

편광유지 광섬유 자이로스코프 제작 및 특성 측정

전민용 · 정호진 · 고연완 · 김병윤

한국과학기술원 물리학과

(1993년 11월 5일 받음)

편광유지 광섬유를 이용하여 자이로스코프를 구성하였다. 전체 시스템의 총 광 손실은 약 25 dB였으며, 지구자전속도를 기준으로 하여 장기 drift와 단기 잡음을 측정하였다. 장기 drift는 온도변화와 밀접한 관계가 있었으며 약 3°/hr 정도의 값을 얻었고, 단기 rms 잡음은 약 0.6°/hr/√Hz의 값을 나타내었다.

I. 서 론

광섬유 자이로스코프는 군사용, 산업용 등 그 응용범위가 매우 넓으며, 최근에는 자동차 항법장치에 이용하려는 연구가 진행되고 있으며, 이미 실용화 단계에 이르렀다.^[1] 초기에 구성된 광섬유 자이로스코프는 여러 가지 광학적 현상들에 의한 문제점들을 가지고 있었다. 광원의 경우 He-Ne 레이저나 레이저 다이오드 등은 가간섭 길이가 길어서 후방산란이나 Kerr 효과 등에 의해 원치 않는 위상오차가 발생한다.^[2,3] 이러한 위상 오차는 광원의 가간섭 길이가 짧은 superluminescent 다이오드나 최근 연구가 활발히 되고있는 회로류 첨가 광섬유 광원을 사용하여 줄일 수 있다.^[4,5]

일반 광섬유를 사용할 경우에는 주위 온도변화나 그 밖의 환경변화로 인하여 광섬유에 불규칙한 복굴절(random birefringence)이 유도되어 심한 drift와 편광변화에서 오는 위상오차가 발생한다.^[6] 이런 오차들을 줄이기 위하여 편광유지 광섬유를 사용한다. 이러한 광섬유를 사용하면 빛이 광섬유 속을 진행하면서 계속 동일한 편광이 유지되므로, 편광의 cross-coupling 등에 의한 비가역 위상 오차를 줄일 수 있다.^[7]

광섬유 자이로스코프는 현재 관성항법에서 요구하는 수준까지 이르게 되었으며, 이러한 과정에 도달하기까지 여러가지 신호처리방법이 개발되었다. 신호처리는 크게 개회로(open loop) 방식과^[8,10] 폐회로(closed loop) 방식이^[11,13] 있는데, 지금까지 비교적 높은 정밀도를 요구하는 응용에는 폐회로 방식을, 그렇지 않은 경우에는 주로 개회로 방식을 많이 사용해 왔으며, 최근에는 개회로 방식에서 더욱 개선된 디지털 신호처리 방식이^[14] 도입

되어 활발히 연구되고 있다.

본 연구에서는 편광유지 광섬유를 이용하여 광섬유 자이로스코프를 구성하였으며, 단기잡음 및 오랜시간 동안의 드리프트를 측정하였다. 광섬유 자이로스코프에 들어가는 모든 소자들 즉, 방향성 결합기, 편광기, 위상 변조기 등도 모두 편광유지 광섬유를 이용하여 구성하였다.

II. 이 론

그림 1과 같은 광섬유 Sagnac 간섭계에서 서로 역방향으로 진행하는 두 빛의 출력을 P_1 과 P_2 라 하고, 두 빛 사이의 위상차를 $\Delta\phi$ 라고하면, 입력방향으로 되돌아 나오는 빛의 검출된 광출력 P_{out} 는

$$P_{out} = P_1 + P_2 + 2\sqrt{P_1 P_2} \cos \Delta\phi \quad (1)$$

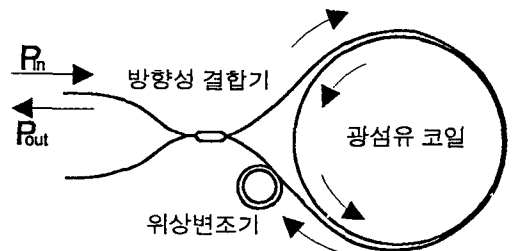


그림 1. Sagnac 간섭계.
DC: 방향성 결합기.
PM: 위상변조기.

