

단일모드 광섬유와 편광소멸기를 이용한 저가형 광섬유 자이로스코프에 관한 연구

A Study on the Low-Cost Fiber-Optic Gyroscope Using the Single Mode Fiber and Depolarizer

장남영*, 함형재*, 송희영*, 최평석*, 은재정*

Nam Young Jang, Hyung Jae Ham, Hui Young Song, Pyung Suk Chio, Jae Jeong Eun

요약

본 논문에서는 저가의 광통신용 단일모드 광섬유와 편광소멸기를 이용한 비편광 광섬유 자이로스코프(D-FOG)를 설계/제작하여, 그 성능을 평가하였다. D-FOG의 위상오차를 줄이기 위해 사용광원의 전류 및 온도 안정화 회로를 제작하여 그 성능을 분석하였다. 제작된 전류 및 온도 안정화 회로의 전류 안정도는 $200\mu A$ 미만, 온도 안정도는 $0.0098^{\circ}C$ 로 양호한 성능을 보였다. 또한, 본 논문에서 제작된 D-FOG의 회전 각속도 측정 범위는 $\pm 50^{\circ}/s$, Scale factor error는 2.8881%로 양호한 선형성을 보였으며, zero bias drift는 $19.49^{\circ}/h$ 의 bias 안정도를 보였다. 이는 고가인 고복굴절 편광 유지 광섬유를 이용해 제작된 기존의 FOG에 비해 높은 가격효율성을 갖는 저가의 FOG 제작의 가능성을 보여준다.

Abstract

In this paper, we carried out the performance evaluation of depolarized fiber optic gyroscope(D-FOG) that was designed and fabricated with the low-cost optical communication single mode fiber and depolarizer. In order to reduce the phase error of D-FOG, the circuit of stabilized current and temperature of the light source was made and the performance was analyzed. The current and the temperature stability of the fabricated stabilization circuit were less than $200\mu A$ and $0.0098^{\circ}C$, respectively. Also, the D-FOG's experimental result showed that the value of the dynamic range of rotated rate, the scale factor error with a good linearity, and the zero bias drift were $\pm 50^{\circ}/s$, 2.8881%, and $19.49^{\circ}/h$, respectively. The results indicated that a low-cost FOG was able to fabricate which was more cost effective than conventional FOG with a high-cost high-birefringent polarization maintaining fiber.

Keywords : Sagnac Effect, Gyroscope, Fiber-Optic Gyroscope(FOG), Depolarizer, Phase Modulation, PZT, Single Mode Fiber, Depolarized Fiber-Optic Gyroscope(D-FOG)

I. 서론

1913년, 빛을 이용해 회전률을 측정할 수 있음이 Sagnac에 의해 밝혀진 이후, 오늘날까지 Sagnac 효과를 이용해 회전 각속도를 측정하는 광섬유 자이로스코프에 대한 관심은 지속되고 있다 [1-2]. 일반적으로, 회전 각속도를 측정하는 방법에는 기계식 방식과 광학식 방식으로 나눌 수 있으며, 기계식 방식의 자이로스코프

는 김벌(Gimbel)형과 코리올리 가속도의 원리를 이용한 진동식 자이로스코프로 구분할 수 있다. 여기서 김벌형은 지구중심을 향하는 고속의 김벌을 이용해 회전체의 각 운동량 변화를 측정하는 방식이다. 또한, 진동식 자이로스코프는 진동하는 물체로부터 발생하는 파형의 위상차를 측정해 각속도를 측정하는 원리로 중급 자이로스코프에 적용되고 있다. 그러나 기계식 자이로스코프는 기존의 축적된 기술력을 바탕으로 높은 정밀도를 갖는 것이 장점으로 작용하지만, 높은 소비전력, 무게, 복잡한 구조로 인한 제작상의 어려움, 유지보수의 난점 그리고 초기 기동시간이 많이 걸린다는 단점을 가지고 있다.

이에 비해, 광섬유를 이용한 광학식 방식의 자이로스코프는 간섭에 의한 위상차를 이용해 각속도를 측정하는 방식으로 두 개의 빛이 일정한 반경을 갖는 센싱 루프를 서로 반대방향으로 진행할

* 창원대학교 전자공학과

투고 : 2008. 6. 28 수정완료 : 2008. 7. 21

게재확정일자 : 2008. 7. 25

※ 본 논문은 2007년 창원대학교 연구비지원과 교육과학기술부에 지방대학혁신역량강화 사업 및 교육과학기술부와 지식경제부의 출연금 및 보조금으로 수행한 산학협력 중심대학 육성사업에 의하여 연구되었습니다.

때, 임의의 각속도 변화에 따른 두 빛의 위상차가 발생하는 Sagnac 효과를 이용한다[3]. 이와 같은 광섬유 자이로스코프(Fiber-Optic Gyroscope : FOG)의 장점은 기계식에 비해 구조가 단순하고, 회전부가 필요 없기 때문에 높은 신뢰도를 가지며, 낮은 소비전력 및 수명이 길며, 제작 단가가 상대적으로 낮아 기계식 자이로스코프를 대체할 대안으로 각광받고 있다. 이러한 FOG는 선박, 자동차, 비행기, 유도무기 등에 탑재되어 운항체의 자세, 위치, 속도 등 항법에 필요한 관성 항법 시스템(Inertial Navigation System : INS)의 주요한 센서로 사용되고 있으며, 또한 INS외에도 캠코더, 디지털 카메라와 같은 휴대용 영상기기의 자세보정, 안테나 플랫폼의 안정화 및 로봇이나 무인자동화기기의 자세 제어, 터널이나 관로 공사의 위치 검출과 제어, 무인지계차 등의 무인 유도 차량(automatic guided vehicles : AGV) 등 다양한 응용분야에 적용되고 있다[4-5]. 특히 최근에는 GPS와 연동된 차량항법시스템(CNS: Car Navigation System)에 활발한 응용이 이루어지고 있다.

