

## 단일모드 광섬유를 이용한 비편광 광섬유 자이로스코프의 잡음특성

진영준 · 박태용 · 박희갑\*

전북대학교 물리학과

Ⓣ 561-756 전북 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14번지

(2002년 10월 17일 받음, 2003년 3월 18일 수정본 받음)

일반 통신용 단일모드 광섬유를 회전 감지용 광섬유로 사용하는 비편광 광섬유 자이로스코프를 제작하고 특성을 측정하였다. 이 자이로스코프의 잡음특성을 계산하여 예측하고, 신호대 잡음비가 최대가 되는 적정 변조진폭 등의 최적 동작조건을 추출하였다. 자이로의 불규칙잡음계수를 여러 위상차 변조진폭에 대하여 측정한 결과, 위상차 변조진폭이 2.4 rad인 경우에  $0.7 \times 10^{-3} \text{ deg}/\sqrt{\text{hr}}$ 의 작은 불규칙잡음계수를 얻을 수 있었으며, 변조진폭에 따른 잡음특성의 경향이 계산에 의한 예측치와 거의 일치하였다.

주제어 : fiber optic gyroscope, optical fiber, optical fiber sensor.

### I. 서 론

광섬유 자이로스코프는 회전속도 측정을 위하여 Sagnac 효과를 이용하는 수동형 간섭계이다. Sagnac 효과의 크기는 회전속도와 간섭계 loop의 면적에 비례하는데, 이 효과 자체는 대단히 미세한 효과이나 긴 길이의 광섬유를 사용하여 유효면적이 매우 큰 loop를 구성할 수 있으므로 결과적으로 매우 느린 회전속도도 감지가 가능하다.<sup>[1]</sup> 대부분의 광섬유 자이로스코프에서 간섭계 loop를 구성하는 광섬유 코일로서 편광유지 광섬유를 사용하고 있다. 편광유지 광섬유를 사용하면 편광 모드간 결합에 의해 발생하는 불필요한 간섭을 막아 자이로스코프의 오차를 크게 줄일 수 있다.<sup>[2]</sup> 또한 온도 등 외부환경의 변화에도 불구하고 진행광의 편광상태가 변화하지 않으므로 신호소멸(signal fading)이 발생하지 않는다.<sup>[3]</sup> 일반 단일모드 광섬유를 사용하는 경우에 이러한 편광변화에 의한 신호소멸을 막으려면 loop내에 편광조절기를 두고 조절해야 하는데 이는 실용성 면에서 문제가 있다. 따라서 loop 광섬유로서 편광유지 광섬유를 사용하는 것이 여러 기술적 문제를 해결할 수 있는 최선의 방법으로 알려져 왔다.

그러나 편광유지 광섬유는 상당한 고가로서 광섬유 자이로스코프 제작비용의 상당부분을 차지한다. 만일 편광유지 광섬유 대신 값싼 일반 통신용 단일모드 광섬유를 활용할 수 있다면 경제성 면에서 매우 바람직할 것으로 생각된다. 그런데 근래에 일반 단일 모드 광섬유와 depolarizer를 사용하여 광섬유 자이로스코프를 구성하는 비편광 자이로스코프 방식이 제안되었다.<sup>[4]</sup> 특히 통신용 단일모드 광섬유는 편광유지 광섬유에 비하여 무척 저렴하여 긴 길이의 loop를 구성하는데 비용상의 문제가 없다. Loop의 길이에 비례하여 회전속도의 측정감도가 향상되므로 저비용으로 고감도의 자이로스코프를 구성할 수

있는 장점이 있어서 가격대비 성능면에서 상당한 효과가 기대된다. 그러나 비편광 자이로스코프 방식은 아직 안정성과 오차, 잡음특성 면에서 충분히 검증되지 않은 단계로서 이에 관한 연구가 이루어지고 있다.<sup>[4]</sup>

본 연구에서는 비편광 자이로스코프의 성능수준과 안정성 등을 검증하기 위하여 일반 통신용 단일모드 광섬유를 자이로코일로 사용하고 광섬유 depolarizer를 코일 내에 삽입하는 방식으로 비편광 자이로스코프를 제작하고 그 성능을 측정, 평가하였다. 특히 이 자이로스코프를 사인파 변조하여 개회로 방식으로 동작시키는 경우에 잡음특성을 계산하여 예측하고, 신호대 잡음비가 최대가 되는 최적 위상차 변조진폭 등 적정 동작조건을 도출하였다. 그리고, 자이로스코프의 불규칙잡음계수 등 주요특성에 대하여 계산치와 실험치를 비교하고 분석하였다.