이다. 방향성 결합기의 결합비율이 50/50이고, 광섬유의 손실을 무시하면

$$\left(P_1=P_2=\frac{P_{in}}{4}\right), \text{ 광 출력 } P_{out} \text{ 은}$$

$$P_{out}=\frac{1}{2}P_{in}(1+\cos\Delta\phi) \quad (2)$$

이다. 두 빛의 위상차 $\Delta\phi$ 는 이상적인 경우 이 간섭계의 회전 각속도 Ω 에 비례하며, 그 외의 변수에는 영향을 받지 않는다. 즉,

$$\Delta\phi=\frac{2\pi LD}{\lambda c}\Omega\equiv K\Omega \quad (3)$$

이다. 여기서 L 은 광섬유 코일의 길이, D 는 광섬유 코일의 직경, λ 는 사용한 광원의 파장, c 는 빛의 속도, K 는 scale factor이다. 식 (2)로부터 $\Delta\phi$ 에 대한 빛의 세기의 sensitivity는

$$\frac{dP_{out}}{d(\Delta\phi)}=-\frac{1}{2}P_{in}\sin\Delta\phi \quad (4)$$

와 같다. 미소 회전을 측정은 $\Delta\phi=N\pi(N=0, \pm 1, \pm 2, \dots)$ 근처에서는 어려우므로 가장 감도가 좋은 부분에서 동작이 되도록 위상bias를 걸어주어야 한다. 이러한 방법으로 그림 1에서처럼 광섬유 코일 한 쪽 끝에 위상 변조기를 놓고 서로 역방향으로 진행하는 두 빛에 대해 위상차를 변조해준다. 이때 서로 역방향으로 진행하는 두 빛 사이의 위상차 $\Delta\phi(t)$ 는

$$\Delta\phi(t)=\phi(t)-\phi(t-\tau) \quad (5)$$

가 되며, 여기서 τ 는 빛이 광섬유 코일을 통과하는데 걸리는 시간이다. 위상변조기에 $\phi(t)=\phi_0\sin\omega_m t$ 의 신호로 위상을 변조해 주면, 광섬유 코일에서 서로 역방향으로 진행하는 두 빛 사이에 나타나는 위상차 $\Delta\phi(t)$ 는

$$\Delta\phi(t)=\phi_0[\sin\omega_m t-\sin\omega_m(t-\tau)]$$

$$=2\phi_0\sin\left(\frac{\omega_m\tau}{2}\right)\cos\omega_m\left(t-\frac{\tau}{2}\right) \quad (6)$$

이다. 주어진 ϕ_0 에 대해 위상차 변조를 가장 크게 해 주는 주파수는 $\omega_m\tau=\pi$ 일 때이며, 이때의 변조주파수를 적정주파수(proper frequency)라고 한다. 적정 주파수로 위상 변조를 하면 $\phi(t)=2\phi_0\sin\omega_m t$ 가 되고, 회전에 의한 Sagnac 위상차를 $\Delta\phi_R$ 라고 하면 전체위상차 $\Delta\phi$ 는

$$\Delta\phi=\Delta\phi_R+2\phi_0\sin\omega_m t \quad (7)$$

이다. 편의상 $\eta=2\phi_0$ 로 정의하고, 식 (7)을 식 (2)에 대입하면

$$P_{out}(t)=\frac{P_{in}}{2}[1+\cos\Delta\phi]$$

$$=\frac{P_{in}}{2}[1+\cos(\Delta\phi_R+\eta\sin\omega_m t)]$$

$$=\frac{P_{in}}{2}\{1+[J_0(\eta)+2\sum_{n=1}^{\infty}J_{2n}(\eta)\cos 2n\omega_m t]\cos\Delta\phi_R$$

$$-[2\sum_{n=1}^{\infty}J_{2n-1}(\eta)\sin(2n-1)\omega_m t]\sin\Delta\phi_R\} \quad (8)$$