그러나 FOG의 단점은 다양한 광학적 현상에 의해 위상오차를 유발하는 문제점이 있는데, 예를 들면 사용하는 광원의 가간섭 길이가 길수록 후방산란이나 Kerr 효과로 인한 위상오차[6-7]를 초래하고, 센싱 광섬유로 일반 단일모드 광섬유를 사용할 경우, 주위의 온도변화 및 진동과 같은 환경변화로 인해 광섬유 내의 복굴절 변화로 원치 않는 drift 및 편광변화를 유발하여 위상오차를 발생시킨다. 따라서 이와 같은 문제를 해결하기 위해, 대역폭이 넓고 가간섭 길이가 짧은 고휘도 레이저 다이오드(Superluminescent Laser Diode : SLD)를 사용[8]함과 더불어 일반 단일모드 광섬유 대신 특수 광섬유인 고복굴절의 편광유지 광섬유(Polarization Maintaining Fiber : PMF)를 사용하여 주변 환경 변화에 대한 위상오차를 줄일 수 있다. 그러나 편광유지 광섬유는 상대적으로 고가로 상급의 높은 정밀도를 요하는 자이로스코프에는 적절하나 중/하급의 자이로스코프에는 보다 저가인 일반 광통신용 단일모드 광섬유를 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단되며, 최근 일반 광통신용 단일모드 광섬유와 편광소멸기(Depolarizer)를 이용한 비편광 광섬유 자이로스코프(Depolarized Fiber-Optic Gyroscope : D-FOG)에 관한 연구가 보고되고 있다[9-10]. 특히, FOG의 측정정밀도는 센싱 루프의 길이에 비례하기 때문에, 저가의 긴 광통신용 단일모드 광섬유를 사용함으로써 고감도의 자이로스코프를 구성할 수 있어 고가의 편광유지 광섬유에 비해 높은 가격 효율성을 기대할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 일반 광통신용 단일모드 광섬유와 편광소멸기를 이용한 저가의 D-FOG에 대한 설계 및 실험을 수행하여 그 특성을 분석한다. 본 논문의 II장에서는 FOG의 기본 원리 및 일반 광통신용 단일모드 광섬유를 이용한 D-FOG에 대하여 설명하고, III장에서는 D-FOG의 광원 안정화회로의 설계 및 특성 실험 대하여 설명한다. IV장에서는 본 논문에서 구성한 D-FOG의 실험 및 결과에 대하여 논의한 후, V장에서 결론을 맺는다.

II. 광섬유 자이로스코프(FOG)의 기본 원리 및 비편광 광섬유 자이로스코프(D-FOG)

2.1 광섬유 자이로스코프(FOG)의 기본 원리[3]

그림 1은 일반적인 FOG의 기본 원리를 설명하는 광섬유 Sagnac 간섭계로, 센싱 루프를 통해 서로 반대방향으로 진행하는 두 개의 광파의 출력을 각각 I_1 , I_2 라 가정하고, 센싱 루프에 임의의 한 방향으로 회전을 가정할 때, 두 광파 사이의 위상차를 $\Delta\phi$ 로 두면, 광 검출기에 의해 검출된 최종 광 출력 I_0 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_0 = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\phi \quad (1)$$

여기서, 결합비가 50:50인 방향성 결합기를 가정하고, 간섭계의 손실을 무시하면, $I_1 = I_2 = I_m/4$ 으로 광 검출기의 출력 I_0 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I_0 = \frac{I_m}{2}(1 + \cos \Delta\phi) \quad (2)$$

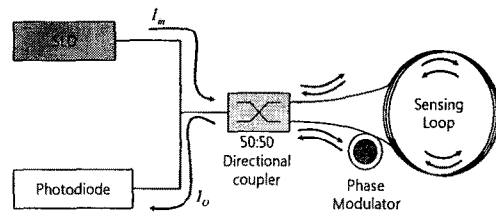


그림 1. 일반적인 광섬유 Sagnac 간섭계
Fig. 1. General Sagnac interferometer

또한, 그림 1의 Sagnac 간섭계의 회전 각속도 Ω 에 대한 위상차 $\Delta\phi$ 가 이상적이라면, 위상차는 회전 각속도 Ω 에 비례하고 다음으로 표현된다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi L D}{\lambda c} \Omega = G\Omega \quad (3)$$

여기서, $L = N\pi D$ 는 센싱 루프 광섬유의 길이, N 은 광섬유의 권선수, D 는 센싱 루프의 직경, λ 는 사용한 SLD 광원의 파장, c 는 빛의 속도, G 는 scale factor를 나타낸다.

식(3)에 나타낸 회전 각속도 Ω 에 대응하는 위상차 $\Delta\phi$ 의 측정에 있어서, 식(2)의 간섭 강도는 $\Delta\phi = N\pi$ ($N=0, \pm 1, \pm 2, \dots$) 일 때, 비선형 영역을 가지기 때문에 $\Delta\phi$ 에 대응하는 Ω 를 정확히 측정할 수 없다. 따라서 가장 선형성이 우수한 부분 즉, $\pi/2$ bias 지점에서 동작이 되도록 하기 위해, 위상 bias를 걸어주어야 한다. 이를 위해, 그림 1에 나타낸 위상 변조기를 사용하여 서로 반대방향으로 진행하는 빛에 대하여 위상차 변조를 가하면, 위상차 $\Delta\phi$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\phi = \phi(t) - \phi(t - t_m) \quad (4)$$

여기서, t_m 는 빛이 센싱 루프를 통과하는 시간을 나타낸다. 이제, $\phi(t) = \phi_0 \sin \omega t$ 의 신호로 위상변조기에 위상 변조를 가하면, 센싱 광섬유를 통과한 두 개의 광파들에 대한 위상차 $\Delta\phi$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \phi_0 \sin \omega_m t - \phi_0 \sin \omega_m (t - t_m) \\ &= 2\phi_0 \sin \frac{\omega_m t_m}{2} \left(\sin \omega_m t \sin \frac{\omega_m t_m}{2} + \cos \frac{\omega_m t_m}{2} \cos \omega_m t \right) \\ &= 2\phi_0 \sin \left(\frac{\omega_m t_m}{2} \right) \cos \omega_m \left(t - \frac{t_m}{2} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, 식(5)에 대한 위상차 변조를 최대로 하는 변조주파수의 적정 주파수 $\omega_m t_m = \pi$ 일 때이고, 따라서 적정 주파수로 위상 변조를 수행하면, 그 때 위상차 $\Delta\phi(t) = 2\phi_0 \sin \omega_m t$ 이 된다. 따라서 센싱 루프 회전에 의한 Sagnac 위상차 $\Delta\phi_S$ 를 고려하면, 전체 위상차 $\Delta\phi_T$ 는 다음으로 표현할 수 있다.

