1)과 같다는 것을 말해 준다. *dc* 바이어스 자계에 따라서 자계센서의 2차 고조파 왜곡이 어떻게 변하는지도 측정해 보았으며, 그림 4에 그 결과를 나타내었다. 그림 4는 ac 응답이 zero가 되는 바이어스 근처, 즉 －0.27 Oe에서 2차 고조파 응답이 최대이고, *ac* 응답이 최대가 되는 *dc* 바이어스 점 근처나 그 이상에서 2차 고조파 왜곡은 －25 dB 이하로 크게 줄어든다는 것을 말해 준다. 여기서 2차 고조파 왜곡은 기본파 신호의 크기와 2차 고조파 신호의 크기의 비를 말하며 스펙트럼 분석기(Model: HP3580A)를 이용하여 측정되었다.

$Co_{70}Fe_{10}B_{20}$ 자왜변환기의 주파수 특성은 *dc* 자계를 1.28 Oe에 *ac* 자계를 0.42 Oe(rms)에 고정시키고 주파수를 100 Hz에서 3 kHz까지 변화시켜 가면서 측정해 보았으며 측정 결과는 그림 5와 같다. 그림 5로부터 500 Hz 근처에서 자왜변환기의 ac 자왜응답이 피크가 된다는 것을 알 수 있다.

그림 6은 자왜변환기에 인가한 *ac* 자계신호와 *ac* 자계신호를 인가했을 때의 광섬유 자계센서의 출력신호를 storage oscilloscope에 나타낸 그림이다. 윗 신호는 주파수가 1 kHz 이고 크기가 0.43 Oe(rms)인 *ac* 인가 자계신호를, 아래 신호는 자계센서에 －1.26 Oe의 *dc* 바이어스를 걸어 주었을 때의 광섬유 자계센서의 출력신호를 나타낸 것이다. 그림 7은 자계센서의 출력신호를 스펙트럼 분석기를 통해서 resolution bandwidth를 100 Hz로 고정시켜 놓고, 주파수 0～5 kHz 사이에서 스펙트럼 분석한 신호이다. 윗 신호는 변조주파수가 3 kHz 이고 rms 크기가 0.31 Oe인 *ac* 자계신호를 감지부에

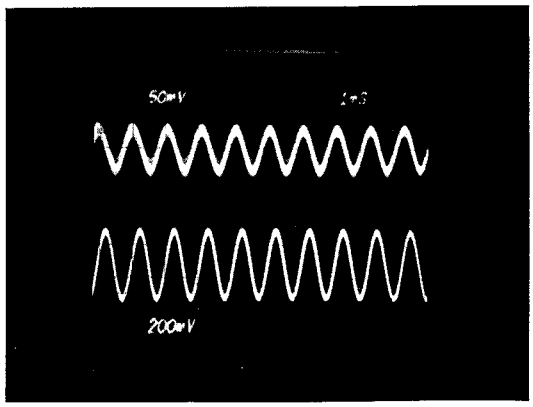

그림 6. Dual beam oscilloscpoe trace of the applied magnetic field signal (top trace) and the resultant output signal (bottom trace) of an optical fiber magnetic field sensor: applied field=0.43 Oe(rms) at 1 kHz, bias field=－1.26 Oe.

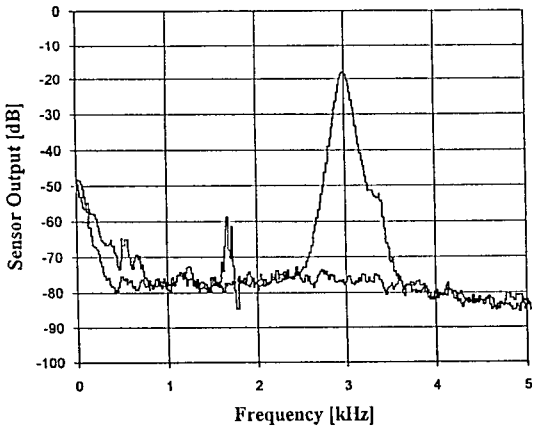

그림 7. Spectrum of the magnetic field sensor output from 0 to 5 kHz, measured in 100 Hz bandwidth. The upper trace is the spectrum when a 0.31 Oe rms signal at 3 kHz is applied to the sensor, whereas the lower trace is recorded without modulation.

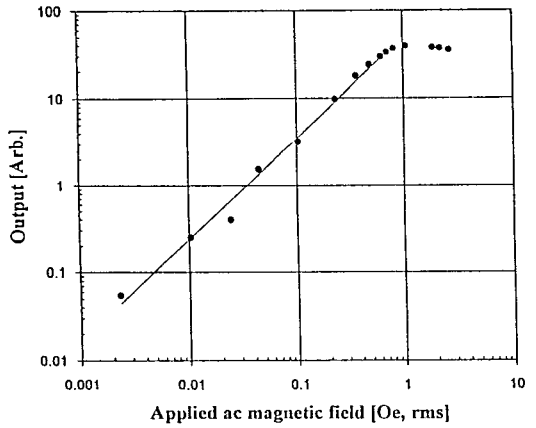

그림 8. Output of an optical fiber magnetic field sensor as a function of the magnitude of an applied magnetic field (f=1 kHz, dc field=−1.26 Oe)

인가해 주었을 때의 스펙트럼이며, 아래 신호는 *ac* 자계신호를 인가해 주지 않았을 때의 스펙트럼이다. 이들 두 신호로부터 대역폭 1 Hz에서의 잡음레벨과 같은 신호, 즉, 최소 감지 자장 (minimum detectable magnetic field)은 얻어질 수 있는데 이 값은 $3.9+10^{-5}$ Oe(rms)/Hz였다. 최소 감지 자장을 제한하는 잡음에는 주변 저주파 magnetic noise, intrinsic interferometer noise, 외부환경(온도, 압력, 진동)변화에 의한 위상이나 편광상태 변동으로 생기는 저주파 interferometer noise 등이 있다. 이들 대부분의 잡음은 아주 낮은 주파수 영역에서 심하기 때문에 측정하고자 하는 자계신호(*dc* 혹은 저주파)를 고주파 carrier(혹은 dither) 신호로 일단 고주파 변환(frequency upconversion) 시켜주는 경우 최소감지자장을 크게 낮추어 줄 수 있다.

