

광섬유자이로의 고리 온도변화에 의한 바이어스 특성 및 온도 보상

The Bias Drift Due to Fiber Coil Temperature Variation and the Temperature Compensation in Fiber Optic Gyroscope

조민식*	정경호*	도재철*	최우석*
Min-sik Jo	Kyoung-Ho Chong	Jae-Chul Do	Woo-Seok Choi
송기원*	강수봉**	신원철**	
Ki-won Song	Su-Bong Kang	Won-chul Shin	

Abstract

The bias characteristics due to the changes of temperature and temperature gradient of fiber coil are investigated in fiber-optic gyroscope. The bias performance is degraded with the changes of temperature and temperature gradient of fiber coil. The temperature compensation using both the temperature-dependent bias measurement and the temperature-induced error model of fiber-optic gyroscope improves the bias stability about 3 times as much as the uncompensated original case, which leads to very stable bias performance over the temperature range from -35 °C to +77°C.

Keywords : Fiber-Optic-Gyroscope(광섬유자이로), Sagnac Interferometer(사낙간섭계), Shupe Effect(슈페효과), Temperature Compensation(온도보상)

1. 서론

광섬유 자이로(Fiber Optic Gyroscope)는 각속도를 측정하는 회전센서의 일종으로서 링레이저 자이로(Ring Laser Gyroscope)와 더불어 대표적인 광학식 자이로에 속한다. 1976년에 Vali와 Shorthill이 Sagnac 효과를 기

본원리로 하는 광섬유자이로의 실험적 구현에 성공한 이후 전 세계적으로 연구가 진행되었지만, 링레이저 자이로의 활발한 진전과는 대조적으로 부품 소자 기술의 제약으로 인해 그 개발이 한 동안 답보 상태에 머물렀다. 이후 광통신 산업 분야에서 반도체 광원과 광섬유에 대한 대규모 투자가 이루어지고, 이에 따른 부품 소자의 성능 개선이 가능하게 되면서 본격적인 기술 발전의 토대가 다져졌으며, 1980년대 후반부터 2000년대에 이르기까지 주목할 만한 기술 발전이 이루어져 왔다.

광섬유자이로는 기존의 기계식 자이로나 링레이저

† 2008년 11월 13일 접수~2009년 2월 27일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD) 관성항법연구실

** 두산디에스티(주) 방산연구소

책임저자 : 조민식(minsjjo@add.re.kr)

자이로에 비해 수명이 길고 부피가 작고 견고하며 값싸게 만들 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이러한 이유는 광섬유자이로 개발에 대한 보다 많은 관심과 노력이 센서개발 등 응용 분야에 집중되는 배경이기도 하다^[1,2].

광섬유자이로를 비롯한 관성센서들의 연구 개발을 수행함에 있어서, 기술적으로 가장 일반적인 현상이면 서도 완전하게 해결하기 어려운 과제가 온도 영향에 대한 것이다. 광섬유자이로의 바이어스 성능은 어느 형태의 자이로 못지않게 온도에 민감한 영향을 받으며, 정밀한 광섬유자이로 개발을 위해서는 온도 특성에 대한 정확한 분석과 보상방법 도출이 무엇보다도 중요하게 요구된다. 본 논문에서는 국내 개발 광섬유자이로의 온도 특성을 시험하고 그 결과를 분석함으로써, 온도환경에서의 자이로 성능 및 온도영향에 대한 보상 가능성을 조사하였다.

2. 광섬유자이로 원리 및 Shupe 효과

가. 광섬유자이로의 원리

광학식 자이로의 일종인 광섬유자이로는 Sagnac 효과를 이용하여 회전정보를 감지해 낸다. Sagnac 간섭계 내에서 시계 방향과 시계 반대 방향으로 갈라져서 진행되는 두 빛 사이의 위상차(Sagnac 위상차) $\Delta\phi_R$ 은 식 (1)과 같이 광섬유의 길이와 고리 직경에 비례하고 빛의 파장에 반비례한다^[2].

$$\Delta\phi_R = \frac{2\pi LD}{\lambda c} \Omega; \Delta\phi_R [\text{rad}], \Omega [\text{rad/sec}] \quad (1)$$

여기서 L 은 간섭계를 구성하는 광섬유의 길이, D 는 광섬유 고리의 유효 직경, λ 는 빛의 파장, c 는 빛의 속도를 나타낸다.