$$\Delta\phi_T = \Delta\phi_S + 2\phi_0 \sin \omega_m t \quad (6)$$

여기서, 식(6)을 식(2)에 대입하여 정리하면, 광 검출기의 출력 I_O 는 Bessel 함수를 이용해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} I_O &= \frac{I_{in}}{2} (1 + \cos \Delta\phi_T) \\ &= \frac{I_{in}}{2} [1 + \cos(\Delta\phi_S + \beta \sin \omega_m t)] \\ &= \frac{I_{in}}{2} \left\{ 1 + [J_0(\beta) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\beta) \cos 2n\omega_m t] \cos \Delta\phi_S \right. \\ &\quad \left. - [2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(\beta) \sin(2n-1)\omega_m t] \sin \Delta\phi_S \right\} \quad (7) \end{aligned}$$

여기서, $\beta = 2\phi_0$, $J_n(\beta)$ 는 n 차 Bessel 함수를 나타낸다. 만약 센싱 루프 회전이 없다고 가정하면, 즉 $\Delta\phi_S = 0$ 이라면, 우수의 고조파 성분들만 남고, 회전할 경우에는 우수 및 기수의 고조파 성분들 모두가 존재하게 된다. 이는 그림 2에 나타내었고, 여기서 보는 바와 같이, 회전 시 1차 고조파 신호를 Lock-in Amp를 사용해 기준 주파수 f_m 으로 복조함으로써, Sagnac 위상차 $\Delta\phi_S$ 을 갖는 바이어스 신호를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I_S = I_m J_1(\beta) \sin \Delta\phi_S \quad (8)$$

식(8)의 경우, 출력 신호의 최대 민감도는 $\beta \approx 1.8 \text{ rad}$ 에서 $J_1(\beta)$ 가 최대가 되므로, $J_1(\beta) = 0.53$ 의 값을 가진다.

2.2 비편광 광섬유 자이로스코프(D-FOG)

서론에서 언급했듯이, 일반 광통신용 단일모드 광섬유를 사용하여 FOG의 센싱 루프를 구성할 경우, 온도변화 및 진동과 같은 주변 환경적 변화는 광섬유 내에 복굴절 변화를 야기해 원치 않는 drift 및 편광 변화로 인한 위상오차를 발생시킨다. 이러한 문제의 대안으로는 고가의 편광 유지 광섬유를 사용하는 것이지만, 중/저급의 FOG 제작에 있어서 가격 효율성을 극대화시키기 위해서는 일반 광통신용 단일모드 광섬유를 사용한 설계가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 일반 광통신용 단일모드 광섬유와 편광소멸기를 사용하여 D-FOG를 설계/구성하였다.

그림 3은 본 논문에서 설계한 D-FOG의 구성도를 나타낸 것으로, 그 동작원리는 일반적인 FOG와 같지만, 센싱 루프의 입력 쪽에 편광소멸기와 센싱 루프 광섬유로 고복굴절 편광 유지 광섬유 대신 광통신용 단일모드 광섬유를 사용한다.

본 논문에서 사용한 편광소멸기는 서로 길이가 다른 두 개의 고복굴절 편광 유지 광섬유(PMF)로 구성된 Lyot 편광소멸기로, 그 원리는 그림 4에 나타내었다.

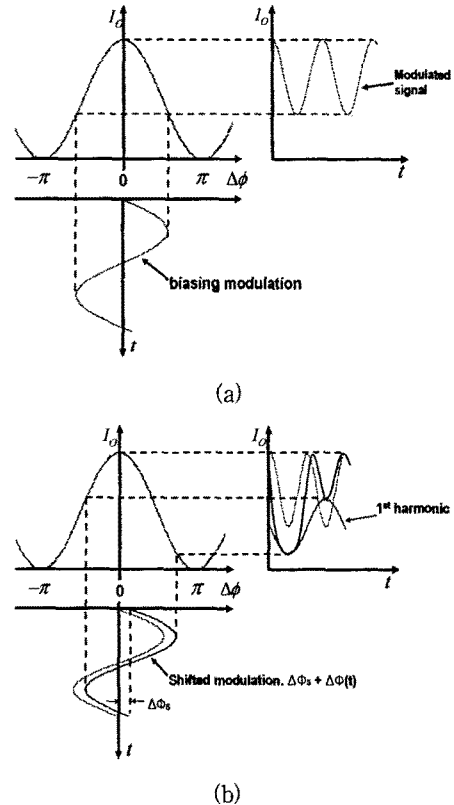


그림 2. 사인파 바이어스 변조 : (a) 정지 시, (b) 회전 시
Fig. 2. Sine wave biasing modulation : (a) at rest, (b) in rotation

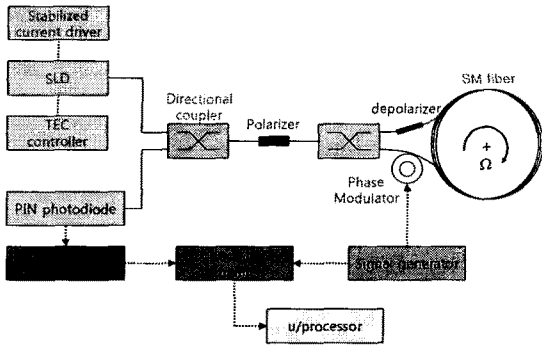


그림 3. 비편광 광섬유 자이로스코프의 구성도
Fig. 3. Diagram of the depolarized FOG

Lioty 편광소멸기[3]는 두 개의 PMF의 고유편광축이 서로 45°가 되도록 제작한 것으로, 복굴절 광섬유의 길이는 이 광섬유 내에서 발생하는 두 편광 성분간의 지연 길이가 광원의 가간섭 길이보다 매우 크게 하여, 출력에서 두 개의 편광성분이 겹치지 않게 한 것이다. 이를 통해, 임의의 입력편광 상태를 갖는 입력 광의 편광소멸은 L_1 (PMF1)에서 편광모드 간 분산으로 인해 두 편광성분간의 지연이 발생하고 L_2 (PMF2)는 L_1 (PMF1)과 45°로 구성되어 있어 L_2 (PMF)에서 같은 크기로 재 분해되어 결국 입력편광에 상관없이 동일한 두 편광성분의 세기가 발생된다. 일반적으로 Lioty 편광소멸기의 L_1 과 L_2 는 $L_2 = 2L_1$ 의 관계를 갖는다.