이 된다. 여기서 $J_i(\eta)$ 는 i 번째 Bessel 함수이다. 회전이 없는 경우 $\Delta\phi_R=0$ 이고 따라서 even function만 나타난다. 회전이 있는 경우에는 odd function의 값을 갖게되며, 그 중에서 first harmonics에 해당하는 값을 Lock-in Amp.를 통하여 기준주파수 f_m 으로 demodulation시키면 Sagnac 위상차 $\Delta\phi_R$ 에 의해 결정되는 신호 P_{fm} 을 얻을 수 있다.

$$P_{fm}\propto P_{in}J_1(\eta)\sin\Delta\phi_R \quad (9)$$

이 값을 가장 크게하기 위해서는 $J_1(\eta)$ 가 최대가 되는 η 를 선택해야 하며, 이때의 η 값은 1.84가 된다. 이러한 방법으로 광섬유 자이로스코프의 회전각속도가 작을 경우의 감도 및 안정도를 정확하게 측정할 수 있다.

III. 광섬유 자이로스코프 소자 제작 및 실험

1. 광섬유 소자의 제작

편광유지 광섬유를 이용하여 제작하는 소자는 빛이 입사했을 때 처음의 편광상태가 얼마나 유지되는가에 그 성능이 좌우된다. 편광상태를 잘 유지하도록 하려면 광섬유 안에 존재하는 복굴절 축을 잘 정렬하여야 한다. 그림 2는 본 실험에서 사용한 광섬유 안에 존재하는 복굴절 축을 보여주기 위한 편광유지 광섬유의 단면도이다. 크래딩안에 코어를 중심으로 양옆에 stress member가 있는데, 이것이 stress에 의한 복굴절을 유도한다.

가변형 방향성 결합기를 제작하는 경우는 silica glass block에 홈을 내서 광섬유를 심은 다음 연마하는 방법을 이용한다.^[15,16] Silica glass block에 광섬유를 심을 때에는 복굴절 축을 잘 정렬하여야 한다. 제작과정은 다음과

