

미소 교류 자기장 측정을 위한 Mach-Zehnder 광섬유 간섭계 자기센서 특성분석

김대연 · 안준태 · 공홍진 · 김병윤

한국과학기술원 물리학과

(1991년 6월 21일 접수)

광섬유를 사용하여 미소 교류자기장 (200 Hz-2 kHz) 감지를 위한 광섬유 간섭계 자기센서시스템을 구성하였다. 자왜효과(magnetostriction effect)가 큰 비정질 metallic glass(2605SC)를 광섬유에 부착하여 자기장 감지부를 제작하고 방향성 결합기 metallic glass(2605SC)를 광섬유에 부착하여 자기장 감지부를 제작하고 방향성 결합기(directional coupler)를 사용한 광섬유 일체식(all-fiber type)으로 Mach-Zehnder 간섭계를 구성하여 외부 자기장의 변화를 간섭계의 위상변화로 변환시켜 그 크기를 측정하였다. 온도변화, 진동 등 주위환경에서 오는 불규칙한 신호에 의한 간섭계의 신호소멸(signal fading) 문제는 능동 위상추적방법(active phase tracking method)으로 간섭계의 기준 광통로(reference arm)에 위치한 위상변조기에 보상신호를 되먹임으로써, 직각조건(quadrature condition)을 이루어 안정시켰다.

측정 결과 metallic glass의 주파수 반응특성은 900 Hz-2 kHz 대역에서 거의 비슷한 경향을 보였으며 최대 감도를 나타내는 직류 바이어스 자기장은 3.5 Oe 였다. 미소 교류자기장에 대한 간섭계의 출력은 ± 0.5 Oe 범위 안에서 좋은 선형성을 보였다. 1 kHz 교류자기장에 대한 scale factor S는 8.0 rad/Oe 이었으며 최소감지자기장은 3×10^{-6} Oe/ $\sqrt{\text{Hz}}$ (1 Hz detection bandwidth)이었다.

I. 서 론

최근 10 여년에 걸쳐 광섬유를 이용하여 각종 물리량을 정밀 측정하는 광섬유 센서에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔다.^[1,2] 광섬유 센서는 기존의 비해 고감도이고 전자기 간섭이 없으며 굽힘성이 좋아 임의의 형태로 만들 수 있다는 장점 등을 지니고 있어 1977년 Bucaro와 Dardy에 의해 음향 센서^[3]가 보고된 이래 각속도, 자기장, 온도, 압력 및 가속도 등의 측정에 활용하기 위한 연구개발이 시도되어 그 중 일부는 실용화되었거나 실용화 단계에 와있다.

자기 센서가 경우 그 용도는 매우 다양하여 군사적 응용뿐만 아니라 의료분야, 광맥탐사 등 민수 측면에서도 널리 활용되고 있다. 현재 이러한 목적에 사용되고 있는 고성능 자기센서로는 SQUID(superconducting quantum interference device), vapour pression 및 fluxgate 등이 있으며 광섬유 자기센서는 그 자신이 갖는 여러가지 장점으로 기존의 센서에 대체할만한 풍부한 잠재력을 지니고 있다.

광섬유 자기센서는 접근방식에 따라 크게 2가지로

구분된다. 즉, Faraday rotation^[4]을 이용하는 방법과 자왜현상(magnetostriction)^[15]을 이용하는 방법이다. 전자의 경우는 외부자기장과 광섬유의 코어내를 진행하는 선편광 빛과의 직접적인 작용으로 외부자기장에 의해 광섬유에 유기되는 원형복굴절(circular birefringence)에 의한 편광면의 회전을 이용하는 방법이다. 이 방법은 좋은 선형성을 지니므로 넓은 주파수범위(수십 Hz-100 MHz)의 교류자기장측정에 적합하다. 그러나 silicate fiber의 Verdet상수가 아주 작기때문에($V = 4.6 \times 10^{-6}$ rad/A = 3.7×10^{-4} rad/Oe · m) 미소자기장을 측정하기 위해서는 그 감도가 제한을 받는다는 문제점이 있다. 이에 반하여 후자는 광섬유에 자왜물질을 부착하여 감지부를 만들고 이를 한쪽 광통로로 사용하는 간섭계를 구성함으로써 외부자기장에 따른 물질의 길이변화를 광섬유 코어내를 진행하는 빛의 위상변화로 변화시켜 그 위상을 측정하는 방법이다. 이 방법은 부착된 물질의 자왜결과 광섬유에 인가되는 strain에 의해 광섬유의 길이 및 굴절률의 변화가 생성되는 것으로 간접적이며 비선형특성을 지니게 되는데, 전자에 비해 가용주파수범위 및 dynamic range에 제약을 받으며 신호처리과정이 복잡하나

상대적으로 고감도이기때문에 미소 자기장측정에 적합하다.

강자성 물질의 자왜효과를 이용한 미소자기장측정은 1980년 Yariv와 Winsor^[5]에 의해 그 가능성이 제시된 후 Dandridge 등^[6]에 의해 최초로 bulk nickel을 사용하여 1-10 kHz의 주파수범위에서 최소감지자기장이 $8 \times 10^{-8} \text{ Oe}/\sqrt{\text{Hz}}$ 를 갖는 자기센서에 대한 실험적 결과가 보고되었다. Metallic glass를 사용한 교류 자기센서는 1982년 Koo 등^[7]에 의해 strip형 cylinder형 등의 센서 형태에 따른 측정결과가 발표되었으며 그 중 특히 실린더형의 경우 최소감지자장 $5 \times 10^{-9} \text{ Oe}/\sqrt{\text{Hz}}$ 가 보고되었으며 strip형은 $2.3 \times 10^{-8} \text{ Oe}/\sqrt{\text{Hz}}$ 이었다. Metallic glass 2605SC를 사용할 경우 단위 길이(1m)당 인가되는 단위 바이어스 자기장(1 Oe)에 의해 간섭계에 유도되는 위상변화량(rad)의 값, 즉 이론적인 scale factor S_0 는 $\gamma = 633 \text{ nm}$ 파장에서 최대 $1.01 \times 10^3 \text{ rad/Oe}$ 의 값을 갖는다. 그러나 실제 scale factor S는 감지부의 형태(configuration) 및 자왜물질의 상태-반자화(demagnetization), annealing 조건 및 mechanical loading-등에 의해 그 값이 결정되는데 strip형태의 경우 실제 scale factor S는 1-10 rad/Oe, 특수한 실린더 형태의 경우는 약 450 rad/Oe가 보고된 바있다.^[8]

본 논문에서는 미소자기장측정을 위해 metallic glass를 strip형태로 감지부를 만들고 Mach-Zehnder 간섭계를 구성하여 200 Hz-2 kHz의 교류자기장에 대한 주파수 응답 특성 및 선형성 등을 조사하였다.