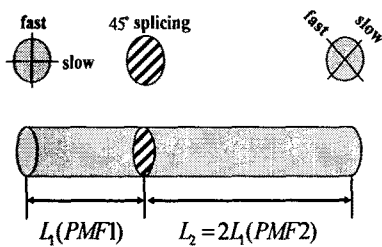


그림 4. 일반적인 Lioty 편광제거기
Fig. 4. General the Lioty depolarizer

III. 비편광 광섬유 자이로스코프(D-FOG)의 광원 안정화 회로 제작 및 특성 실험

3.1 D-FOG의 광원 안정화 회로 설계 및 제작

FOG에 사용할 수 있는 광원은 위상오차의 크기와 scale factor의 안정성을 고려하여 선택되며, 여기서 scale factor는 주로 광원의 파장 안정성에 의존하고, Sagnac 위상차는 광 파장에 선형적으로 비례한다. 일반적으로, 광원의 파장 변화의 가장 큰 원인은 열적 드리프트와 구동 전류의 변화로, 온도 및 구동 전류에 의한 중심 파장의 변화가 적은 것이 요구되며, FOG에 사용되는 광원의 선택은 넓어야 한다. 이는 여러 가지 비가역적 효과로 발생하는 위상오차를 줄

이기 위해서이다. 또한, 두 개의 편광모드가 편광기나 방향성 결합기 또는 광섬유내의 불균일성으로 인해 상호결합이 발생할 수 있으며, 이때 서로 반대방향으로 진행되는 두 개의 광은 다른 경로를 진행하게 되므로 위상오차를 발생시킨다. 따라서 넓은 대역폭 및 낮은 가간섭성을 갖는 광원의 선택으로 산란과 편광의 상호결합에 의해 발생하는 위상오차를 줄일 수 있다. 이에 따라, 본 논문에서는 대역폭이 넓은 SLD를 FOG의 광원으로 선택하여 사용하며, SLD의 중심 파장은 높은 안정도와 신뢰도를 갖도록 하기 위해, 광원의 안정화 회로를 설계/제작하였다[11].

본 논문에서 광원의 중심 파장 안정화를 위해, 가장 단순한 방법 중 하나인 반도체 레이저의 구동 전류와 온도 제어를 통한 파장 안정화를 구현하였으며, 전체 구성도를 그림 5에 나타내었다. 여기서, 광원은 고회도 다이오드(Super-luminescent diode : SLD)로 파장이 1550nm, 출력 광의 파워는 1mW인 광통신용 광원을 사용하였다.

그림 6은 본 논문에서 설계한 SLD의 전류 안정화 회로 및 온도 안정화 회로의 블록도를 나타낸 것으로, 전류치 설정부에서 SLD가 동작할 필요조건을 조정한 후, 비교기의 출력이 SLD 구동부를 동작시킬 때, 구동 전류를 측정하여 전류 안정화 제한 루프를 통해 기준 전압과 비교하여 기준 전압 보다 높으면 차단하고 기준 전압 보다 낮으면 동작되도록 하였으며, 전류의 안정도는 200 μ A보다 낮게 설계하였다.

또한 온도 안정화 회로의 경우에는, 서미스터로부터 온도 변화에 따른 저항 변화를 읽어 선형적인 전압 변화로 바꾸어 주고 converter의 온도 변화와 설정 온도를 비교해 그 차에 대한 오차 신호를 발생시킨다. TEC(Thermo Electric Cooler 또는 Peltier Cooler) 컨트롤부에서는 비교기에서 설정온도와 converter의 변화된 온도 차 전압이 인가되면, TEC에서 실제적인 온도를 제어하게 된다. 여기서, SLD의 thermistor resistance가 10k Ω 일 때 온도는 25 $^{\circ}$ C가 된다. 그림 7은 실제로 제작된 광원의 안정화회로의 사진을 보여주고 있다.

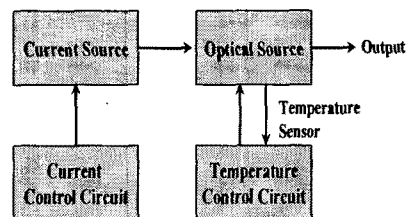


그림 5. 광원의 중심 파장 안정화 회로 구성도
Fig. 5. Diagram of the stabilized circuit of wavelength for light source

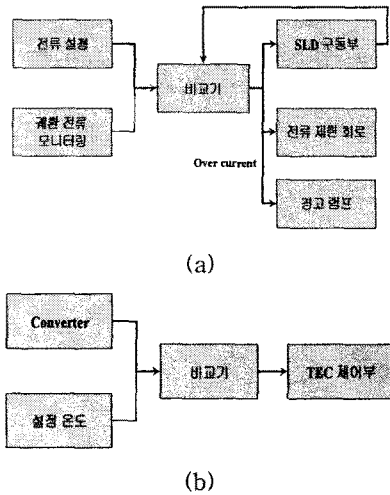


그림 6. (a) SLD의 전류 안정화 회로, (b) 온도 안정화 회로
 Fig. 6. (a) The stabilized circuit of current and (b) the stabilized circuit of temperature for SLD