광섬유자이로는 광대역 광원(broadband light source), 집적광학소자(integrated optic chip), 편광유지광섬유(polarization-maintaining fiber)를 감아 놓은 광섬유 고리(fiber coil), 광검출기 등으로 구성된다. 광원에서 발생된 빛은 집적광학소자의 광분할기에서 두 갈래로 나뉘고, 시계 방향과 시계 반대 방향으로 각기 다른 경로를 통하여 편광유지광섬유를 따라 광섬유 고리 내부를 지나간다. 광섬유 고리가 고정되어 있는 플랫폼이 회전하게 되면, 고리 내부를 진행하는 두 갈래의

빛 사이에 위상차가 발생하게 된다. 광섬유 고리를 통과한 두 갈래의 빛들이 광분할기에서 다시 하나로 만나게 되면, 이 위상차는 빛의 세기로 바뀌어 광검출기에서 전기 신호로 변환되고, 록인(lock-in) 앰프나 디지털 신호 처리기에서 회전 정보로 추출된다.

$$I = I_0(1 + \cos \Delta\phi_R) \quad (2)$$

식 (2)은 회전 입력에 따른 두 빛 사이의 위상차 $\Delta\phi_R$ 와 Sagnac 간섭계를 통과한 후 광검출기에서 관측한 간섭무늬 빛의 세기 관계식이다. 즉, 간섭계 광출력 세기를 측정함으로써, 입력 각속도 정보를 얻을 수 있다.

나. Sagnac 간섭계의 위상 오차 발생원

간섭계의 위상차를 발생시키는 성분은 회전 입력에 의한 위상차 $\Delta\phi_R$, 전기 변조신호에 의한 위상차 $\Delta\phi_m$, 외부 영향에 기인한 위상차 $\Delta\phi_E$ 등으로 구분할 수 있다^[2]. 전기 변조에 의한 위상차 $\Delta\phi_m$ 는 집적 광학소자의 전극에 전기 변조신호가 인가되었을 때 광 도파로 내부에 전기광학 효과에 의해 굴절율이 바뀌게 되면서 도파로를 통과하는 빛이 얻게 되는 위상 성분이다. 한편, 온도, 진동, 자기장과 같은 외부 영향에 기인한 위상차 $\Delta\phi_E$ 는 간섭계의 가역성(reciprocity)을 훼손시키는 원치 않는 성분이다. 이 경우, 신호 처리를 통하여 자이로 출력으로부터 $\Delta\phi_E$ 와 $\Delta\phi_R$ 를 구분하는 것이 불가능하기 때문에 자이로 출력 오차가 증가할 수 있다. 따라서 자이로의 출력에서 $\Delta\phi_E$ 의 영향을 직접 또는 간접적으로 제거 또는 보상하는 것은 매우 중요한 기술 분야이다.

다. Sagnac 간섭계에서의 Shupe Effect

간섭계의 온도 기울기가 시간에 따라 변하게 되면, 광섬유의 굴절율이 시계 방향과 반시계 방향의 광선에 대해서 비대칭적으로 변하면서 가역성이 훼손되고, 식 (3)과 같이 자이로 출력에 바이어스 오차(Ω_S)를 만들게 된다. 이와 같이 온도 기울기 변화에 의해 바이어스 오차가 유발되는 현상을 Shupe Effect(SE)라고 한다^[2~4].

$$\Omega_S = \frac{nN\pi}{L^2} \frac{\Delta n}{\Delta T} \int_0^L \frac{\Delta T(l)}{\Delta t} (2l-L) dl \quad (3)$$

여기서 n 은 광섬유의 굴절율, N 은 광섬유 고리에 감긴 광섬유의 턴(turn) 수, L 은 광섬유의 길이, $\Delta n/\Delta T$ 는 굴절율의 온도 변화율, $\Delta T/\Delta t$ 는 온도의 시간 변화율을 나타낸다.