II. 이 론

1. 탐지원리

Metallic glass와 같은 강자성 물질(길이 l)에 있어서 자왜는 외부자기장 $H=0$ 근처에서

$$\frac{\Delta l}{l} \equiv \epsilon = CH^2 \quad (1)$$

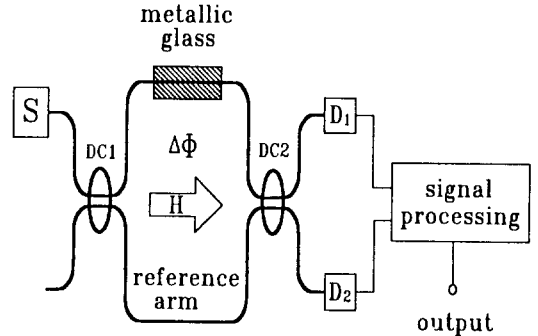
단, 여기에서 $\frac{\Delta l}{l}$: 자왜에 의한 변형(deformation),

ϵ : strain,

H : external magnetic field(인가되는 총 외부자기장),

$C = \frac{3\gamma_s}{2H_A^2}$ 물질의 자기변형상수

(γ_s : 포화자기변형, H_A : magnetic anisotropy field)



S : 광원 DC1, DC2 : 방향성 결합기 D1, D2 : 광검출기
H : 외부 자기장 ΔΦ : 위상변화량

그림 1. 광섬유 Mach Zehnder 간섭계

로 H의 제곱에 비례하는 비선형특성을 갖는다^[9]

그림 1은 2개의 광통로, 즉 기준광통로(reference arm)와 metallic glass에 광섬유를 부착하여 만든 자기장 감지부의 길이측방향으로 자기장을 평행하게 걸어주면 그 방향을 따라 자왜물질에 자기적 변형이 유도되어 부착된 광섬유에 strain이 인가됨으로써 그 결과 광섬유의 길이 및 굴절률의 변화가 생겨 두 광통로 사이에 위상차가 유도된다. 신호광통로의 광섬유 코어내부를 진행하는 빛에 유기되는 위상변화량 $\delta\Phi$ 는

$$\delta\Phi = \Delta(k_0 n L) = k_0 n L \left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta n}{n} \right) = k L C H^2 \quad (2)$$

단, 여기에서 $k = k_0 n \left[1 - \frac{n^2}{2} (P_{12}(1-\sigma) - \sigma P_{11}) \right]$,

광섬유내에서의 수정된 전파상수(modified propagation constant),

$k_0 = \frac{2\pi}{\gamma_0}$ 진공중에서의 전파상수,

n : 광섬유 코어의 굴절률,

L : 광섬유와 자왜물질의 작용길이(interaction length),

P_{ij} : 광섬유 코어의 탄성-광학 상수(elasto-optic coefficient)

σ : Poisson's ratio

으로 표현된다. 일정한 주기를 갖는 미소교류자기장에 의해 간섭계에 유도되는 위상변화 $\delta\Phi(t)$ 는 전체 외부

자기장 $H(t)$ 를

$$H(t) = H_{dc} + H_{ac} \cos(\omega t) \quad (3)$$

과 같이 직류성분 H_{dc} 와 각주파수 ω 를 갖는 변조신호인 미소교류성분 H_{ac} 의 합으로 나타낼 수 있으므로 (2)식과 (3)식으로부터

$$\begin{aligned} \delta\Phi(t) = & kLC(H_{dc}^2 + \frac{H_{ac}^2}{2}) + 2kLCH_{dc}H_{ac} \cos(\omega t) \\ & + \frac{1}{2}kLCH_{ac}^2 \cos(2\omega t) \end{aligned} \quad (4)$$

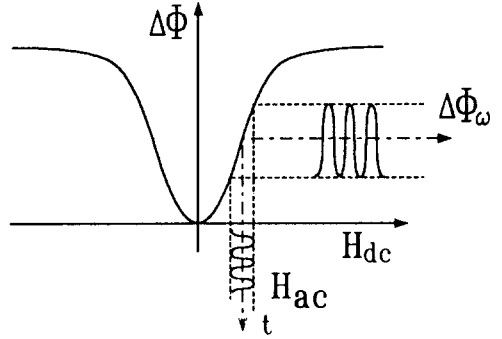
주어지며 주파수 ω 와 2ω 에 대응하는 각각의 위상변화의 amplitude $\delta\Phi_\omega$, $\delta\Phi_{2\omega}$ 는 뒀식으로부터 각각

$$\delta\Phi_\omega \equiv 2 kLCH_{dc}H_{ac}$$

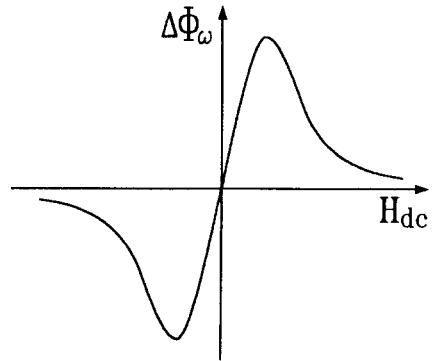
$$\delta\Phi_{2\omega} \equiv \frac{1}{2} kLCH_{ac}^2 \quad (5)$$

이다. 즉 직류자기장과 교류자기장을 함께 인가하면 위상변화량은 직류성분, 변조주파수 ω 성분과 2차고조파(2nd harmonics) 2ω 성분이 나타나므로 $\Delta\Phi_\omega$ 혹은 $\Delta\Phi_{2\omega}$ 을 측정함으로써 교류자기장 H_{ac} 값을 구할 수 있다. 한편 직류 바이어스자기장을 걸어 주지않을 경우($H_{dc}=0$) 위상변화량은 직류성분과 2차고조파성분만 나타나며 측정하려는 교류자기장은 상대적으로 아주 작기때문에 교류 자기장측정을 위해서는 직류 바이어스 자기장을 걸어주는 것이 효과적임을 알 수 있다. 또한 역으로 직류자기장을 측정하기 위해서는 교류 바이어스자기장을 걸어주면 된다.