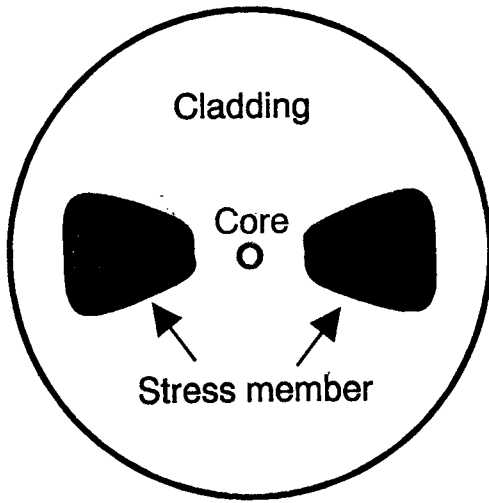


그림 2. 편광유지 광섬유 단면도

같다. 그림 3-(a)에서와 같이 silica glass block에 25 cm의 곡률을 갖도록 두께가 150 μm 인 diamond saw로 홈을 낸다. 중앙에서의 홈 깊이는 광섬유를 심었을 때 광섬유가 silica glass block 위로 약 10~20 μm 정도 튀어나올 정도이다. 광섬유의 외피를 약 2 cm 정도 벗기고, 이 부분을 silica glass block의 홈 안에 넣고서 현미경으로 복굴절 축을 관찰하면서 정렬한다. UV epoxy나 순간접착제 등을 이용하여 정렬된 광섬유를 silica glass block에 접착시킨다. 완전히 굳은 후엔 연마기를 이용하여 연마제 위에서 약 3분에서 5분정도 smoothing한다. 이후 보통 광학유리를 연마하는 pitch 판 위에서 연마하며, 이때 광섬유에 빛을 입사하고 index oil을 떨어뜨려 빛이 새어나오는 정도를 보고 광섬유의 연마된 정도를 알아낸다. 이 과정이 그림3-(b)에 나타나 있다. 이제 silica glass block를 또 하나 만들어 위와 같은 작업을 반복한다. 이와 같은 방법으로 광섬유를 심은 두개의 silica glass block이 완성되면 이것들을 서로 포개어서 방향성 결합기가 완성된다. 그림 3-(c) 같이 두개를 포개어 놓을 때는 그 중간층에 index oil을 주입한다. 방향성 결합기의 결합비를 조절하기 위해 그림에서처럼 미세조정 나사를 사용하였다. 제작한 방향성 결합기는 광원이 830 nm 파장에서 미세조정 나사를 돌렸을 때 100% coupling함을 보였다. insertion loss는 0.5 dB 이하이다. 방향성 결합기 두 쌍을 제작하였으며, 편광이 cross-coupling되는 정도는 약 -20 dB 정도였다.

한편, 광섬유 자이로스코프의 광원으로는 선풍이 넓고

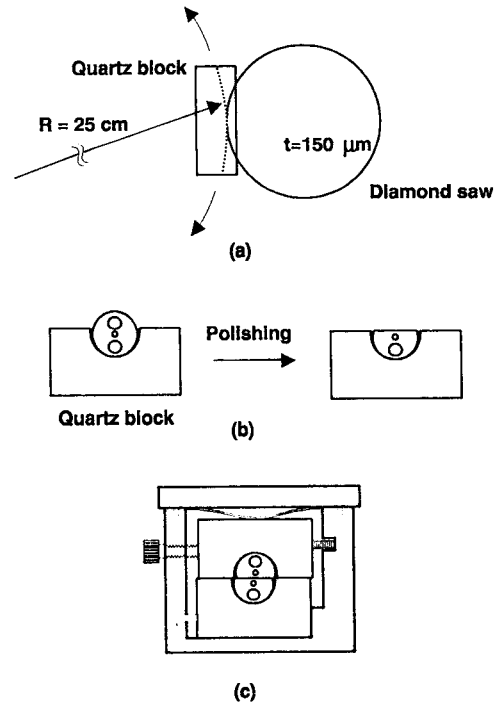


그림 3. 방향성 결합기 제작

(a) silica glass block에 diamond saw로 홈을 낸다. (b) silica glass block에 부착한 후 연마한다. (c) 두개의 완성된 silica glass block을 포개어서 방향성 결합기가 완성된다.

가간섭 길이가 짧은 것을 요구한다. 이는 광섬유 코일에서 일어날 수 있는 후방산란에 의한 간섭효과나, 광섬유 안에 존재하는 두개의 편광모드 사이에 일어나는 cross-coupling에 의한 간섭효과를 줄일 수 있기 때문이다. 이러한 광원으로는 희토류 원소가 첨가된 광섬유 광원과 superluminescent 다이오드를 들 수 있다. 본 실험에서 사용한 광원은 Laser Diode Lab.의 SRD 8300으로 선풍이 15 nm이고 파장은 823 nm이다. 편광유지 광섬유 pigtail에서 나오는 광 출력은 인가전류 130 mA에서 최대 0.25 mW이었다.

광섬유 코일은 주위의 여러가지 환경변화에 의하여 섭동이 있을 때 서로 역방향으로 진행되는 두 빛이 동일한 영향을 받지 않으면 비가역 위상오차를 일으킨다. 이것을 없애기 위해서는 광섬유 코일의 중심으로부터 광섬유를 대칭으로 감아준다. 이때 너무 세게 감게되면 micro bending이나 편광의 cross-coupling이 크게 일어나 광손실이 커지고 편광에 의한 위상오차가 많이 발생한다.