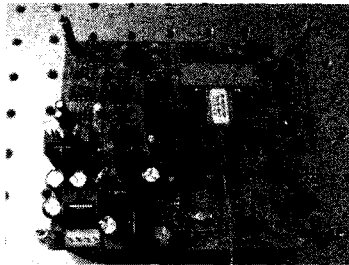


그림 7. 제작된 광원의 안정화 회로
 Fig. 7. The fabricated stabilization circuit of light source

3.2 D-FOG의 광원 안정화회로의 특성 실험

본 논문에서는 그림 7에 나타난 광원의 안정화 회로를 이용해 SLD 광원의 구동전류 대 출력특성 실험을 수행하였다. 본 특성실험에 사용한 SLD는 QPHOTONICS사의 제품으로 $\lambda=1550nm$, $200mA$ 의 구동전류에 대하여 $1mW$ 의 출력 광 파워를 갖는다. 제작된 SLD 광원의 전류 및 온도 안정화 회로를 이용해 측정된 주입전류 대 출력 광 파워는 SLD 주입전류를 $2mA$ 씩 증가시켜가며, 광 검출기로 그 출력을 측정된 결과로, 주입전류 대 출력 광 파워 특성곡선을 그림 8에 나타내고 있으며, QPHOTONICS사의 특성곡선 사양과 거의 일치함을 확인할 수 있다.

그림 9는 HP사의 HP34401A DMM(6 1/2)을 GPIB 인터페이스를 이용해 2시간 동안 주입전류의 안정도 변화를 측정된 것으로, 실험 조건은 실험실의 온도가 $18^{\circ}C$ 에서 $100mA$ 의 주입전류를 공급할 때, 2시간 동안 주입전류 변화량을 측정된 것이다. 그 결과, 주입 전류 변화량은 $0.1866mA$ 로 측정되었고, 설계치인 $200\mu A$ 미만의 주입전류 안정성을 보였다.

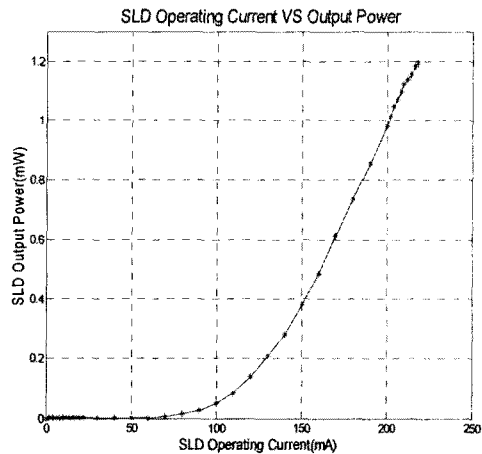


그림 8. SLD 주입전류 대 출력 광 파워 특성 곡선
 Fig. 8. The characteristic curve of SLD input current vs. output optical power

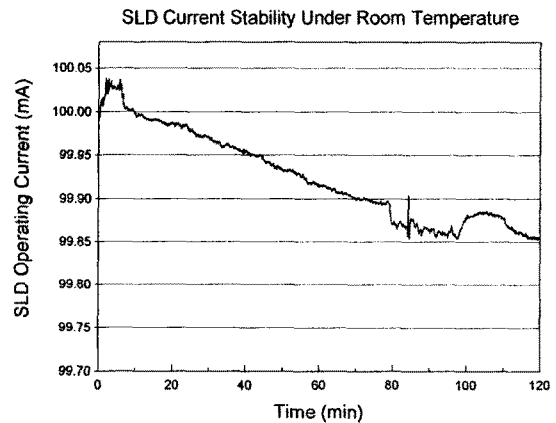


그림 9. SLD 주입전류의 안정도 측정
 Fig. 9. The measurement of SLD current stability

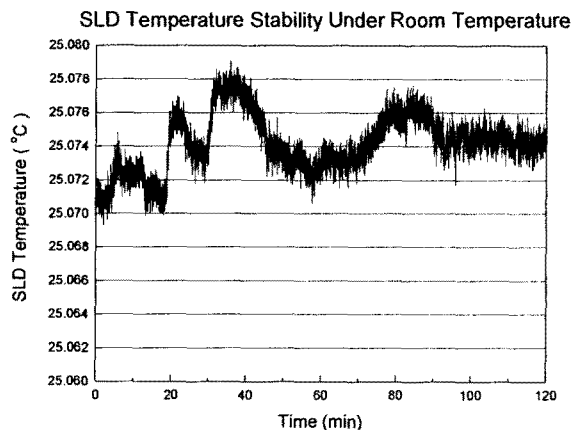


그림 10. SLD 온도 안정도 측정
 Fig. 10. The measurement of SLD temperature stability

또한 그림 10은 일정한 주입 전류 인가 시, 설정온도를 $25^{\circ}C$ 로 하여 2시간 동안 온도 변화를 측정된 것으로 최대

온도 변화는 0.0098°C로 측정되었고, 그때 SLD 내부의 TEC 전류 변화 $\Delta = 13.4985mA$ 로 측정되었다.

IV. D-FOG의 실험 및 결과 고찰

본 논문에서는 그림 3에 나타난 D-FOG의 실험 구성도를 이용해 특성실험을 수행하였다. 먼저 본 논문에서 사용한 SLD는 QPHOTONICS사에서 제작된 광원으로 200mA의 주입전류에 대하여 1mW 출력을 나타내며, 중심 파장은 1550nm로 대략 50nm의 광대역 선폭을 가지고 있다. 또한 저가의 D-FOG을 설계하기 위하여 광섬유 커플러는 일반 단일 모드 광섬유로 이루어진 것을 사용하였고, 입력에 따른 2개의 출력은 각각 3dB의 삽입 손실을 가진다. 편광기는 ChiralPhotonics사의 삽입 손실이 2dB인 PMF로 구성된 편광기를 사용하였다. 그리고 위상 변조를 위해 PZT 위상 변조기를 이용하였으며, 이때, sine파 변조신호의 주파수는 40.7kHz, 진폭은 207mV_{PP}을 인가하여 사용하였다. 편광제거기는 비트 길이가 5mm, 직경이 125µm인 PMF를 사용하여 비트 길이의 100배인 50cm의 길이로 하였으며, 실험에 사용된 광섬유 소자들의 사양을 표1에 나타내었다.