교류자기장에 의한 위상변화량은 그림 2와 같이 표현할 수 있다. 즉 그림 2-a와 같이 위상변화 $\Delta\Phi$ 를 직류 바이어스자기장 H_{dc} 의 함수로 표시하면 미소 교류자기장에 의한 위상변화는 이 특성곡선의 임의의 한 점, 곧 고정된 직류 바이어스자기장에서의 small perturbation으로 나타난다. 따라서 각주파수 ω 인 교류자기장을 걸어주면 이에의한 출력 $\Delta\Phi_\omega$ 는 그림 2-a의 곡선의 기울기에 비례하므로 기울기가 최대가 되는 점에서 최대출력을 얻게된다. 그러므로 측정하려는 교류자기장에 대한 감도(sensitivity)를 높이기 위해서는 직류 바이어스 자기장을 걸어 주어 $\Delta\Phi_\omega$ 출력이 최대가 되는 점을 찾아야 한다. 그림 2-b는 바이어스 자기장값에 따른 $\delta\Phi_\omega$ 의 값을 도시한 것으로 H_{ac} 를 증가시키에 따라서 점차 증가하다가 최대치에 이르고 다시 감소하여 "zero"로 떨어지게 되는데 이는 자기장에 의한 위상변화량이



a) 직류자왜특성곡선(dc magnetostrictive response); 직류 바이어스 자장값 (H_{dc})에 따른 유기된 위상변화량 $\Delta\Phi$ 및 신호출력



b) 교류자왜특성곡선(ac magnetostrictive response); 일정한 교류자장인가시 직류 바이어스 자장값 (H_{dc})에 따른 위상변화량 $\Delta\Phi_\omega$

그림 2. 자왜특성곡선

포화치에 이르렀음을 의미한다.

자기장감지부의 metallic glass에 부착된 광섬유의 단위 길이당(1m) 인가되는 단위 바이어스 자기장(1Oe)에 의해 간섭계에 유도되는 위상변화량을 scale factor S라고 정의하는데^[8] 교류자기장에 대한 scale factor S는 식 (5)로부터

$$S\omega \equiv \frac{\delta\Phi_\omega}{L H_{ac}} = 2kC \quad (6)$$

로 나타난다.

2. 신호 안정화 및 출력

한편 실제에 있어서 그림 1과 같은 Mach-Zehnder 간섭계에 유도되는 총위상변화는 자기장뿐만 아니라 주위 환경요인에도 기인한다. 특히 silicate fiber의 경우 열광학계수($dn/dT=10 \times 10^{-6}/^{\circ}C$)가 아주 커서 주위 온도변화에 민감한 반응^[10]을 보이는데 이러한 신호의 특성은 불규칙적이며 아주 천천히 변한다. 따라서 간섭계에서 형성되는 총위상변화 $\delta\Phi(t)$ 는

$$\delta\Phi(t) = \Delta\Phi(t) + \Delta\Phi_a(t) \tag{7}$$

단, 여기에서 $\delta\Phi(t)$: 인가된 자기장에 의한 위상변화, $\Delta\Phi_a(t)$: ambient phase shift (주위 환경요인에 의한 위상변화, random noise)

로 둘 수 있다.

간섭계에 유도된 위상변화 $\delta\Phi(t)$ 는 광검출기에서 기준광과 신호광의 간섭으로 나타나는 간섭무늬의 강도(intensity) 변화로 변환되어 검출된다. 광검출기 D_2 에 검출되는 intensity $I(t)$ 는

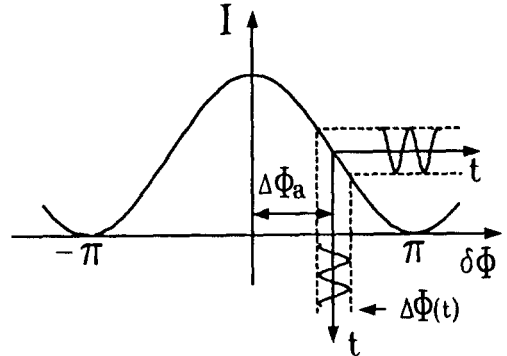
$$\begin{aligned} I(t) &= \frac{I_0}{2} [1 + \gamma \cos\{\delta\Phi(t)\}] \\ &= \frac{I_0}{2} [1 + \gamma \{\cos\Delta\Phi(t) \cos\Phi_a(t) - \sin\Delta\Phi(t) \sin\Phi_a(t)\}] \end{aligned} \tag{8}$$

단, 여기에서 I_0 : 광섬유에 결합된 initial intensity,

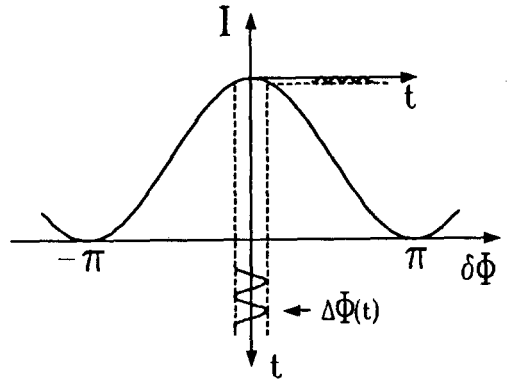
$$\gamma = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \text{ ; 간섭무늬 선명도 (fringe visibility)}$$

(I_{max} : 최대 강도, I_{min} : 최소 강도)