광섬유에서 편광의 cross-coupling 정도를 나타내는 것이 h-parameter이다. 광섬유의 길이 L 을 진행하는 동안 편광이 cross-coupling되는 점들은 불규칙하게 분포되어 있다. 광섬유내에서 이러한 점들이 불규칙하게 분포하므로 광섬유 전체 길이 L 을 진행하고 나온 광 출력에 대해서 ensemble average를 취할 수 있다. 편광기를 사용하여 광섬유에 빛을 한 편광모드로 입사시킨 후 길이 L 을 진행하고 같은 편광모드로 나온 광 출력을 $\langle P_{incident} \rangle$ 라 하고, 다른 편광모드로 나온 광 출력을 $\langle P_{coupled} \rangle$ 라 할 때, h-parameter는 다음과 같은 식으로 표현된다.^[17]

$$\frac{\langle P_{coupled} \rangle}{\langle P_{incident} \rangle} = \frac{1 - e^{-2hL}}{1 + e^{-2hL}} \quad (10)$$

복굴절이 큰 광섬유의 경우 $h \ll 1$ 이므로 식 (10)은

$$\frac{\langle P_{coupled} \rangle}{\langle P_{incident} \rangle} \approx \frac{1}{2} [1 - \exp(-2HL)] \approx hL \quad (11)$$

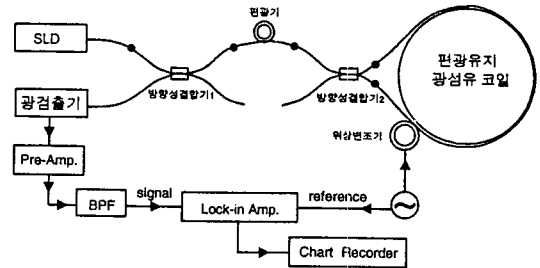
로 쓸 수 있다. h-parameter는 광섬유의 편광축을 정렬하여 빛을 한 편광모드 방향으로 입사시킨 후, 광 출력을 광섬유 길이 1 Km를 통과한 뒤의 편광기를 이용하여 다른 편광모드로 coupled된 양을 측정하여 얻어냈다. 이때 구한 h-parameter 값은 $2.5 \times 10^{-5}/m$ 이었다. 또한, 직경 8 cm의 원통형 spool에 대칭으로 1 Km가 감긴 광섬유 코일의 광손실을 측정한 결과 약 3.47 dB의 값이 나왔다.

광섬유 편광기는 특수한 광섬유(Polarizing fiber)를 사용하여, 이를 작은 직경으로 코일을 형성, 한 모드를 제거시키는 방법을 이용한 것이다.^[18] 본 자이로스코프에 사용한 편광기는 York사에서 제작한 것으로, 직경 3 cm의 코일을 만들어서 한 편광모드를 제거한 것이다. 이는 830 nm 파장에서 약 30 dB의 소광률을 갖는다.

광섬유 위상변조기는 piezoelectric cylinder로써, 원통 주위에 광섬유를 수십바퀴에서 수십바퀴까지 감아서 만든다. 이 piezoelectric tube에 전압을 가해주면 radial 방향으로 수축, 팽창이 되며, 이로써 광섬유의 길이를 변화시켜 위상을 변조해 주는 것이다. 여기서 사용한 위상변조기는 직경이 38 mm이고, 광섬유를 30바퀴 감은 것이다.

2. 실험

위에서 언급한 소자를 이용하여 자이로스코프를 구성하였다. 광섬유 소자들의 연결은 각각의 소자의 광섬유를 모세관에 넣고서 광섬유 끝을 연마한 후 양 끝단을 UV epoxy로 부착하여 연결하였다. 이것들을 이용하여 구성