광섬유자이로 바이어스 출력의 온도 의존도를 낮추기 위해서는 근본적으로 하드웨어 관점에서 SE의 크기를 줄이는 노력이 필요하다. 실제 하드웨어 상의 SE를 충분히 줄이지 못하면 소프트웨어에 의한 보상 자체가 어려워진다. SE를 줄이기 위한 하드웨어 상의 접근 방법은 크게 두 가지로 분류된다. 첫째, 광섬유 고리를 제작할 때 대칭 구조로 광섬유를 권선하는 것이다^[5]. 광섬유의 기하학적 중심을 고리의 제일 안쪽 층에 위치하게 하고 광섬유의 양쪽의 끝을 고리의 제일 바깥쪽 층에 있게 하는 것이다. 광섬유를 대칭 구조로 감는 방식 중에서 가장 많이 사용되는 것은 4중극 권선(quadrupole winding) 방식이다. 둘째, 광섬유 고리를 적절한 물성을 갖고 있는 물질(포팅제)로 처리하여 보호하는 것이다. 포팅제는 광섬유 고리의 균열, h-parameter 성능 저하, 진동에 의한 바이어스 오차, 바이어스 온도 기울기 의존도를 낮추는 데 중요한 역할을 한다^[6]. 이상 기술한 하드웨어 관점의 온도영향 감소 노력이 충분히 이루어진 상태에서 추가적인 온도 의존도 개선을 위하여 소프트웨어 관점에서 온도 영향 오차보상을 수행하게 된다.

3. 자이로의 온도영향 오차 보상 모델

자이로의 오차 모델은 일반적으로 식 (4)과 같이 표현된다^[7]. 앞장에서 기술한 식 (1)에서도 나타나 있듯이, 외부 회전입력은 광섬유자이로 간섭계안의 두 광선사이에 위상차 $\Delta\phi_R[\text{rad}]$ 를 발생시키고, 이에 따른 간섭계 빛의 세기로 부터 얻어지는 자이로 출력 $B_o[\text{rad/sec}]$ 은 회전각속도의 물리량을 갖게 된다.

$$B_o = S_o \cdot V_o = [\Omega_i + D_r + E] \cdot [1 + 10^{-6} \cdot \epsilon_K]^{-1} \quad (4)$$

여기서 $B_o[\text{rad/sec}]$ 는 자이로 출력, $S_o[(\text{rad/sec})/\text{Volt}]$ 는 자이로의 환산계수, $V_o[\text{Volt}]$ 는 자이로 출력 (환산계수 적용 전 자이로 출력단의 측정 물리량), $\Omega_i[\text{rad/sec}]$ 는 입력 회전 각속도, $D_r[\text{rad/sec}]$ 은 보상 불가능한 drift rate 성분, $E[\text{rad/sec}]$ 는 온도, 진동, 자기

장 등과 같은 외부 환경 요인에 의해 발생하는 바이어스 오차, ϵ_K 는 환산 계수 오차를 나타낸다. 이때 환경 인자 중 가장 대표적인 온도에 의한 바이어스 오차 성분(E_T)을 자세히 나타내면 식 (5)와 같다.

$$E_T = D_T \cdot \Delta T + D_T' \cdot \frac{dT}{dt} \quad (5)$$

여기서 D_T 는 바이어스 온도 의존 계수(bias temperature sensitivity), ΔT 는 온도 변화, D_T' 는 바이어스 온도 기울기 의존 계수, dT/dt 는 온도 기울기를 나타낸다. 따라서, 온도에 대한 자이로 바이어스 모델은 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다^[8].

$$\begin{aligned} B_c &= B_o - B_{B\Omega} - B_F - E_T \\ &= B_o - B_{B\Omega} - B_F - (D_T^1 \cdot \Delta T + D_T^2 \cdot \Delta T^2 + \dots + D_T^n \cdot \Delta T^n) - D_T' \cdot \frac{dT}{dt} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 B_c 는 온도 및 온도 기울기 보상이 끝난 후의 자이로 바이어스, B_o 는 온도 영향을 포함한 자이로 출력, $B_{B\Omega}$ 는 지구 자전 각속도 입력에 의한 자이로 출력, B_F 는 자이로의 고정 바이어스 성분, ΔT 는 자이로 온도 변화, D_T^n 은 n 차 온도 의존 계수, D_T' 는 온도 기울기 의존 계수를 나타낸다.