로서 그림 3과 같이 $\delta\Phi(t)$ 의 함수로 강도곡선을 표현하면 곡선위 임의의 $\delta\Phi_a(t)$ 의 값에 따라 $\delta\Phi(t)$ 에 대한 간섭계의 출력이 변하게 된다. 즉, $\Delta\Phi_a(t)$ 는 고정되어 있지않고 온도와 진도 등 주위환경에 의하여 불규칙하게 변하므로 그림 3의 강도곡선을 따라 움직이게 된다. 따라서 $\Delta\Phi_a(t) = \pi/2$ 일때 $\Delta\Phi(t)$ 에 의한 간섭계의 출력은 최대가 되고 $\Delta\Phi_a(t) = 0$ 일때 출력은 최소가 되는 현상(signal fading)이 일어나게 된다. 그러므로 $\Delta\Phi(t)$ 에 의한 간섭계의 출력이 최대가 되고 안정된 값을 얻기 위해서는 식 (8)로 표현되는 강도곡선 위에서 변화율이 가장 큰 곳에 $\Delta\Phi_a(t)$ 를 고정시켜야 한다. 따라서 식 (8)의 미분값이 최대가 되는 점, 곧 $\Delta\Phi_a(t) = \pi/2$ 를 유지



a) 최대출력 ($\Delta\Phi_a(t) = \pi/2$ 일 경우)



b) 최소출력 ($\Delta\Phi_a(t) = 0$ 일 경우)

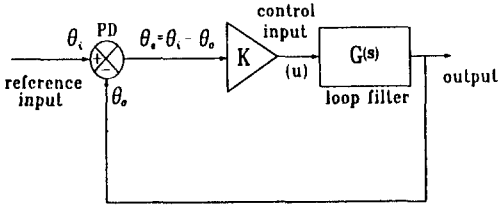
그림 3. 위상차 $\Delta\Phi_a(t)$ 에 따른 간섭계 출력특성

하도록 하여 최대출력을 얻을 수 있는데 이를 직각조건(quadrature condition: $\Delta\Phi_a(t) = \pi/2$)이라 한다. 이러한 signal fading 문제를 해결하고 안정된 출력을 얻기 위한 방법으로 heterodyne, passive homodyne, active homodyne technique 등이 있으며 본 논문에서는 PZT를 이용한 능동위상추적방법^[11,12]으로 신호안정화를 기하였다.

위상추적방법은 그림 4와 같이 error driven feedback control system을 구성하여 위상검출기에 되먹임되는 보상출력의 위상이 기준입력위상(reference input phase)을 그대로 따라가도록 하는 것이다. 위상검출기(PD)에 검출되는 phase error $\theta_e(t)$ 는

$$\theta_e(t) = \theta_i(t) - \theta_o(t) \tag{9}$$

단, 여기에서 $\theta_i(t)$: 기준입력의 위상, $\theta_o(t)$: 보상출력의 위상



PD: 위상검출기 θ_r : reference input phase θ_o : output phase K: 이득 u : 제어입력(control input) G: transfer function

그림 4. Error driven feedback control system

이며 이득 K가 곱해져 loop filter의 control 입력(u)이 된다. 시스템의 동작특성을 입력 $\theta_r(t)$ 에 대한 $\theta_o(t)$ 과 $\theta_o(t)$ 의 Laplace Transform function $H_r(s)$, $H_o(s)$ 으로 나타내면 각각 아래와 같이 표현된다.

$$H_r(s) = \frac{\theta_r(s)}{\theta_o(s)} = \frac{1}{1 + KG(s)}$$

$$H_o(s) = \frac{\theta_o(s)}{\theta_r(s)} = \frac{KG(s)}{1 + KG(s)}$$

여기서 $KG(s)$ 의 값을 이득대역폭이라하며 이 값이 클수록 error 신호는 작아지며 출력은 입력과 같게된다. 그러나 실제 K의 값을 무한정 크게 할 수 없으므로 회로 구성방식에 따라 위상추적 system의 성능이 제한된다.

본 실험에서 실제 구성한 신호보상회로의 block diagram은 그림 5에서 보는 바와 같으며 여기서 위상변조기의 역할은 되먹임된 전압 $V_4(t)$ 를 위상으로 바꾸어 주는 것으로 위상보상량 $\Phi_c(t)$ 와의 관계는 식 (9)와 식 (10)으로부터 다음과 같은 Laplace 변환으로 표현된다.

$$\Phi_c(s) = G(s) V_4(s),$$

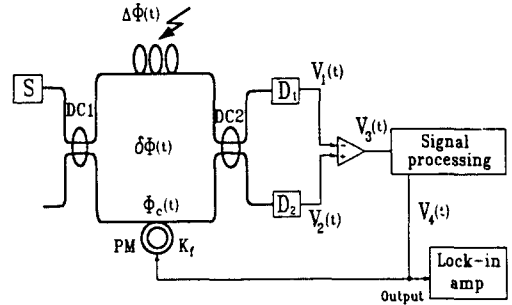
$$V_4(s) = \frac{\delta\Phi(s) K}{1 + KG(s)}$$

단, 여기에서 $G(s)$: feedback loop gain,

$G(s) = K_f$ 위상변조기의 전압대 위상변환율 [rad/Volt]

K: forward loop gain.

한편 식 (8)에서 간섭무늬 선명도 γ 를 "1"로 두면 광검출기 D_1 , D_2 에 유기되는 각각의 출력전압 $V_1(t)$, $V_2(t)$ 는 아래와 같이 표현되는데 intensity에 비례하고 π rad 위상차를 갖는다.



S: 광원 DC1, DC2: 방향성 결합기 D_1 , D_2 : 광검출기 PM: 위상변조기 $\Delta\Phi(t)$: 자기장유도위상변화 $\delta\Delta(t)$: 총위상변화 $\Phi_c(t)$: 보상위상 K_f : 변환율

그림 5. 신호보상회로의 Block Diagram

$$V_1(t) = \frac{V_o}{2} [1 - \cos\{\delta\Phi(t)\}]$$

$$V_2(t) = \frac{V_o}{2} [1 + \cos\{\delta\Phi(t)\}]$$

단, 여기에서 V_o 는 initial intensity I_o 에 대응하는 전압값.