### II. 비편광 자이로스코프와 depolarizer

서론에서 언급한 바와 같이, 비편광 자이로스코프는 Sagnac loop를 서로 반대방향으로 돈 두 빛이 중첩될 때 편광상태가 서로 달라서 간섭신호가 소멸되는 것을 막기 위하여, loop 내에 depolarizer를 두어 언제나 비편광상태의 두 빛이 중첩/간섭하도록 하는 것이다. 그림 1은 비편광 자이로스코프의 개념도이다. 기본구성과 동작원리는 기존의 자이로스코프와 거의 같으나 Sagnac loop의 입구에 적절한 depolarizer를 두고 loop 광섬유로서 편광유지 광섬유 대신에 긴 길이의 저가형 일반 단일모드 광섬유를 사용한다. Loop를 양방향으로 돈 두 빛이 중첩될 때 항상 비편광상태로 만나게 되므로, loop 광섬유로서 편광유지 광섬유가 아닌 일반 단일모드 광섬유를 사용하더라도 신호소멸 없이 일정한 크기의 간섭신호출력을 얻을 수 있다. 다만, Sagnac loop의 출력단에서 편광기를 거치므로 광검출기에서 검출되는 신호광 power는 편광유지 광섬유 자이로스코프의 경우에 비하여 절반(-3 dB) 이하로 감소한다. 만일

\*E-mail: hgpark@moak.chonbuk.ac.kr

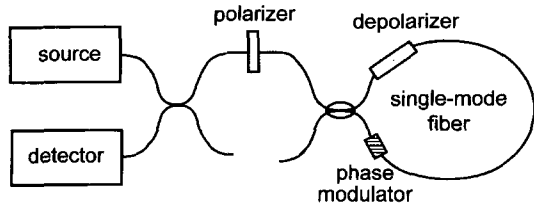


그림 1. 비편광 자이로스코프의 개념도.

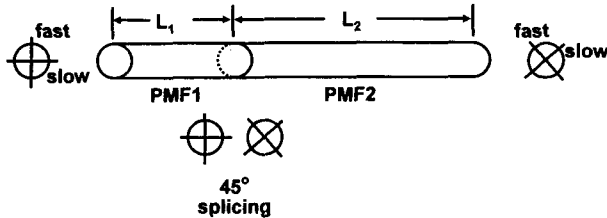


그림 2. 두 부분의 복굴절성 광섬유로 이루어진 광섬유 Lyot depolarizer(PMF: polarization-maintaining fiber).

depolarizer를 통과한 빛의 편광도가 0이 아니고 약간의 편광 성분이 존재하는 경우에는 이 편광성분의 크기에 해당하는 정도의 간섭신호 흔들림이 발생할 뿐만 아니라 자이로스코프의 출력에 오차 성분이 추가된다.<sup>14)</sup>

이 논문의 연구에서 사용한 depolarizer는 두가닥의 고 복굴절성 광섬유로 이루어진 일종의 Lyot depolarizer이다.<sup>16)</sup> Depolarizer를 이루는 두 복굴절성 광섬유는 그림 2와 같이 고유편광축이 서로 45도를 이루도록 접속한 것으로서, 복굴절성 광섬유의 길이는 이 광섬유 내에서 생기는 두 편광성분간의 walk-off가 광원의 가간섭거리(coherence length)에 비해 충분히 크도록 정한다. Depolarizer를 이루는 복굴절성 광섬유의 두부분 중 첫째 부분(PMF1)에 임의 편광상태의 빛이 입사하면 편광모드간 분산으로 인해 두 편광성분간에 walk-off가 발생한다. 한편, 둘째 광섬유 부분(PMF2)의 편광축은 PMF1의 편광축과 45도를 이루므로 PMF1에서 나온 각각의 편광성분이 PMF2에서 같은 크기로 재분해 되는데, 결과적으로 PMF2를 통과해 나온 빛의 두 편광성분의 세기는 입사 편광상태와 관계없이 서로 같게 된다. 즉, 두 편광성분이 세기가 같고 위상상관성이 없는 depolarization 상태가 얻어진다.

### III. 자이로스코프의 잡음특성 계산

매우 작은 회전속도의 경우에 대하여 자이로스코프의 잡음 특성을 계산하고, 이로부터 신호대 잡음비(SNR)를 구하여 SNR이 최대가 되는 동작조건을 구하고자 한다. 그림 1과 같은 자이로스코프의 구성에서 Sagnac loop로의 입력광 power를  $P_0$ 라 하면 loop의 신호광 출력  $P_{out}$ 은

$$P_{out} = \frac{1}{2} \gamma P_0 (1 + \cos \Delta\phi) \quad (1)$$

와 같이 표현된다. 여기서  $\Delta\phi$ 는 loop를 서로 반대방향으로 돈 두 빛간의 위상차이고  $\gamma$ 는 loop의 손실을 감안한 투과율이