● : 광섬유 연결점

그림 4. 광섬유 자이로스코프 실험 장치도

SLD: Superluminescent Diode

Pol.: 편광기

DC: 방향성 결합기

PM: 위상변조기

BPF: Bandpass filter

D: 광검출기

한 자이로스코프의 실험장치도는 그림 4와 같다. 각 소자들을 연결한 후 각연결점에서의 광 손실은 약 1.5 dB 정도였다. 빛을 광검출기로 보내기 위해서 사용하는 3 dB 방향성 결합기에서 기본적으로 발생하는 손실 6 dB와 편광기 및 광섬유 spool을 포함하여 연결한 광섬유 자이로스코프의 총 광손실은 약 25 dB 정도였다. 각 소자를 연결할 때의 중요한 점은 광섬유의 복굴절 축을 얼마나 잘 정렬하는가에 있다. 본 실험에서도 연결할 때의 축의 틀어짐은 약 $\pm 10^\circ \sim 15^\circ$ 정도로 추정된다. 광 손실이 큰 이유는, SLD에 pigtail된 광섬유 코어 크기와 자이로스코프 구성에 사용한 광섬유 코어 크기가 서로 맞지 않았기 때문이다. 간섭한 빛을 검출하기 위하여 증폭기가 내장되어 있는 EG & G사의 HAD1100 실리콘 photodetector를 사용하였다. 광섬유 코일 한쪽끝에 달려 있는 위상변조기에는 적정주파수로 정현파 신호를 가해주어서 서로 역방향으로 진행되는 빛 사이에 시간에 대하여 sine함수인 비가역 위상차를 인가해주고 앞의 이론에서 살펴본대로 가장 민감한 곳에서 Sagnac 위상차를 측정할 수 있도록 한다. 광섬유 코일의 길이가 1 Km일 때 적정주파수는 100 kHz이다. 그러나, 본 실험에서는 적정주파수를 사용하지 않았다. 그 이유는 실험과정에서 $2f_m$ 을 측정할 경우가 있는데, 여기서 사용한 Lock-in Amp.의 주파수 범위가 100 kHz까지이므로, 다른 주파수에서 변조신호를 주었다. 여기서 위상변조기에 가해진 주파수는 25 kHz이다. 이 주파수에서는 위상변조기(PZT)의 공명주파수에 해당하며, 다른 주파수에 비하여 상대적으로 가해주는 전압이 적어진다. 광 검출기에서 나온 전기신

호는 low noise pre-amplifier를 거쳐서 증폭된 후, 중심주파수가 25 kHz인 bandpass filter를 거쳐 Lock-in Amp.로 신호를 보낸다. 한편, function generator의 동기신호를 기준신호로 Lock-in Amp.에 보내어 이 기준 신호에 해당하는 주파수 성분의 크기를 검출한다. Lock-in Amp.에서 나오는 신호를 Chart recorder로 기록하여 앞의 식 (9)에 해당되는 신호를 얻을 수 있었다.

IV. 결과 및 고찰

광섬유 자이로스코프에서 회전각속도가 작을 경우의 감도와 안정도를 측정하기 위해서는 기준이 되는 회전 각속도가 있어야 한다. 정밀한 회전 테이블이 없는 경우에 지구자전속도가 좋은 기준이 될 수 있다. 대전에서 위도는 36.3°이며, 이에 해당하는 지구자전속도의 연직 성분은 약 9°/hr이다. 이 값을 기준으로 하여 잡음의 크기를 측정할 수 있다. 그림 5-I은 자이로스코프의 광원과 위상변조기 신호를 차단했을 때 나타난 전기적 신호이다. 이 신호는 자이로스코프의 광신호와 무관한 전기적인 잡음이다. 광원을 켜고, 자이로스코프의 코일 축이 연직방향일 때 위상변조기에 25 kHz의 신호를 넣으면 그림 5-II와 같이 약 9°/hr에 해당하는 지구자전에 의한 신호가 나타났다. 이때 위상변조기에 넣는 신호를 차단하여 회전신호와 무관한 offset이 있는지 알아보았고, 또한 광원에 의한 잡음과 그 외의 모든 전기잡음을 포함한 값을 측정하였다. 그 결과가 그림 5-III과 같이 나타나며, 그림 5-II와 비교해 볼 때 잡음은 같은 크기로 나타나며 offset은 나타나지 않음을 알 수 있다. 자이로스코프 코일 축을 북극 방향으로 향하게 했을 때 그림 5-IV와 같이 약 15°/hr의 값에 해당하는 신호가 검출되었다. 다시 이 축을 동쪽으로 향하면 zero 값이 나오며 (그림 5-V), 서쪽으로 향했을 때에도(그림 5-VII) zero의 값이 나왔다. 이것은 자이로스코프 축이 동쪽이나 서쪽