차동증폭기를 거친 결과 $V_3(t)$ 는

$$V_3(t) = V_2(t) - V_1(t) = V_o \cos\{\delta\Phi(t)\}$$

로 주어지는데 $V_3(t)$ 는 식 (11)에서 주어지는 조건을 만족하는 적절한 적분기(loop filter)를 거쳐 보상신호 $V_4(t)$ 로 되어 위상변조기에 인가된다. 한편 간섭계가 직각조건을 유지하기 위해서는 보상되는 위상 $\Phi_c(t)$ 는 항상 $\delta\Phi(t) - \Phi_c(t) = 2m\pi + \pi/2$ 를 만족해야 한다. 그러므로 $V_3(t)$ 는 식 (13)에서 보는 바와 같이 항상 "zero"가 되어야 하므로 error신호의 역할을 하게 되며 이것은 직각조건에서 벗어난 정도를 의미한다.

즉, 그림 6에서 보는 바와 같이 직각조건을 만족하게 되면 항상 위상이 $\pi/2$ 인 곳에 위치하여 감도가 최대로 되고 안정된 출력을 얻을 수 있다. 그리고 신호보상 결과 error 신호는 항상 "0"으로 가도록 보상신호가 되먹임되므로 따라서 이 보상신호를 lock in amp.에 연결하여 ω 성분을 측정함으로써 외부교류자기장에 의한 위상변화를 구하게 된다. 그러므로 광검출기 D_1 및 D_2 에 유도되는 각주파수 ω 성분의 출력 V_o 은

$$V_o = KH_{ac}$$

단, 여기에서 $K = 2\eta I k L C H_{ac}$ [V/Oe],

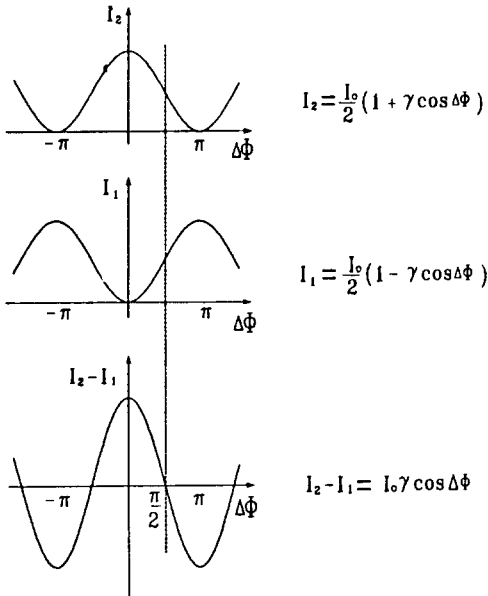


그림 6. 직각조건(Quadrature Condition)

Γ : 간섭계의 voltage to phase shift scale factor [V/rad]
 η : loading effect(strain to fiber transfer efficiency)

으로 표현할 수 있으며 k 및 L 은 식 (1)과 식 (2)에서 정의된 바와 같다. 따라서 적절한 이득(G)을 갖는 되먹임 회로를 구성하면 그 출력 (V_{fb})은

$$V_{fb} = \frac{KG}{1+KG} V_w \tag{15}$$

로 주어지며 $KG \gg 1$ 일 경우

$$V_{fb} = V_w \tag{16}$$

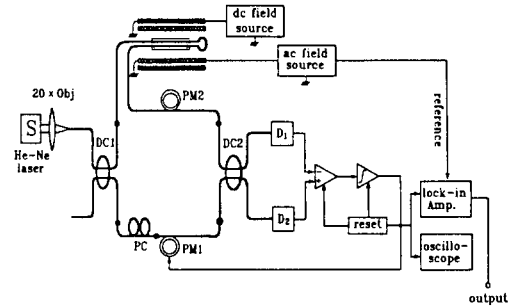
으로 된다. 따라서 식 (5)와 (16)으로 부터

$$V_{fb} = \eta \Gamma \Delta \Phi \omega \\ = 2\eta \Gamma k H C H_{ac} H_{ac} \tag{17}$$

로 주어지므로 V_{fb} 를 측정하면 이로부터 H_{ac} 를 구할 수 있다.

III. 실험장치 및 방법

그림 7과 같이 광섬유 방향성결합기(DC1, DC2)를



S: 광원 DC1, DC2: 방향성 결합기; D_1, D_2 : 광검출기 PM1, PM2: 위상변조기 PC: 편광조절기

그림 7. 실험 장치도

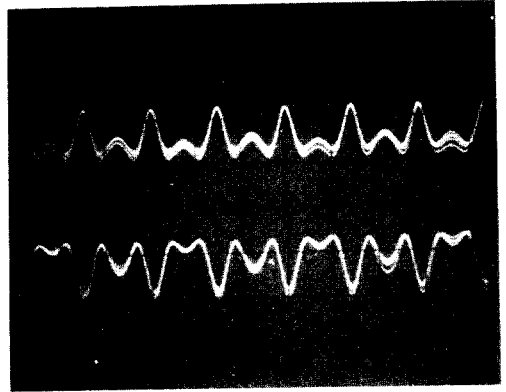
사용하여 광섬유 일체식 간섭계를 구성하였다. 방향성 결합기는 bulk optics에서의 beam splitter와 같은 역할을 하는 것으로서 KIST에서 용융인장(fusion method) 방법으로 제작한 것으로 파장 632.8 nm에서 대략 2 : 3의 결합비율(coupling coefficient)을 갖는다. 광원으로는 He-Ne 레이저(Coheren 사)를 사용하였으며 20배 대물 렌즈를 사용하여 빛을 광섬유에 결합시켰다. 사용한 광섬유는 632.8 nm에서 단일모드 광섬유로서 간섭무늬의 선명도를 높이기 위해 편광조절기(polarization controller : PC)를 간섭계의 한쪽 arm에 두었다. 위상변조기 PM1 및 PM2는 직경이 3.81 cm인 PZT5H (Vernitron 사 : 16-24125)에 광섬유를 각각 70회, 40회 감아서 제작한 것으로 그 중 PM1는 신호안정화를 위한 신호보상용으로 사용되며 PM2는 신호보상회로의 동작특성 및 자기장 신호시뮬레이션을 하기 위해 설치한 것으로 J_1 (max) 방법^[11]에 의해 측정된 변환율은 200 Hz - 2 kHz 주파수대역에서 각각 3.80 rad/Volt, 2.08 rad/Volt 이었다. 교류자기장측정을 위한 감지부는 두 겹의 metallic glass 2605SC (폭 1.2 cm, 두께 20 μ m, 길이 10 cm) 리본사이에 광섬유를 왕복 부착하여 만들었다. 접착제로 인하여 metallic glass의 자기변형효과가 광섬유에 미치는 영향이 줄어드는 효과/loading effect)를 줄이기 위해 metallic glass의 양쪽 끝에만 광학 epoxy를 사용하여 광섬유를 붙였다.^[13] 감지부에 자기장을 걸어주기 위한 solenoid는 직경이 0.45 mm인 에나멜선을 길이 30 cm, 직경 6 cm인 PVC 관에 574회 감아서 만들었다. Solenoid 중심축을 따라 형성되는 자기장의 크기는 Gaussmeter(LDJ Electronics Model 511P)를 사용하여 교정하였으며 1 mA 전류당 0.025 Oe를 발생시킬 수 있었다. 교류전류원으로 는 function generator(Hewlett-Packard, HP8116A)를