다. 대부분의 자이로스코프에서 미소회전에 대한 출력감도 확보를 위해 dynamic biasing을 하는데, 여기서는 loop의 입구 또는 loop 코일의 한쪽 끝에서 sine와 위상변조하는 경우를 생각한다. 회전에 의한 Sagnac 위상차를  $\Delta\phi_R$ 이라 하고, loop 내 위상변조에 의해 양방향 두 빛간의 위상차가 진폭  $\phi$ , 주파수  $\omega$ 로 변조되는 경우에, (1)식은 다음과 같이 전개된다.<sup>17)</sup>

$$P_{out}(t) = \frac{1}{2} \gamma P_0 [1 + \cos(\Delta\phi_R + \phi \sin \omega t)]$$

$$= \frac{1}{2} \gamma P_0 \left\{ 1 + \left[ J_0(\phi) + 2 \sum_{n=0}^{\infty} J_{2n}(\phi) \cos 2n\omega t \right] \cos \Delta\phi_R - \left[ 2 \sum_{n=0}^{\infty} J_{2n-1}(\phi) \sin(2n-1)\omega t \right] \sin \Delta\phi_R \right\} \quad (2)$$

위의 식에서  $J_n$ 는 차수  $n$ 의 1종 Bessel 함수를 나타낸다. 자이로스코프가 거의 정지상태에 있는 경우( $\Delta\phi_R \approx 0$ ), 위식으로부터  $P_{out}$ 의 dc 성분과 변조주파수( $\omega$ ) 성분의 크기는 각각 다음과 같이 근사시킬 수 있다.

$$P_{out}^{dc} \approx \frac{1}{2} \gamma P_0 \{1 + J_0(\phi)\} \quad (3)$$

$$P_{out}^{\omega} \approx \gamma P_0 J_1(\phi) \Delta\phi_R \quad (4)$$

자이로스코프의 신호대 잡음비를 계산하기 위하여 우선 광검출기에서 광신호 검출(광/전 변환)후의 출력신호 power를 구해보자. 자이로스코프 광검출기에서 신호에 대한 광검출기 전류  $i_s$ (rms치)는 (4)식으로부터

$$i_s = \frac{\gamma P_0 J_1(\phi) \Delta\phi_R D}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

로 표현할 수 있다. 위식에서  $D$ 는 광검출기의 감도를 나타낸다. 한편, 광검출기에 검출기의 평균전류  $\langle I \rangle$ 는 (3)식으로 주어지는 출력 신호광 power의 dc 성분의 시간평균치  $\langle P_{out}^{dc} \rangle$ 에 광검출기의 감도  $D$ 를 곱한 양으로서  $\langle I \rangle = \langle P_{out}^{dc} \rangle D$ 로 표현된다. 이러한 관계를 이용하여 (3), (4), (5)식에서  $P_0$ 를 소거하면 광검출기 출력신호 power(electrical)  $S$ 는 광검출기의 부하 저항을  $R$ 이라 할 때 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$S = \frac{2J_1^2(\phi)}{\{1 + J_0(\phi)\}^2} \langle I \rangle^2 \Delta\phi_R^2 R \quad (6)$$

이번에는 잡음 power를 계산한다. 자이로스코프의 출력 광신호 검출과정에서 발생하는 산탄잡음(shot noise)  $N_s$ 와 과잉잡음(excess noise)  $N_e$ 는 각각 다음과 같은 식으로 표현된다.<sup>18)</sup>

$$N_s = 2e \langle I \rangle B R \quad (7)$$

$$N_e = \langle I \rangle^2 B R / \Delta v \quad (8)$$

여기서,  $B$ 는 광검출기 회로의 대역폭(electrical bandwidth)을 나타내며,  $e$ 는 전자 전하량, 그리고,  $\Delta v$ 는 광원의 주파수선평

을 의미한다. 따라서 광신호의 검출과정에서 발생하는 전체 잡음 power는

$$V = 2e\langle I \rangle BR + \langle I \rangle^2 BR / \Delta v \quad (9)$$

이 된다. 위의 (6), (9)식의 결과를 종합하면, 신호 power대 잡음 power의 비, 즉 SNR은

$$S/N = \frac{J_1(\phi)^2 \cdot \Delta\phi_R^2}{\left(\frac{e}{\langle I \rangle} + \frac{1}{2\Delta v}\right) \{1 + J_0(\phi)\}^2 B} \quad (10)$$

로 나타낼 수 있다.

한편, 자이로스코프 출력 잡음의 크기를 자이로스코프에서 측정가능한 최저 회전속도  $\Omega_{min}$ 으로 나타낼 수 있다. 이는 위의 (10)식에서  $SNR=1$ 이 되는 경우의  $\Delta\phi_R$ 에 해당하며, scale factor 관련식으로부터  $\Omega_{min}$ 을 구할 수 있다. 그러나 이 값은 측정대역폭에 따라 달라질 수 있는 값이므로, 검출회로의 대역폭에 무관하게 정의된 불규칙잡음계수(RWC: random walk coefficient)를 이용하면 회전속도의 측정감도와 관련한 자이로스코프의 성능을 보편적으로 평가할 수 있다. 불규칙 잡음계수와 측정가능한 최저회전속도와의 관계는  $RWC = \Omega_{min} / \sqrt{B}$ 로 주어지며, (10)식을 이용하면 불규칙잡음계수는

$$RWC = \frac{\lambda c}{4\pi RL} \left( \frac{1 + J_0(\phi)}{J_1(\phi)} \right) \left( \frac{e}{\langle I \rangle} + \frac{\lambda^2}{2c\Delta\lambda} \right)^{1/2} \quad (11)$$

로 계산된다. 위의 식에서 광원의 주파수선폭  $\Delta\nu$ 를 파장선폭  $\Delta\lambda$ 로 환산하여 표현하였다.