마지막으로 외부 인가 *ac* 자계의 크기를 변화시켜 가면서 간섭계형 자계센서의 출력변동을 시험해 보았다. 이때 *dc* 바이어스 자계는 *ac* 자왜응답이 최대인 −1.26 Oe 근처에 고정시켰으며, 변조주파수는 1 kHz였다. ac 자계의 크기를 2 mOe(rms)에서 1 Oe(rms)까지 변화시켜 가면서 자계센서의 출력이 어떻게 변화하는지를 그림 8에 나타내었다. 그림 8로부터 자계센서의 선형성은 출력이 clipping에 의해서 포화되는 1 Oe(rms) 근처까지는 비교적 양호하다는 것을 알 수 있다. 1 Oe(rms) 근처에서 clipping에 의해서 포화되는 이유는 Co-Fe-B 자왜변환기의 *ac* 자왜특성 곡선 (그림 2) 및 *dc* 자왜 특성곡선 (그림 3)으로부터 쉽게 알 수 있다.

IV. 결 론

자왜변환기용 Co-Fe-B ribbon을 melt-spun법에 의해서 제작한 후, 광섬유 Mach-Zehnder 간섭계의 sensing arm에 부착하여 간섭형 자왜센서를 구성하였다. 구성된 간섭형 자계센서는 외부 잡음에 안정성이 있도록, 출력을 간섭계의 reference arm에 부착되어 있는 PZT에 궤환시켜 주었다.

Co-Fe-B 자왜변환기로 구성된 자계센서의 동작실험 결과, ac 자왜 응답이 최대가 되는 *dc* 바이어스 점은 응답이 zero인 지점으로부터 0.97 Oe가 떨어진 곳에 위치하고 있으며, *dc* 바이어스는 *ac* 응답이 최대가 되는 *dc* 바이어스점 근처나 그 이상에 걸어 주어야 2차 고조파 왜곡이 크게 줄어든다는 것을 알 수 있었다. Co-Fe-B 자왜변환기의 응답은 변조주파수 500 Hz 근처에서 피크를 보였고, 자왜변환기로 구성된 자계센서의 최소 감지 자장은 3 kHz에서 3.9×10^{-5} Oe(rms)/Hz였다.

또한 응답이 최대가 되는 지점에 *dc* 바이어스를 고정시키고 외부에서 인가하는 *ac* 자계의 크기를 증가시키면 *ac* 자계센서의 출력은 비교적 선형적으로 증가하다가 1 Oe(rms) 근처에서부터 clipping에 의해서 포화되기 시작하였는데, 이것은 여기서 측정한 Co-Fe-B 자왜변환기의 자왜 특성 곡선으로부터 쉽게 알 수 있다.

감사의 글

방향성 결합기를 제공해 주신 KAIST의 김병윤 교수님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] S. C. Rashleigh, Opt. Lett., **6**, 19 (1981).
[2] K. P. Koo and G. H. Sigel, Opt. Lett., **7**, 334 (1982).
[3] F. Bucholtz, K. P. Koo and A. D. Kersey, A. Dandridge, SPIE **718**, 56 (1986).
[4] Y. W. Bibby, D. C. Larson, S. Tyagi and L. C. Bobb, OFS 92, 161 (1992).
[5] A. D. Kersy, M. Corke and D. A. Jackson, Elect. Lett., **20**, 573 (1984).
[6] D. Dagenais, F. Bucholtz, K. P. Koo and A. Dandridge, J of Lightwave Tech. **7**, 881 (1989).
[7] D. A. Jackson, R. Priest, A. Dandridge and A. B. Tveten, Appl. Opts., **19**, 2926 (1980)
[8] M. Brouha, J. V. Borst, J. Appl. Phys., **50**, 7594 (1979)
[9] L. T.Kabacoff, J. Appl. Phys., **53**, 8098 (1982).

Optical Fiber Magnetic Field Sensing with a Co-Fe-B Magnetostrictive Transducer

Kyung Shik Lee, Byeong Ho Yoon, Yu Sheop Lee and Yong Su Moon
Sung Kyun Kwan Univ., Dept. of Electronic Engineering, Suwon 449-746, Korea

Su Jeong Suh
Sung Kyun Kwan Univ., Dept. of Metallurgical Engineering, Suwon 440-746, Korea

(Received: October 26, 1993)

An interferometric fiber-optic magnetic field sensor is constructed by bonding a Co-Fe-B metallic glass transducer developed here by the melt-spun method to a single mode fiber arm in the fiber Mach-Zehnder interferometer and is tested. The bias field for the peak ac-sensitivity was observed near 0.97 Oe and the minimum detectable magnetic field was 3.9×10^{-5} Oe(rms)/$\sqrt{\text{Hz}}$ a 3 kHz. The output of the ac field sensor becomes saturated near the input signal level of 1 Oe(rms). The Co-Fe-B transducer exhibits peak response near 500 Hz.