사용하였고 직류전류원으로는 DC power supply(Hewlett-Packard, HP6215A)를 사용하였다. 이들에 의한 전류는 Hewlett-Packard사 multimeter(HP3478A)로 측정하였다. 실험장치도에서 광섬유 중간에 검은점으로 표시된 부분은 광섬유들을 splicing한 곳을 나타내는데 광섬유소자(PC, PM 및 DC)들을 함께 연결한 곳이다.

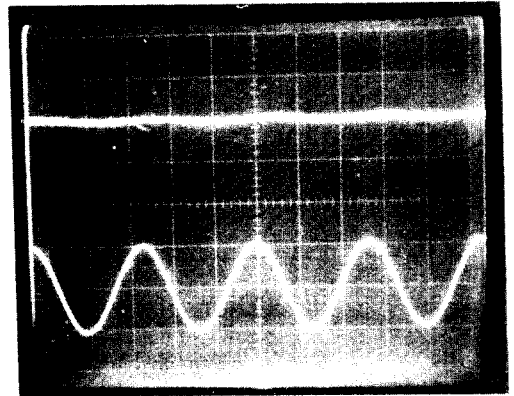
교류자기장측정은 다음과 같은 방법으로 하였다. 먼저 신호보상회로를 동작시키고 일정한 교류자장만을 인가하면서 간섭계의 출력이 2nd harmonics (2ω)만이 나오도록 oscilloscope로 보면서 감지부가 들어있는 solenoid의 방향(heading)을 조절한다. 즉, 지자장(0.5 Oe)이 자외물질에 직류 바이어스 자기장으로 작용하기 때문에 따로 바이어스를 걸지 않아도 ω 성분이 나오게 되므로(식 4, 5참조) 자기차폐를 하지않는 한 지자장에 의한 영향을 완전히 배제할 수 없으므로 lock in amp.의 출력(2ω 성분)이 최대가되는 점을 찾아 이 점에 고정시키기 위해서이다. 2ω 성분의 최대값을 찾는 까닭은 될 수 있는 대로 지자장과 metallic glass를 수직으로 교차시킴으로써 길이 방향(longitudinal direction)과 폭방향(transverse)으로 지자장이 미치는 영향을 최소화하기 위함이다. 그런 다음 lock in amp.를 주파수 ω 에 맞추고 직류자장을 서서히 높혀가면 점차 ω 주파수 성분이 나오게 되며 일정한 값에 이르면 2ω 성분에 의한 신호왜곡은 상대적으로 거의 무시할 정도가 된다. 직류자기장을 더욱 증가시키면 출력은 계속 증가하다가 최대값(peak value)에 이르고 그후는 감소하게 된다. 따라서 최대점을 찾아 직류바이어스를 고정시킨뒤 function generator의 amplitude를 조절하여가면서 lock-in amp.(Stanford Research System SR-530)의 출력을 읽는다. 동일한 방법으로 주파수를 변화시켜가며 출력을 측정한다.

IV. 실험 결과 및 논의

그림 8-a는 신호보상회로를 가동하지 않았을 때 두 광검출기에 유기되는 출력전압으로 식 (12)에서 언급한 대로 두 간섭부너 사이에 π rad의 위상차가 있음을 보여준다. 그림 8-b는 신호보상회로를 가동시키고 이득을 적절히 조절하였을 때의 공검출기 D_1 의 출력(upper trace)과 PM1에 되먹임되는 전압(lower trace)을 나타낸 것으로 광검출기의 출력이 일정한 직류값(dc level)으로 가는 것으로부터 그림 8-a와 같이 외부 자기장에 의해 감지광트로에 유도되는 위상변화를 구성한 신호보상회로가 잘 쫓아가며 작동하고 있음을 알 수 있다. 보상회로의 주파수별 error신호 출력특성은 PM2를 사용하여



a) 보상회로 구동하지 않을 경우



b) 보상회로 구동할 경우

그림 8. 광검출기에 유도되는 교류자기장에 따른 출력 (0.2 V/div. 1 ms/div.)

측정하였으며 그림 9에 도시한 바와 같이 보상회로의 bandwidth는 약 3 kHz이었다.

Metallic glass의 주파수에 따른 반응특성은 그림 10에 나타냈는데 교류자기장을 0.25 Oe, 그리고 직류자기장을 3.5 Oe로 고정시킨 후에 주파수를 바꾸면서 오실로스코프와 lock-in amp.로 출력을 본 것이다. 190 Hz 근처에서 가장 큰 값을 갖고 900 Hz-2 kHz 주파수대역에서 비교적 비슷한 반응 특성을 보이고 있다. 그림 11는 교류자외 특성곡선으로 1 kHz의 교류자기장에 대한 위상변화량을 조사한 것이다. 교류자기장의 크기를 0.25 Oe로 고정시키고, 직류자기장의 크기를 변화시키며 변조주파수(ω 성분) 출력의 진폭이 증가하고 최대치에 이른 다음 오히려