따라서 식 (6)의 자이로 출력으로부터 이미 알고 있는 $B_{B\Omega}$ 와 B_F 를 제거한 최종 온도영향 보상 후 자이로 바이어스를 B_{cf} 라 하고, 온도 편차 성분에서 1차 항만을 보상하면 아래의 식 (7)과 같이 표현된다.

$$B_{cf} = B_o - D_T^1 \cdot \Delta T \quad (7)$$

또한, 자이로 출력으로부터 온도 편차의 1차 항과 온도 기울기 항을 함께 보상한 결과는 아래 식 (8)과 같다.

$$B_{cf} = B_o - D_T^1 \cdot \Delta T - D_T' \cdot \frac{dT}{dt} \quad (8)$$

결국, 위의 식 (8)은 자이로 출력에서 온도 영향에 의해 유기된 오차를 보상하고자 할 때, 간단하고 효과적으로 적용할 수 있는 오차 보상 모델이다.

4. 시험 및 결과분석

가. 바이어스 온도 특성 시험

광섬유자이로 온도 시험 구성도가 Fig. 1에 간략히 나타나 있다. 시험에 사용된 광섬유자이로의 간섭계는 980nm 파장의 레이저 다이오드(LD)로 펌핑하여 발생시킨 선폭 20nm, 중심파장 1550nm인 광대역 어븀 첨가 광섬유(Erbium-Doped Fiber) 광원을 사용하였다. 광섬유 광원과 광결합기 사이에 위치한 파장 분할기는 광섬유 고리 방향으로 입사되는 빛을 980nm 광선은 배제하고 1550nm 광선은 허용한다. 집적광학소자는 광분할기(beam splitter) 등의 주요 역할을 수행하며 온도 민감도가 매우 적은 리튬니오베이트(LiNbO₃)로 제작되었다. 다음 단의 광섬유 고리는 길이 200m의 편광 유지 광섬유를 4중극 권선방식으로 감아서 제작하였다. 즉, 광섬유 광원에서 발생한 광선은 파장 분리기와 광결합기를 통과하고 집적광학소자에서 2개의 광선으로 나누어진 후 시계방향과 반시계 방향으로 광섬유 고리를 진행한 다음, 다시 집적광학소자에서 결합하여 자이로 신호검출기에 도달한다. 신호검출기에서는 두 광선의 간섭무늬의 세기를 측정하여 앞에서 설명한 식 (2)에 근거한 광섬유자이로 출력을 표시하게 된다. 온도센서는 광섬유 고리에 부착되었으며, 이로부터 광섬유 고리의 온도 및 온도 기울기 정보를 실시간으로 획득하였다. Fig. 1에서 점선으로 표시한 영역 안의 구성품 들이 온도 챔버 내에 위치하였으며, 시험 환경에서의 온도는 저온 -35℃부터 고온 +77℃까지 변화시켰다.

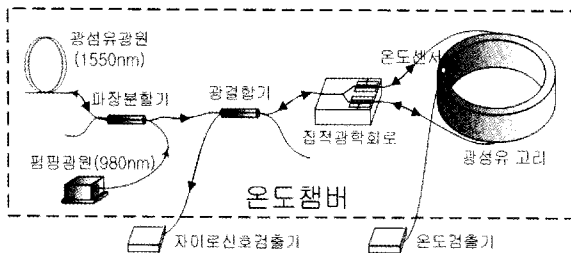


Fig. 1. 광섬유자이로의 온도 시험 구성도

광섬유자이로의 바이어스 출력의 온도 특성을 조사하기 위해, -35℃부터 77℃까지 온도를 변화시키면서 10시간에 걸쳐 10초 샘플 주기로 데이터를 확보하였다. 자이로 출력 데이터 처리 시에는 바이어스 특성을 관찰하기 위하여, 샘플링된 데이터를 10초 평균하여