그림 3은 위상차 변조진폭( $\phi$ )에 따라 출력신호와 잡음의 세기 그리고 그 비율인 SNR을 계산한 결과이다. 그림 3에서 회전수에 의한 Sagnac 위상차는  $\Delta\phi_R = 1 \mu\text{rad}$ 로 하였으며, 광검출기 평균전류  $\langle I \rangle = 3 \mu\text{A}$ , 광검출기의 부하저항  $R = 1 \text{ k}\Omega$ , 그리고 대역폭  $B = 1.25 \text{ Hz}$ 인 경우에 대해 계산하였다. 신호의 크기는 (5)식에서 볼 수 있는 바와 같이  $J_1(\phi)$ 의 값이 최대인  $\phi = 1.8 \text{ rad}$ 에서 최대가 되지만, 이 변조진폭에서는 잡음도 상당히 크기 때문에 SNR은 이보다 큰 변조진폭인 2.4 rad 부근에서 최대가 된다. 그리고 이 경우에 변조진폭이 1.9~2.8 rad의

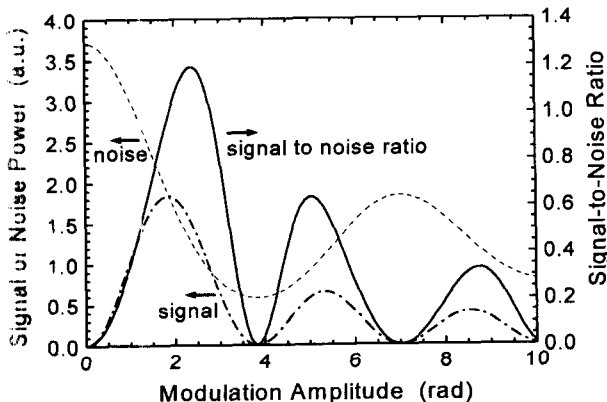


그림 3. 위상차 변조진폭에 따른 자이로스코프 출력의 SNR 계산 결과.

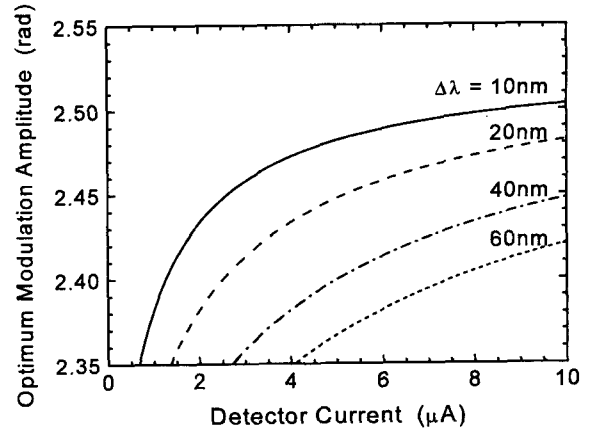


그림 4. SNR이 최대가 되는 최적 위상차 변조진폭 ( $\Delta\lambda$ 는 광원의 파장선폭).

범위에서  $SNR > 1$ 이 되는데, 이는 이 변조진폭의 범위내에서 동작시킬 때  $1 \mu\text{rad}$ 의 Sagnac 위상차에 해당하는 미세한 회전속도를 감지할 수 있음을 의미한다.

그림 4는 SNR이 최대가 되는 최적 위상차변조진폭을 평균 검출기 전류  $\langle I \rangle$ 의 함수로서 여러 가지의 광원 파장선폭  $\Delta\lambda$ 에 대해 계산한 것이다. 그림 4에서 보면, SNR은 광검출기 평균 전류(검출광 power에 비례)에 따라 달라지며, 또한 SNR이 최대가 되는 최적 변조진폭도 달라질 수 있음을 알 수 있다. 평균 광검출전류가 증가함에 따라 최적 변조진폭도 다소 증가하는데 충분히 큰 검출전류(즉, 충분히 큰 검출광 power)에 대해서는 증가율이 둔화되고 2.4~2.5 rad의 범위가 적정변조진폭임을 알 수 있다.