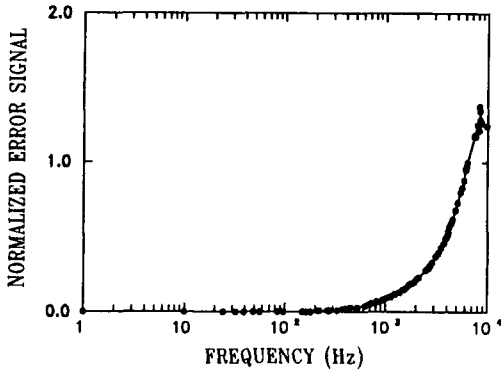


그림 9. 보상회로의 error 신호 출력

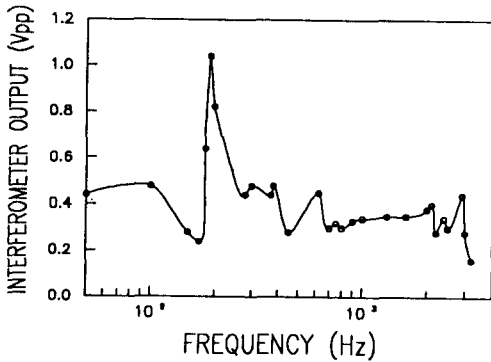


그림 10. metallic glass의 주파수 응답특성

감소하게 된다. 즉, 포화자기변형에 이르게되면 길이변화가 거의 없다는 것을 의미하며 약 3.5 Oe에서 최대 자기변형을 갖는다. 그림 12는 직류자기장을 각각 3.5 Oe와 0.7 Oe에 고정시키고 각각 200 Hz, 1, 2 kHz의 주파수에서 교류자기장의 크기변화에 따른 간섭계의 출력을 측정함으로써 ± 0.5 Oe 범위 안에서 입력 교류자기장신호와 출력사이의 선형성을 볼 수 있다.

Scale factor는 앞에서 언급한 바와 같이 센서감지부의 형태 및 자왜물질의 상태에 따라 크게 달라지며 인가되는 교류자기장의 주파수의 함수로 주어진다. 따라서 scale factor를 구하기 위해서는 식 (6)과 식 (12)로부터 먼저 간섭계의 위상 변화량에 따라 광검출기에 유기되는 전압으로의 변화계수, Γ 값을 구해야 하며 자왜물질상수 C 값과 loading effect η 값을 알아야 한다. 자왜물질상수 C 값은 제조회사의 공표치를 그대로 사용하였으며 loading effect η 값은 "1"로 근사하였다. Γ 값은 위상변조기를 사용하여 쉽게 그 값을 알 수 있다. 즉, PM2에

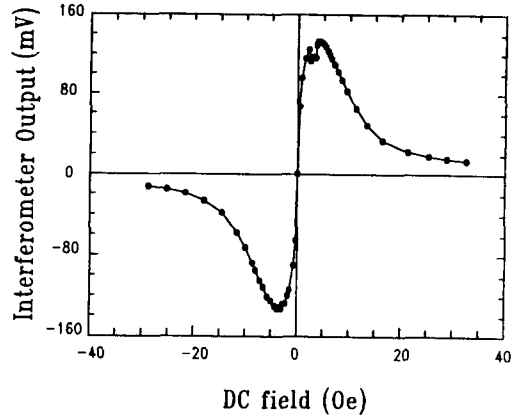


그림 11. 교류자왜특성곡선 ($f=1$ kHz)

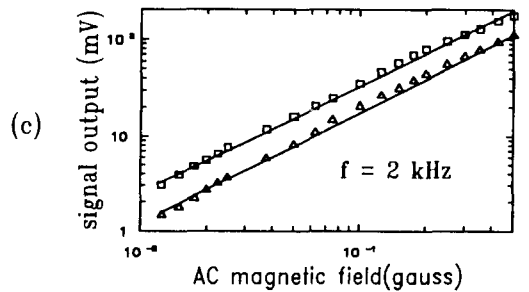
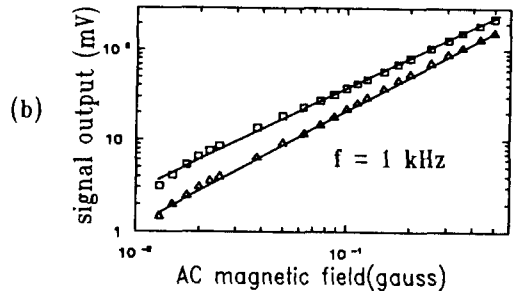
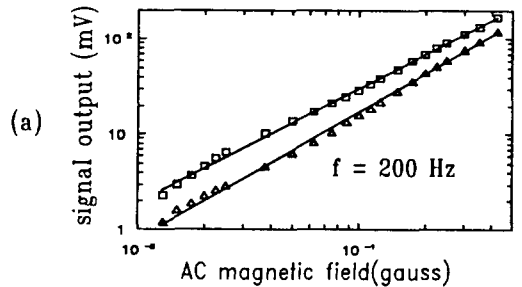


그림 12. 주파수별 교류자기장 크기 변화에 따른 간섭계 출력 (직류 바이어스자장 \square : 3.5 Oe, \triangle : 0.7 Oe)

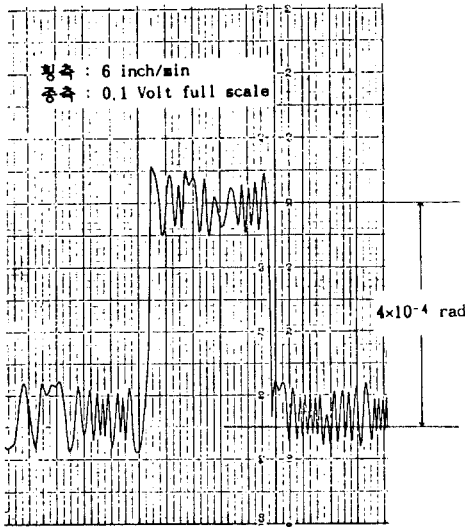


그림 13. 인가된 교류자기장 ($f=1$ kHz)에 대한 noise level

알고 있는 교류전압을 인가하여 신호보상회로를 구동하지 않는 상태에서 광검출기에 유기되는 최대 peak to peak 전압을 측정하여 위상변조기의 변화율로 환산하면 된다. 이렇게 구한 간섭계의 위상변화량에 의해 광검출기에 유도되는 전압비, Γ 는 0.25 V/rad이었다. 본 실험에서는 metallic glass를 받은 그대로 (as recieved form) 사용하여 센서를 제작하고 PM2와 solenoid를 각각 구동시켜 그 출력을 비교해 보는 방법으로 scale factor를 구하였다. 측정 결과 metallic glass의 반응특성이 거의 유사한 900 Hz-2 kHz 주파수대역에서 8.0 rad/Oe를 얻었으며 이는 strip 형태의 다른 실험결과와 잘 들어맞는다. 이론치에 비해 1/130의 값을 보이는 까닭은 특히 반자화(demagnetization), annealing 조건 등 자재물질의 상태와 hysteresis 및 mechanical loading 등에 의해 크게 영향을 받기 때문이다.^[8]