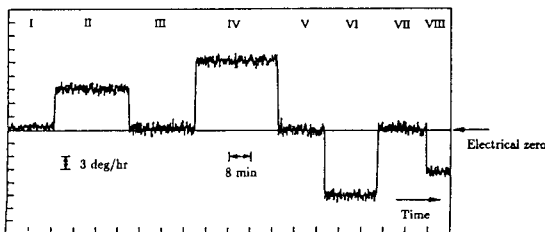


그림 5. 지구 자전 속도 측정과 rms 단기잡음.

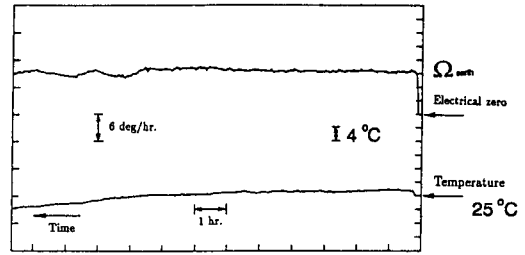


그림 6. 온도변화에 따른 장기 드리프트

으로 향했을 때 코일 축에 대한 회전성분이 없기 때문이다. 다음은 자이로스코프 축을 연직방향에 대하여 180° 바꿔 놓아 보았다. 즉 그림 5-VI와 그림 5-VIII이 그 결과이다. 앞의 결과 5-II와 5-IV를 +Ω_{earth}라고 한다면 그림 5-VI와 5-VIII은 -Ω_{earth}에 해당한다. 그림 5-VI는 남극방향으로 -15°/hr를 나타내고, 그림 5-VIII는 negative 연직방향으로 -9°/hr를 나타낸다.

측정한 지구자전속도를 기준으로하여 자이로스코프 신호에 실린 잡음 값을 산출하였다. Lock-in Amp.의 시정수 값을 1 sec로 하였을 때 rms 단기잡음 값은 약 0.6°/hr/√Hz이다. 그림 5-I의 신호에서 나타난 잡음 값은 약 0.4°/hr/√Hz이며, 이는 전기적인 잡음 값을 나타내 준다. 그림 6은 자이로스코프의 온도변화에 대한 장기 드리프트를 측정된 것이다. 이때 Lock-in Amp.의 시정수는 100 sec이었고 10시간 동안 측정된 것이다. 이 드리프트의 값은 최대 약 3°/hr 정도이다. 온도가 일정한 구간에서는 자이로스코프의 신호 역시 어느정도 안정함을 보이다가 온도가 변하는 구간에서는 자이로스코프의 신호의 드리프트도 커짐을 볼 수 있다. 온도변화의 영향을 심하게 받는 원인은 자이로스코프의 각 소자들을 연결함에 있어서 광섬유 편광축의 부정확한 정렬에 있다고 볼 수 있다. 편광축이 정확히 안맞으면 편광성분의 cross-coupling이 커져 위상오차가 커지므로 드리프트가 심해지는 원인이 된다.