#### IV. 자이로스코프의 제작과 특성측정

본 논문에서 제작한 비편광 자이로스코프의 구성을 그림 5에 나타내었다. 광섬유 Sagnac loop는 1.6 km 길이의 일반 통신용 단일모드 광섬유(mode field 직경 :  $10 \mu\text{m}$ , 클래딩 직경:  $125 \mu\text{m}$ )로 구성하였다. Sagnac loop의 입구에 위상변조기와 2:1의 광결합기의 역할을 하는  $\text{LiNbO}_3$  집적광학회로(gyro chip)를 두었다.  $\text{LiNbO}_3$  gyro chip내의 위상변조기는 push-pull type이며,  $\text{LiNbO}_3$  광도파로 내에서 한 편광성분이 소멸되기 때문에 이 gyro chip은 실제로 편광기의 역할도 겸하게 된다.  $\text{LiNbO}_3$  gyro chip의 광섬유 pigtail은 1.8 m 길이의 PMF인데,

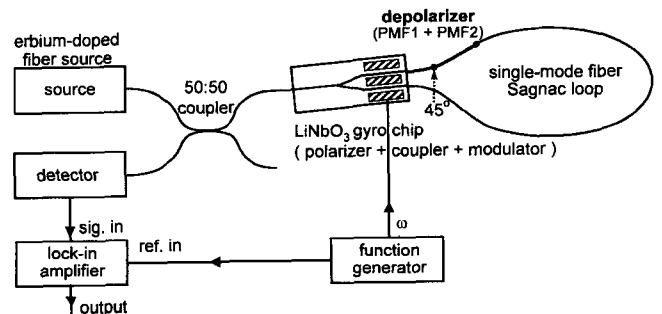


그림 5. 실험장치 구성도.

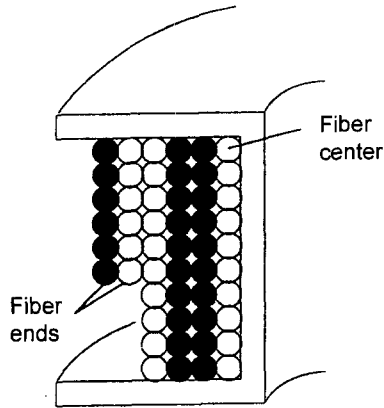


그림 6. 광섬유 코일의 winding 방식 : quadrupolar winding.

이 PMF pigtail이 그림 2의 depolarizer 구성에서 PMF1의 역할을 하도록 하였다.

Sagnac loop에 사용한 spool의 직경과 높이는 각각 16 cm와 5 cm였으며, 광섬유 코일을 quadrupolar 방식으로 spool에 감았다. Quadrupolar winding 방식은 loop의 중심위치에서부터 spool에 감아나가되 그림 6과 같이 4개층이 한 단위가 되도록 양쪽을 교대로 감아나가는 방식이다. 이 방식으로 감으면 Sagnac loop상의 임의의 두 대칭점이 거의 근접한 층에 위치하게 된다. 따라서 어느 한 부분의 온도가 변화할 때 loop의 대칭위치의 온도도 함께 변하므로 온도효과의 상당부분을 상쇄시킬 수 있다.<sup>[6]</sup>

자이로스코프의 광원으로서 Er-첨가 광섬유 (EDF: Er-doped fiber) 광원을 사용하였다. Er-이온의 농도가 200 wt ppm이고 길이가 27 m인 EDF를 사용하였으며 single-pass backward 방식<sup>[6]</sup>으로 광원을 구성하였다. 광원 출력광 스펙트럼의 평균 파장은 1540.4 nm이며, 파장선평은 참고문헌 [10]의 방식으로 계산하였을 때 35.5 nm였다. 이 EDF 광원의 최대 출력은 10 mW 이상이지만 자이로스코프의 광검출기가 포화됨을 고려하여 광감쇄기로 적절히 약화시켜 사용하였다. 광검출기는 InGaAs PIN/FET로서 대역폭은 40 MHz였으며, 광검출기의 평균전류는 대략 3  $\mu$ A였다. 제작된 자이로스코프에서 광원으로부터 광검출기까지의 총손실은 24 dB로서 일반 편광유지 광섬유 자이로스코프에 비하여 다소 큰데, 이는 depolarizer를 거쳐 비편광된 빛이 다시 편광기를 거치면서 추가 광손실이 생겼기 때문이다.

자이로스코프 출력의 광스펙트럼을 측정하여 광원의 스펙트럼과 함께 그림 7에 나타내었다. 자이로 출력광 스펙트럼의 포락선 형태는 광원의 스펙트럼과 같지만 세부 스펙트럼은 특이한 모양을 나타내고 있는데, 이는 depolarizer를 사용하기 때문에 나타나는 현상이다. 넓은 선평을 가진 빛이 depolarizer를 진행할 때 파장마다 편광상태의 변화율이 달라서 depolarizer를 통과한 후의 빛은 파장성분마다 다른 편광상태를 가지게 되는데, 이 빛이 다시 편광기를 지나면서 한 편광성분만이 통과하므로 자이로 출력의 스펙트럼이 그림 7과 같은 빗살모양으로 나타난다.