D-FOG의 센싱 루프 구성은 저가형의 광통신용 단일모드 광섬유 500m을 원통형 스펀에 감아 사용하였다. 그림 11은 D-FOG의 전체 실험 셋업을 보여주는 것으로, D-FOG의 Scale factor를 측정하기 위해, 회전 테이블 위에 센싱 루프를 설치해 회전 테이블의 속도를 가변시켜 가며, 광 검출기로 검출된 출력과 함수발생기의 동기신호를 기준신호로 하는 Lock-In Amp를 이용해 기준신호에 해당하는 주파수 성분을 검출하여 그 결과를 오실로스코프로 측정하였다.

표 1. 설계된 D-FOG의 구성소자 사양
Table 1. Specification of D-FOG's components

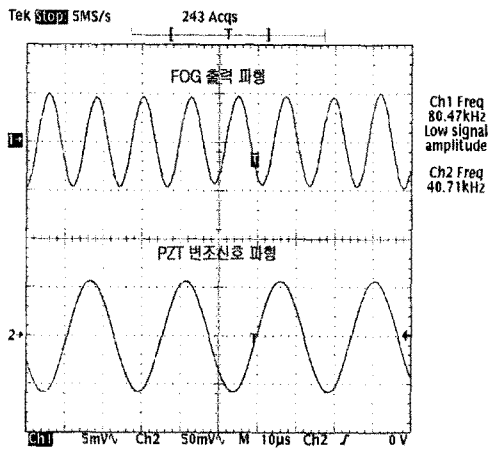
광소자	제조사	사양
SLD	QPHOTONICS	출력 : 1mW 파장 : 1550nm 선폭 : 50nm
SM 2×2 coupler	Thorlabs	삽입 손실 : 3dB
Polarizer	Chiral Photonics	편광기 길이 : 42nm 동작온도 : -50~60°C 삽입손실 : 2dB
sensing coil fiber	Thorlabs	동작파장 : 1260~1600nm 코어직경 : 10.4±0.5µm 길이 : 500m
depolarizer	Thorlabs	비트길이 : 5mm 동작파장 : 1490~1602nm 길이 : 50cm
phase modulator	Newport	변조주파수 : 40.7kHz 변조진폭 : 207mV(rms)



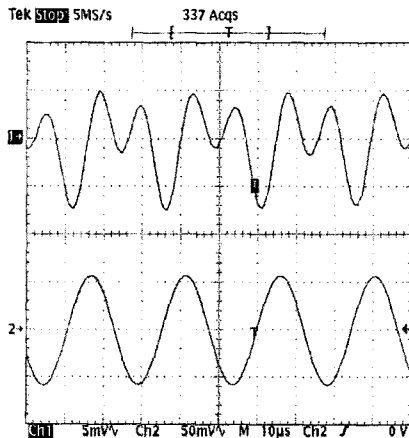
그림 11. D-FOG의 전체 실험 셋업
Fig. 11. Experiment setup of D-FOG

먼저, 그림 12는 측정용 회전 테이블에 D-FOG의 센싱 루프를 올려 정지 시 및 회전 시 D-FOG의 출력 파형을 나타낸 것이고, 또한 회전률에 대한 정량적인 Scale factor를 측정하기 위해, $\pm 60^\circ/s$, $\pm 50^\circ/s$, $\pm 40^\circ/s$, $\pm 30^\circ/s$, $\pm 25^\circ/s$, $\pm 20^\circ/s$, $\pm 15^\circ/s$, $\pm 8^\circ/s$, $\pm 5^\circ/s$, $\pm 2^\circ/s$ 의 속도로 회전시켜가면서 그 결과를 측정하여 표 2에 나타내었다. 그 결과 Scale factor는 0.554mV/°/s 이었다. 또한 그림 13은 $+8^\circ/s$, $+25^\circ/s$, $+60^\circ/s$ 회전률에 대한 D-FOG의 아날로그 출력 파형을 나타내고 있으며, 여기서 확인할 수 있는 것은, 회전 각속도가 증가할수록 II장에서 설명했던 1차 고조파 성분의 진폭이 증가함을 확인할 수 있다. 이를 Lock-In Amp를 이용해 그 진폭을 측정하여 회전 각속도에 대한 dc 출력 전압을 측정하였다.

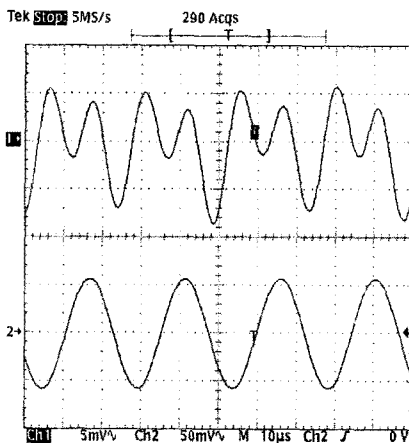
그림 14는 회전률에 대한 dc 출력으로 측정된 Scale factor, 그림 15는 측정된 Scale factor error에 대한 결과를 나타내고 있다. 그림 14, 15에서 보듯이 D-FOG를 이용해 측정된 회전 각속도의 선형성은 $\pm 50^\circ/s$ 이하에서 양호하게 측정되었지만 그 이상에서는 다소 큰 Scale factor error를 유발하였고 그 결과, 본 논문에서 측정된 Scale factor error는 $\pm 60^\circ/s$ 의 측정범위에서는 9.8135%로 다소 크게 나타났지만, 상대적 저속인 $\pm 50^\circ/s$ 의 측정범위 내에서는 2.8881%로 양호한 결과를 얻었다. 이는 스텝모터로 구성된 회전 테이블이 고속의 회전 각속도에서 상대적 불안정성으로 인해, 동일한 회전률에 대하여 D-FOG의 dc 출력값 변화가 다소 크게 발생한 것에 기인한 것으로 판단되며, 향후 정밀한 회전 테이블 제작과 D-FOG 패키지화함으로써 그 특성을 개선할 수 있을 것으로 판단된다.