그 밖에 센서의 성능을 제한하는 주요한 noise으로는 laser source의 intensity, 편광 상태 및 phase의 fluctuation에 의한 noise, 주위온도의 변화, 진동 등에 의한 random drift, 간섭계의 고유 noise, 1/f noise, 신호처리회로의 electronics에 의한 noise, 그리고 shot noise 등을 들 수 있다. Laser source에 의한 intensity noise는 간섭계의 출력에 있어서 phase항과는 더해지는 양이기 때문에 신호보상회로의 차동증폭기에 의해 상쇄된다. (식 12 및 13 참조) 그리고 주위환경에서 오는 long term

drift에 의한 신호소멸은 신호보상회로에 의해 직각조건을 이루어줌으로써 안정된다. 본 실험에서의 noise source는 이들 요인에 의한 복합적인 작용에 기인한 것으로 판단되며 chart recorder로 받은 인가된 교류자기장에 대한 noise비 즉, $S/N=1$ (signal to noise=1)로 부터 계산한 결과 1 kHz의 교류자기장에 대해 측정가능한 최소자기장은 3×10^{-6} Oe/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 였다.(그림 13 참조)

이 결과는 다른 보고된 결과에 비해 약 20 dB 정도 차이를 보이고 있는데 감도를 향상시키기 위해서는 신호대 잡음비(SNR)를 높이는 방법에 대한 연구가 요구된다. 즉 센서를 구성하는 전체 system의 loss를 줄여야 하며 수반되는 noise source를 규명하고 개선방안을 찾아야 한다. 그밖에 metallic glass의 물성분석을 통해 자기변형상수 C 에 대한 규명도 함께 이루어져야 한다. 본 실험에서 구성한 자기장감지기의 경우 splicing loss는 약 3 dB였으며 주위 환경에 의한 random drift외에 확인된 noise source는 laser의 intensity 및 phase noise, 신호처리회로의 electronics noise등 이었다.

V. 결 론

광섬유 방향성결합기를 사용하여 미소교류자기장을 측정하기 위한 Mach-Zehnder 형광섬유 일체식 간섭계 구성하였다. 온도변화 및 진동 등 주위환경에 의한 간섭계의 신호소멸문제를 해결하고 안정된 출력을 얻기 위해 능동위상추적방법을 사용하였으며 위상변조기에 되먹임되는 보상신호를 측정함으로써 교류자기장을 측정하였다. 이 신호보상회로의 bandwidth는 약 3 kHz이었다. 시뮬레이션을 통해 얻어진 본 실험에서 구성한 자기장 측정기의 1 kHz의 미소교류자기장에 대한 scale factor는 8.0 rad/Oe 였으며 $S/N=1$ 로부터 계산한 최소 감지자기장은 3×10^{-6} Oe/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 였다. 한편, 직류자기장 크기변화에 따른 특성곡선은 앞으로 직류자기장 및 초저주파자기장 (<10 Hz) 측정에 활용될 것이다.

감사의 글

본 실험을 위해 방향성결합기를 제공하여 주신 KIST의 김명욱씨, 조재철박사, 최상삼박사님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] T. G. Gialloranzi et al., IEEE J. Quantum Electron., Vol. **QE-18**, **4**, 626 (1982).
- [2] De Paula, SPIE Vol. 556, Fiber Optic and Sensors III, 2 (1985).
- [3] J. A. Bucaro et al., J. Acoust. Soc. Amer., Vol. 62, 1302 (1977).
- [4] A. M. Smith, Appl. Opt., Vol. 17, 52 (1978).
- [5] A. Yariv and H. V. Winsor, Opt. Lett., **5**, 87 (1980).
- [6] A. Dandridge et al., Electron Lett., **16**, 408 (1980).
- [7] K. P. Koo et al., Opt. Lett. **7**, 334 (1982).
- [8] F. Bucholtz et al., SPIE Vol. 718, 56 (1986).
- [9] J. D. Livingston, Phys. Stat. Sol. A, **70**, 591 (1982).
- [10] G. B. Hocker, Appl. Opt., Vol. 18, 1445 (1979).
- [11] D. A. Jackson et al., Appl. Opt., Vol. 19, **17**, 2926 (1980).
- [12] K. Fritch et al., Rev. Sci. Instrum., **52**(7), 996 (1981).
- [13] F. Bucholtz et al., IEEE J. Lightwave Tech., Vol. LT-3, 814 (1985).

**Fiber-optic Mach-Zehnder Interferometer
for the Detection of Small AC Magnetic Field**

Dae Yeon Kim, Joon Tae Ahn, Hong Jin Kong and Byoung Yoon Kim
Department of Physics, KAIST

(Received: June 21, 1991)

A fiber-optic magnetic sensor system for the detection of small *ac* magnetic field(200 Hz-2 kHz) was constructed. Magnetic field sensing part was fabricated by bonding a section of optical fiber to amorphous metallic glass(2605SC) having large magnetostriction effect. And with the directional coupler, all fiber type Mach-Zehnder interferometer was constructed to measure the variation of the external magnetic field by translating it into the optical phase shift in the interferometer. The signal fading problem of the interferometer, which is due to random phase drifts originated from the environment, i.e., temperature fluctuation, vibrations, etc., was eliminated by feedback phase compensation. This allows the sensitivity to be maintained at the maximum by keeping the interferometer in quadrature phase condition.

The frequency response of metallic glass was found to be nearly flat in the range of 90 Hz-2 kHz and *dc* bias field for the maximum *ac* response was 3.5 Oe. The interferometer output showed good linearity over the range ± 0.5 Oe. For 1 kHz *ac* magnetic field the scale factor *S* and the minimum detectable magnetic field were measured to be 8.0 rad/Oe and 3×10^{-6} Oe/ $\sqrt{\text{Hz}}$ at 1 Hz detection bandwidth respectively.