가역적으로 구성된 이상적인 자이로스코프의 경우에 일정한 회전속도에서는 자이로 출력이 변하지 않는다. 그러나, 실제로

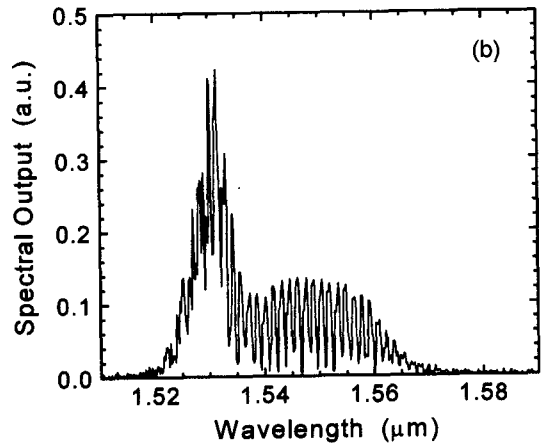
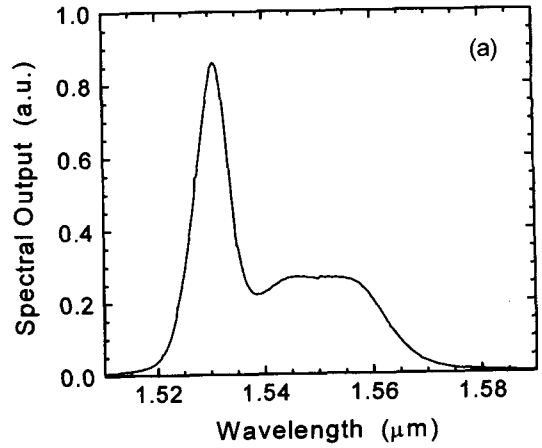


그림 7. 광원과 자이로 검출광 스펙트럼 : (a) 광원 출력광 스펙트럼, (b) 자이로 검출광 스펙트럼.

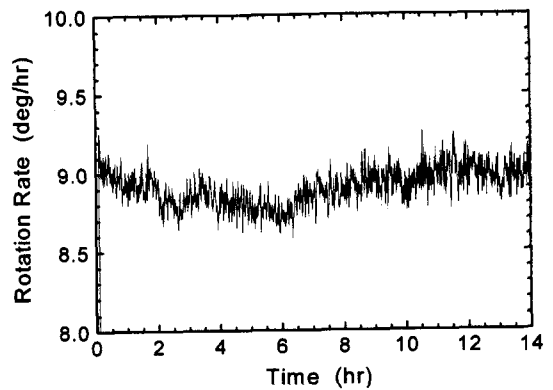


그림 8. 자이로 출력의 drift.

제작된 자이로스코프에서는 의도하지 않은 여러 가지 비가역적인 효과에 의해서 동일한 회전속도에서도 자이로 출력의 drift가 발생할 수 있다.<sup>[6]</sup> 본 논문에서 제작된 자이로스코프의 drift를 자이로가 실험실 좌표계에서 정지한 상태에서, 즉, 자이로가 지구자전의 자이로코일축 방향 성분인 8.9 deg/hr로 회전하는 상태에서 측정하여 그림 8에 나타내었다. 이때 lock-in amplifier의 시간상수는 1 sec였는데, 이 시간상수에 해당하는 대역폭은 0.25 Hz이다. 실온에서 14시간동안 동작시킨 결과 drift

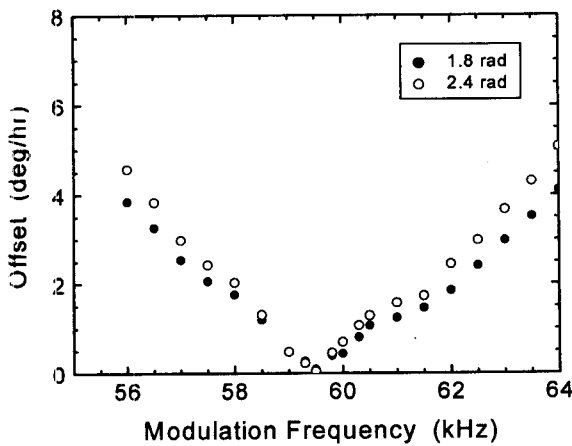


그림 9. 변조주파수에 따른 자이로의 offset.

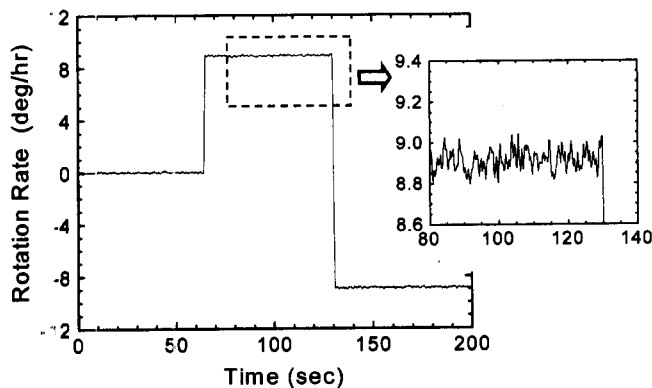


그림 10. 회전에 따른 자이로 출력.

는  $0.3 \text{ deg/hr}$  이하로 나타났다.