불규칙잡음(angle random walk) 레벨을 충분히 감소시켰다. Fig. 2는 온도 변화에 따른 자이로 바이어스 측정 결과이다. 시험이 수행된 전 온도구간에서 자이로 바이어스 출력(곡선②)은 광섬유 고리 온도 변화(곡선①)와 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 주목할 만한 현상으로 온도 기울기의 방향이 바뀌는 시점에서 자이로 바이어스의 급격한 변화가 발생하였음을 관측할 수 있다. 이는 자이로 바이어스 성능이 온도 및 온도 기울기 변화에 영향을 받고 있음을 확인시켜 주는 결과이다.

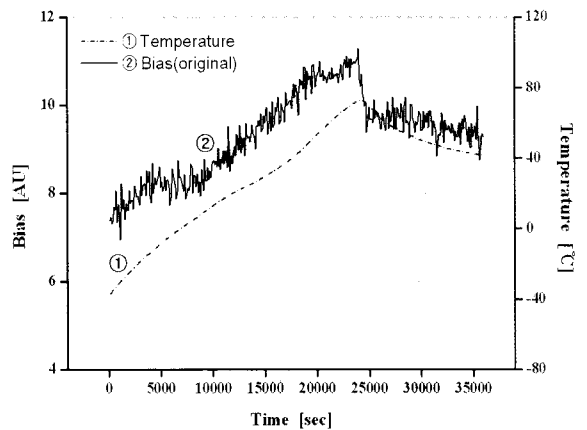


Fig. 2. 온도 변화에 따른 바이어스 출력 변화

나. 바이어스 온도 보상 및 결과 분석

온도 영향에 의한 자이로의 바이어스 오차를 감소시키기 위하여 식 (7)과 식 (8)에 근거한 온도 및 온도 기울기 보상을 수행하였다. 온도영향 보상에 는 광섬유 고리의 온도 데이터가 활용되었다. Fig. 3은 온도 전 구간에서 측정된 자이로 출력에서 1차 온도 변화량에 대한 영향을 보정한 결과이다. 온도 변화 영향을 보정한 후 자이로 바이어스 변화량 크기(곡선③)가 기존의 온도 보상 전 자이로의 경우(곡선②)에 비교해서 크게 감소되었다. 온도 변화 구간에서 관측된 자이로 바이어스 출력의 변화 폭이 감소하였음은 온도 환경에서의 자이로 성능이 안정화되었음을 의미한다. 특히, 온도 변곡점을 제외한, 자이로 스폴의 온도가 저온에서 고온으로 상승하는 구간이나 고온에서 상온으로 하강하는 구간에서 바이어스 변화량의 크기가 크게 감소되었다. 온도 보상 전에, 온도 상승구간에서 바이어스 변화량은 약 4(a.u.)이었으나, 온도 보상 후 바이어스 변화량은 약 2(a.u.)로 감소하였다. 고온에서 상온으로

하강하는 구간에서도 온도 변화범위가 적어서 그 효과가 온도 상승 구간에 비해 적지만 바이어스 변화량 감소 관점에서 마찬가지로 유효한 결과를 보였다. 하지만, 온도 변화량이 보상된 자이로 바이어스 출력 (Fig. 3)은 기울기가 zero인 1차 함수 형태에서 상당히 벗어난 특성을 보이며 여전히 추가 개선을 필요로 하는 잔여 바이어스 오차 성분을 가지고 있다. 잔여 바이어스 오차는 온도 기울기 방향이 바뀌는 온도 변곡점 부분에서 가장 크게 나타나고 있다. 이는 온도 기울기의 변화가 자이로 성능을 상당한 영향을 주고 있음을 확인시켜 준다.