(a)



(b)



(c)

그림 12. 정지 시 및 회전 시 D-FOG의 아날로그 출력 파형 : (a) 정지 시, (b) 우회전 시, (c) 좌회전 시

Fig. 12. Analog output waveform of D-FOG at rest and in rotation : (a) at rest, (b) in cw, and (c) in ccw

표 2. Scale factor 측정 데이터
Table 2. Measurement data of Scale factor

X(회전각속도 $^{\circ}/s$)	Y (GYRO 출력, mV)
60	30.940
-60	-29.978
50	26.910
-50	-26.900
40	22.390
-40	-21.910
30	16.720
-30	-16.370
25	14.030
-25	-13.750
20	11.180
-20	-10.890
15	8.3800
-15	-8.2300
8	4.4900
-8	-4.3880
5	2.7820
-5	-2.7500
2	1.1160
-2	-1.0980

그림 16은 본 논문에서 제작된 D-FOG에 대한 bias 안정성을 측정하기 위해, 정지 시 zero bias drift를 1초마다 하나의 data를 측정하여 7500초(2시간)동안 얻은 7500개의 data를 그림으로 나타낸 것으로, 그 결과 zero bias drift는 $19.49^{\circ}/h$ 로 측정되었다. 또한, 표 3은 기존의 고복굴절 편광유지 광섬유를 이용해 제작된 FOG의 등급 기준을 bias 안정도를 척도로 해서 나타낸 것[3]으로, 본 논문에서 제안한 저가의 광통신용 단일모드 광섬유와 편광소멸기를 이용한 D-FOG의 bias 안정도와 비교하였다. 표 3에서 보는 바와 같이, 상급의 FOG의 경우에는 bias 안정도가 $<0.01deg/h$ 정도의 특성을 가지며, 중/하급의 경우에는 $0.1deg/h$ 이상, $1000deg/h$ 이하로 본 논문에서 제안한 방식인 D-FOG의 경우, bias 안정도가 $19.49^{\circ}/h$ 으로 중/하급의 성능을 만족시킴을 알 수 있다. 또한, 기존 FOG의 센싱 광섬유로 사용되는 고복굴절 편광유지 광섬유의 가격은 일반 광통신용 단일모드 광섬유의 m당 가격에 비해 거의 수십 배 이상의 고가로 본 논문에서 제안한 D-FOG를 적용함으로써, 저가의 가격경쟁력을 갖춘 중/하급의 광섬유 자이로스코프 구현이 가능할 것으로 기대된다.

표 3. FOG의 등급 기준 및 bias 안정도 비교
Table 3. Comparison of bias stability and grade of FOG

	기존 FOG	제안된 D-FOG
상급 FOG	$<0.01deg/h$	-
중급 FOG 기준	$0.1\sim 10deg/h$	$19.49^{\circ}/h$
하급 FOG 기준	$10\sim 1000deg/h$	

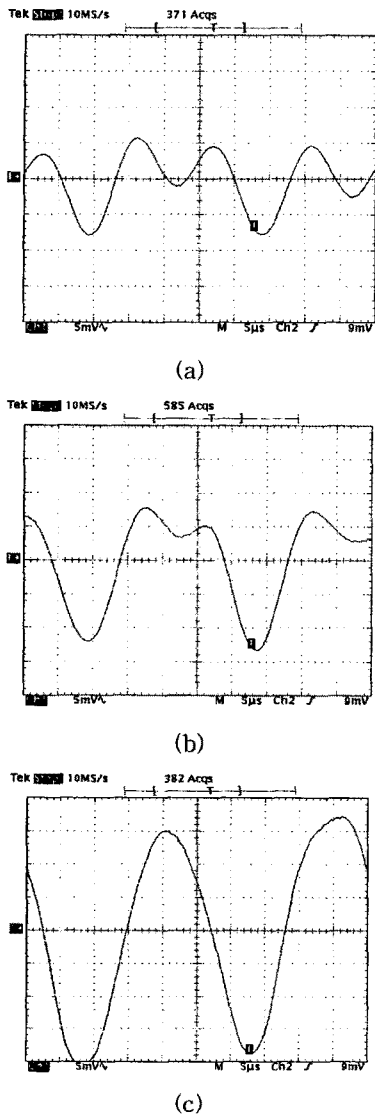


그림 13. 각각의 회전률에 대한 D-FOG 아날로그 출력 파형 : (a) $+8^\circ/s$, (b) $+25^\circ/s$, (c) $+60^\circ/s$
 Fig. 13. Analog output waveform of D-FOG for rotation rate : (a) $+8^\circ/s$, (b) $+25^\circ/s$, and (c) $+60^\circ/s$

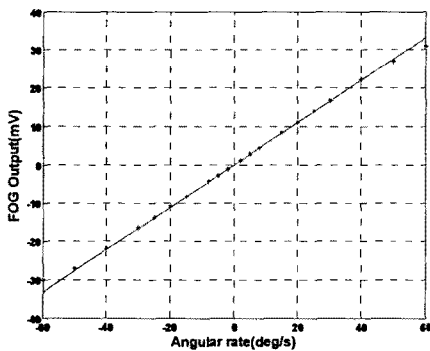


그림 14. 측정된 D-FOG의 Scale factor
 Fig. 14. Scale factor of the measured D-FOG

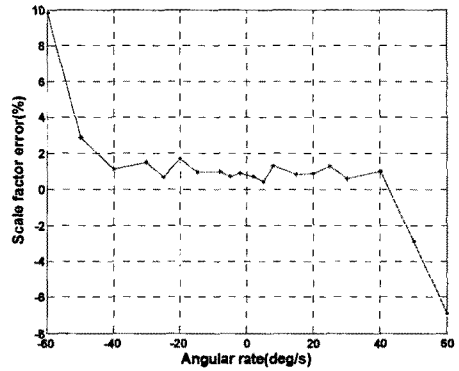


그림 15. 측정된 D-FOG의 Scale factor 오차
 Fig. 15. Scale factor error of the measured D-FOG