한편, 위상차 변조진폭이 1.8 rad와 2.4 rad인 경우에 대해서 변조주파수를 변화시키면서 자이로 출력의 offset을 측정하여 그 결과를 그림 9에 나타내었다. 그림 9에서 두가지 경우 모두 같은 59.5 kHz의 변조주파수에서 자이로의 offset이 최소가 되었다. 자이로의 offset은 drift와 마찬가지로 자이로스코프에서 비가역적 효과에 의해서 발생하는 특성으로 그 크기가 변하지 않고 일정한 경우에는 신호처리 과정에서 크게 문제되지 않는다. 그러나, offset은 일반적으로 흘러다니거나 주위환경에 영향을 많이 받으므로 최대한 억제시킬 필요가 있다. 따라서, 본 논문에서는 offset이 최소가 되는 변조주파수인 59.5 kHz에 대해서 자이로의 잡음특성을 측정하였다.

그림 10은 위상차 변조진폭이 2.4 rad인 경우에  $0 \text{ deg/hr}$ 와  $\pm 8.9 \text{ deg/hr}$ 의 회전속도에 대해 자이로 출력신호의 변조주파수 성분(즉, 자이로스코프의 최종출력)을 lock-in amplifier로 측정된 결과이다. 이때의 Lock-in amplifier의 시간상수는 0.2 sec 대역폭은 1.25 Hz였다. 자이로스코프의 회전속도는 회전테이블(rate table)을 이용하여 지구자전속도까지 보상하여 정밀하게 조절하였다. 그림 10에서 회전속도 측정의 잡음은  $0.05 \text{ deg/hr}$ (rms 값)로 나타났다. 이 회전속도 잡음의 크기는 측정 가능한 최저 회전속도  $\Omega_{\min}$ 에 해당하는데, 이는 앞에서 언급한 바와 같이 lock-in amplifier의 시간상수를 포함하여 측정계의 대

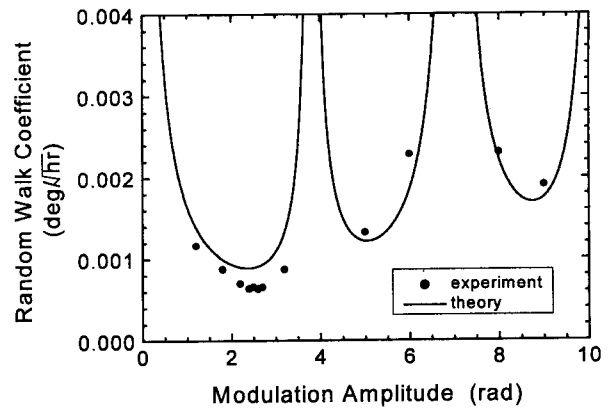


그림 11. 위상차 변조진폭에 따른 불규칙잡음계수.

역폭에 따라서 달라질 수 있는 값이다. 따라서, 이 회전속도로 표시된 잡음을 불규칙잡음계수로 환산하면  $0.7 \times 10^{-3} \text{ deg}/\sqrt{\text{hr}}$ 가 되는데 이 값은 측정계의 대역폭과 무관한 값이다.

불규칙잡음계수는 자이로스코프의 잡음특성을 대표하는 값이므로, 회전속도가 동일한 경우, 즉, 자이로의 신호광의 크기가 같을 경우에는 SNR(신호대 잡음비)은 불규칙잡음계수의 크기에 반비례하게 된다. 따라서, 여러 위상차 변조진폭에 따른 불규칙잡음계수를 측정함으로써 자이로의 SNR이 최대가 되는 최적 위상차 변조진폭을 찾을 수 있다. 그림 10과 동일한 조건하에서 위상차 변조진폭을 달리하면서 자이로스코프의 최종출력을 lock-in amplifier로 측정하고 이로부터 불규칙잡음계수를 구하였다. 그 결과를 (11)식에 의한 계산결과와 함께 그림 11에 나타내었다. 불규칙잡음계수는 2.4 rad 부근에서 최소가 되었는데, 이는 그림 3에서 계산된 SNR이 최대가 되는 조건과 동일한 조건이다. 또한, 위상차 변조진폭에 대한 불규칙잡음계수 변화의 경향이 (11)식에 의한 계산결과와 비슷하였다. 위상차 변조진폭이 1.8~3.2 rad 사이에서  $1.0 \times 10^{-3} \text{ deg}/\sqrt{\text{hr}}$  이하의 작은 불규칙잡음계수를 얻을 수 있었다. 한편, (11)식은 자이로의 잡음 중에서 신호처리부의 전기 회로잡음은 무시하고, 광검출시에 발생하는 산탄잡음과 포인팅잡음에 의해서 주도되는 경우를 나타낸 식이다. 만일 신호처리부의 전기 회로잡음을 포함하는 경우에 SNR이 최대가 되는 최적 위상차 변조진폭은 2.4 rad 부근에서 자이로 출력 신호가 큰 1.8 rad 방향으로 다소 이동될 것으로 예상된다. 그런데 실제 실험결과 2.4~2.6 rad의 변조진폭에서 잡음계수가 최소가 되는 것으로 나타났다. 따라서, 이로부터 이 자이로스코프의 잡음특성은 광검출시의 잡음에 의해 제한되고 신호처리부의 전기회로 잡음은 무시될 수 있음을 알 수 있다.