V. 결 론

편광유지 광섬유를 사용하여 방향성 결합기와 위상변조기를 구성하였고, 편광기를 삽입하여 광섬유 일체식 자이로스코프를 제작하였다. 광원은 pigtail된 SLD를 이용하였으며, 이를 자이로스코프의 입력단과 연결하여 모든 광로가 불연속점 없이 광섬유를 통해서 진행되게 하였다. 자이로스코프의 각 소자들의 편광축 정렬의 불

완전성은 장기 드리프트에 큰 영향을 주며, 본 실험에서 측정된 장기드리프트의 값은 $3^\circ/\text{hr}$ 이었다. 단기잡음은 전체 광 출력이 적어서 전기적인 잡음과 구별이 잘 되지 않았으며, 이때 얻어진 값은 $0.6^\circ/\text{hr}/\sqrt{\text{Hz}}$ 이다. 이는 광섬유 접속 손실을 줄여 광 출력을 증가시키든가 정교한 electronics의 제작으로 상대적인 잡음값을 줄일 수 있다.

감사의 글

저자는 본 연구를 위하여 편광유지 광섬유를 이용한 방향성 결합기 제작에 많은 도움을 준 김영기씨께 감사를 드립니다. 본 연구는 국방과학연구소의 장기기초 연구(90-1-1)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] Tatsuya Kumagai, Hiroshi Kajioka, "Fiber Optic and Laser Sensors X", SPIE. **1795**, 74 (1992).
 [2] C. C. Culter, S. A. Newton, and H. J. Shaw, Opt. Lett., **5**, 488 (1980).
 [3] R. A. Bergh, H. C. Lefevre, and H. J. Shaw, Opt. Lett., **7**, 282 (1982).
 [4] P. F. Wysocki, M. J. F. Digonnet, and B. Y. Kim, IEEE. Photonics Tech. Lett., **2**, 178 (1990).
 [5] K. A. Fesler, M. J. F. Digonnet, B. Y. Kim, and H. J. Shaw, Opt. Lett., **15**, 1321 (1990).

[6] E. C. Kintner, Opt. Lett., **6**, 154 (1981).
 [7] W. K. Burns, R. P. Moeller, C. A. Villarruel, and M. Alrele, Opt. Lett., **8**, 540 (1983).
 [8] B. Y. Kim and H. J. Shaw, Opt. Lett., **9**, 378 (1984).
 [9] Moonsu Oh, Yongduk Kim and Manho Chung, Opt. Lett., **13**, 521 (1988).
 [10] D. Eberhard and E. Voges, Opt. Lett., **9**, 22 (1984).
 [11] H. C. Lefevre, in *Optical Fiber Sensors II*, B. Culshaw and J. Dakin, eds. (Artech, Dedham, Mass., 1989) Chap. 11.
 [12] B. Y. Kim and H. J. Shaw, Opt. Lett., **9**, 375 (1984).
 [13] Moonsu Oh, Yongduk Kim and Manho Chung, Opt. Lett., **13**, 410 (1988).
 [14] K. Toyama, K. A. Fesler, B. Y. Kim, and H. J. Shaw, Opt. Lett., **16**, 1207 (1991).
 [15] 정호진 "연마/용융 접합 방식에 의한 광섬유 방향성 결합기 제작 및 특성측정에 관한 연구" 한국과학기술원 석사학위논문 (1992).
 [16] R. A. Bergh, G. Kolter, and H. J. Shaw, Electron. Lett., **16**, 260 (1980).
 [17] I. P. Kaminow, IEEE. J. Quantum Electron., **QE-17**, 15 (1981).
 [18] M. Varnham, D. Payne, A. Barlow, and E. Tarbox, Opt. Lett., **9**, 306 (1984).

Characterization of an all fiber optic gyroscope constructed with polarization maintaining fiber

Min Yong Jeon, Ho Jin Jeong, Yeon Wan Koh and Byoung Yoon Kim
 Department of Physics Korea Advanced Institute of Science
 and Technology, Taejon 305-701, Korea

(Received: November 11, 1993)

A polarization maintaining fiber optic gyroscope was constructed having an optical loss of about 25 dB. Using the earth rotation rate as a reference, the long term stability of better than $3^\circ/\text{hr}$ and the rms short term noise of $0.6^\circ/\text{hr}/\sqrt{\text{Hz}}$ were obtained.