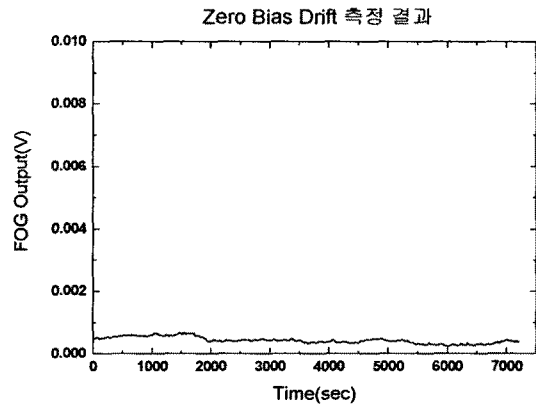


그림 16. D-FOG의 zero bias drift
 Fig. 16. Zero bias drift of D-FOG

V. 결론

본 논문에서는 주변 환경 변화에 따른 FOG의 출력 위상오차를 줄이기 위해 고가의 고복굴절 편광유지 광섬유를 사용하던 기존의 방식에 비해 센서 제작의 원가 절감 및 저가의 중/하급 자이로스코프 제작을 위한 저가의 광통신용 단일모드 광섬유 및 센싱 루프의 한쪽 방향에만 편광소멸기를 적용한 비편광 광섬유 자이로스코프(D-FOG)를 설계/제작하고 그 특성을 평가하였다. 또한, D-FOG에 사용하는 광원의 파장은 Sagnac 위상차와 선형적으로 비례하기 때문에, D-FOG에서 발생할 수 있는 위상오차를 줄이기 위해, 광원의 전류 및 온도 안정화 회로를 설계/제작하였고, 그 결과 전류 안정도는 $200\mu A$ 미만, 온도 안정도는 $0.0098^\circ C$ 로 높은 안정도를 보였다.

본 논문에서 제작한 저가의 중급 D-FOG의 측정 범위는 $\pm 50^\circ/s$ 로, Scale factor의 측정 오차는 2.8881%로 양호한 결과를 보였으며, zero bias drift는 $19.49^\circ/h$ 로 측정되었다. 이런 결과는 기존의 FOG에 사용되는 고가의 고복굴절 편광 유지 광섬유에 비해 보다 저가로 FOG를 구성할 수 있음으로 해서 높은 가격효율성을 달성할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] H. J. Arditty and H. C. Lefevre, "Sagnac effect in fiber gyroscopes," *Opt. Lett.*, Vol. 6, No. 8, pp. 401-403, 1981.
- [2] J. Blake, B. Szafraniec, and J. Feth, "Partially polarized fiber-optic gyro," *Opt. Lett.*, Vol. 21, No. 15, pp. 1192-1194, 1996.
- [3] H. C. Lefevre, *The Fiber-Optic Gyroscope*, Artech House, 1992.
- [4] G. A. Sanders, B. Szafraniec, R. Y. Liu, C. L. Laskoskie, L. K. Strandjord, G. Weed, "Fiber optic gyros for space, marine, and aviation applications," *SPIE, Fiber Optic Gyros : 20th Anniv. Conf.*, Vol. 2837, 1996.
- [5] K. Sakuma, "Application of fiber optic gyros at JAE," *SPIE, Fiber Optic Gyros : 20th Anniv. Conf.*, Vol. 2837, 1996.
- [6] C. C. Cutler, S. A. Newton, and H. J. Shaw, "Limitation of rotation sensing by scattering," *Opt. Lett.*, Vol. 5, No. 11, p. 488, 1980.
- [7] R. A. Bergh, H. C. Lefevre, and H. J. Shaw, "Compensation of the optical Kerr effect in fiber-optic gyroscopes," *Opt. Lett.*, Vol. 7, No. 6, p. 282, 1982.
- [8] W. K. Burns, C. L. Chen, and R. P. Moeller, "Fiber-optic gyroscopes with broad-band sources," *J. Lightwave Technol.*, Vol. LT-1, pp. 98-104, 1983.
- [9] B. Szafraniec and G. A. Sanders, "Theory of polarization evolution in interferometric fiber-optic depolarized gyros," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 17, No. 4, pp. 579-590, 1999.
- [10] J. Blake, "Magnetic field sensitivity of depolarized fiber optic gyros," *Proc. SPIE*, Vol. 1367, No. 81, 1991.
- [11] 함형재, 박광희, 장남영, 은재정 "광섬유 자이로스코프 신호처리부 제작," 2008년도 제15회 광전자 및 광통신 학술회의 논문집, 제15권 제1호, pp. 48-52, 5. 2008.



장남영(Nam Young Jang)

1998년 창원대학교 전자공학과(공학사)
 2001년 창원대학교 전자공학과(공학석사)
 2006년 창원대학교 전자공학과(공학박사)
 2006년 ~ 2008년 창원대학교 BK21사업단 박사후연구원
 2008년 2월 ~ 현재 창원대학교 BK21사업단 연구교수
 관심분야: 광섬유센서, 광계측, 광신호처리, 홀로그래피



함형재(Duk-Gyoo Roh)

2007년 창원대학교 전자공학과(공학사)
 2007년 ~ 현재 창원대학교 메카트로닉스공학부 석사과정
 관심분야: 광섬유센서, 광신호처리



송희영(Seog-Oh Wi)

2007년 창원대학교 전자공학과(공학사)
 2007년 ~ 현재 창원대학교 메카트로닉스공학부 석사과정
 ※주관심분야: 광신호처리, 홀로그래피



최평석(Min-Gyu Song)

1978년 성균관대학교 전자공학과(공학사)
 1980년 연세대학교 전자공학과(공학석사)
 1985년 연세대학교 전자공학과(공학박사)
 1979~1986년 유한공업전문대학 전자과 조교수
 1986년~현재 창원대학교 전자공학과 교수
 관심분야: 광신호처리, 광섬유센서, 홀로그래피



은재정(Hyun-Yeol Chung)

1982년 연세대학교 전자공학과(공학사)
 1986년 연세대학교 전자공학과(공학석사)
 1994년 연세대학교 전자공학과(공학박사)
 현재 창원대학교 전자공학과 교수
 관심분야: 광섬유센서, 광계측, ESPI, MWP, 광신호처리