## VI. 결 론

통신용 단일모드 광섬유를 자이로 코일로 사용하는 비편광 자이로스코프를 제작하고, 이 자이로스코프의 잡음특성이 최적화되는 동작조건을 추출하고 성능을 평가하였다. 또한, 자이로의 SNR(신호대 잡음비)과 불규칙잡음계수를 이론적으로 계산하였다. 자이로의 출력신호는 위상차 변조진폭이 1.8 rad에

서 가장 크지만, 이 변조진폭에서는 잡음도 상당히 크기 때문에 SNR은 다른 변조진폭인 2.4 rad 부근에서 최대가 되었다. 자이로스코프의 drift를 상온에서 14시간에 걸쳐서 측정한 결과, 0.3 deg/hr로 비교적 안정된 값을 얻을 수 있었다. 그리고, 변조주파수 59.5 kHz에서 자이로 출력의 offset이 최소가 되었다. 자이로스코프 출력의 불규칙잡음계수는 위상차 변조진폭이 2.4 rad 부근에서 최소가 되었으며, 그 크기는  $0.7 \times 10^{-3} \text{ deg}/\sqrt{\text{hr}}$  였다. 여러 변조진폭에 대한 불규칙잡음계수의 측정치를 이론에 의한 계산치와 비교하여 상당히 일치하는 결과를 얻었다. 이론에 의한 계산치가 신호처리부의 전기회로 잡음을 무시한 것임을 감안할 때 이 제작된 자이로스코프의 잡음특성은 주로 광검출시 발생하는 산탄잡음과 과잉잡음에 의해 제한되는 상태임을 알 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구의 실험에 많은 도움을 주신 한국해양대학교의 홍창희 교수님, 김정호씨와 KAIST의 김병운 교수님, 여영배씨께 감사를 드립니다. 본 연구는 한국과학기술원 전자광학특화연구센터와 한국과학재단(과제번호 1999-2-303-005-2)의 지원으로 이루어졌습니다.

### 참고문헌

- [1] H. J. Arditty and H. C. Lefevre, "Sagnac effect in fiber gyroscopes," *Opt. Lett.*, vol. 6, no. 8, pp. 401-403, 1981.
- [2] W. K. Burns and R. P. Moeller, "Polarizer requirements for fiber gyroscopes with high-birefringence fiber and broadband sources," *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-2, no. 4, pp. 430-435, 1984.
- [3] W. K. Burns, R. P. Moeller, C. A. Villarruel, and M. Abebe, "Fiber-optic gyroscope with polarization-holding fiber," *Opt. Lett.*, vol. 8, no. 10, pp. 540-542, 1983.
- [4] B. Szafraniec and J. Blake, "Polarization modulation errors in all-fiber depolarized gyroscopes," *J. Lightwave Technol.*, vol. 12, no. 9, pp. 1679-1684, 1994.
- [5] J. Blake, B. Szafraniec, and J. Feth, "Partially polarized fiber-optic gyro," *Opt. Lett.*, vol. 21, no. 15, pp. 1192-1194, 1996.
- [6] H. C. Lefevre, *The Fiber-Optic Gyroscope* (Artech House, Boston, 1992).
- [7] H. G. Park, K. A. Lim, Y.-J. Chin, and B. Y. Kim, "Feedback effects in erbium-doped fiber amplifier/source for open-loop fiber-optic gyroscope," *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, no. 8, pp. 1587-1593, 1997.
- [8] P. R. Morkel, R. I. Laming, and D. N. Payne, "Noise characteristics of high-power doped-fiber superluminescent sources," *Electron. Lett.*, vol. 26, no. 2, pp. 96-98, 1990.
- [9] 임경아, 진영준, 박희갑, "Gyroscope용 광대역폭 Erbium 첨가 광섬유 광원의 구성과 특성 측정," 한국광학회지, 제 8권 4호, pp. 320-326, 1997.
- [10] D. C. Hall, W. K. Burns, and R. P. Moeller, "High-stability  $\text{Er}^{3+}$ -doped superfluorescent fiber sources," *J. Lightwave Technol.*, vol. 13, no. 7, pp. 1452-1460, 1995.

## Noise characteristics of a depolarized fiber-optic gyroscope incorporating single-mode fiber

Young-Jun Jin, Tae Yong Park and Hee Gap Park<sup>†</sup>

Department of Physics, Chonbuk National University, Chonju 561-756, KOREA

(Received October 17, 2002, Revised manuscript March 18, 2003)

We have constructed and characterized a depolarized fiber-optic gyroscope that uses a length of single-mode fiber as a sensing loop fiber. We have also calculated the noise characteristics of the gyroscope and have found an optimum phase modulation depth that gives the highest signal-to-noise ratio in the gyroscope. The random walk coefficient as small as  $0.7 \times 10^{-3} \text{ deg}/\sqrt{\text{hr}}$  was obtained at the modulation depth of around 2.4 rad. The random walk coefficients measured at various modulation depths were found to be in reasonable agreement with the calculation.

OCIS Code : 060.237.