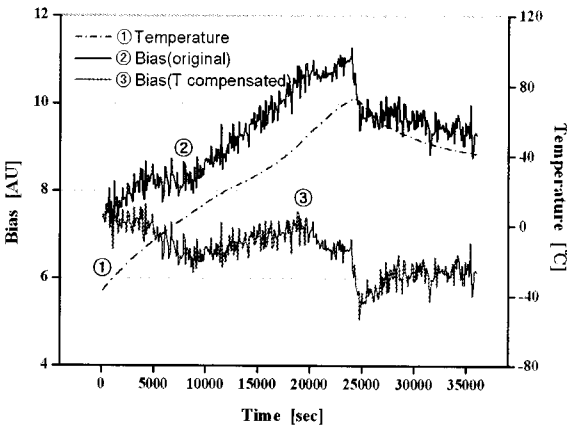


Fig. 3. 온도 보상 후 바이어스 출력

광섬유자이로의 온도 의존 계수 및 온도 기울기 의존 계수는 각각 0.040(deg/hr)/°C와 0.035(deg/hr)/(°C/min)으로 측정되었다.

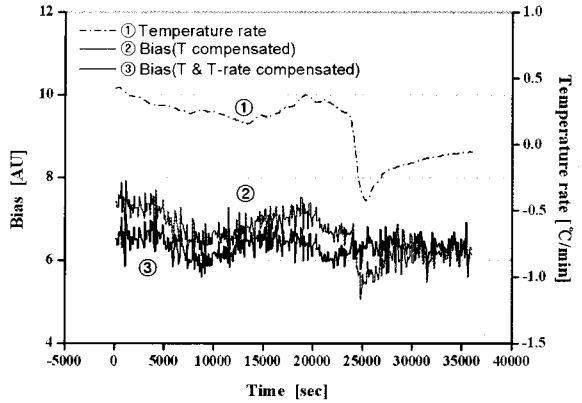


Fig. 4. 온도 및 온도 기울기 보상 후 바이어스 출력

Table 1. 바이어스 안정도 성능

구 분	바이어스 안정도[a.u.]
보상 전	1.00
T 보상 후	0.56
T & ΔT 보상 후	0.28

Fig. 4는 온도 보상 후 남아있는 바이어스 오차 성분에 온도 기울기 보상을 추가로 적용한 후의 자이로 출력을 나타낸 것이다. 자이로 온도 변화 곡선에서 도출한 온도 기울기 곡선(곡선①)이 온도 보상 후 잔여 바이어스 성분 곡선(곡선②)과 유사한 형태를 가지고 있음을 알 수 있다. 이로부터 예측할 수 있듯이, 온도 및 온도 기울기 보상을 적용한 자이로의 바이어스 출력(곡선③)은 온도 전 구간에서 변화 폭이 적고 안정적인 성능을 보였다.

위에서 기술한 Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4의 시험결과가 Table 1에 정리되었다. 온도변화에 의존하는 자이로의 바이어스 안정도 성능이 온도영향 보상 전을 기준으로 할 때, 온도 보상 후와 온도 기울기 추가 보상 후의 경우에 대하여 상대 비교가 이루어졌다. 바이어스 안정도 성능은 획득한 자이로 출력의 표준편차를 나타낸다. 최종적으로 온도영향 보상 후 바이어스 안정도는 보상 전의 경우에 비교하여 약 3배 개선 되었다.

5. 결론

광섬유자이로의 온도 특성 및 온도 유발 오차 보상에 대한 연구를 수행하였다. 저온에서 고온에 이르는 광역 온도범위에서 광섬유 고리의 온도 및 온도 기울기 변화에 따른 바이어스 출력 변화를 분석하였으며, 온도 보상 모델에 근거하여 온도 영향을 보상함으로써, 온도 환경에서 안정된 자이로 바이어스 성능을 얻을 수 있었다.

Reference

- [1] Vali, V. and R. W. Shorthill, "Fiber Ring Interferometer", Appl. Opt., Vol. 15, pp. 1099~1100, 1976.
- [2] Hervé Lefèvre, The Fiber Optic Gyroscope(Artech

- House, Boston · London, 1986), Chapt. 2, pp. 17~19 ; Chapt. 3, pp. 32~34 ; Chapt. 3, pp. 37~43.
- [3] D. M. Shupe, "Thermally Induced Non-Reciprocity in the Fiber Optic Interferometer", Appl. Opt, Vol. 19, p. 654, 1980.
- [4] R. P. Goettsche, "Apparatus and Method for Trimming of Fiber Optic Winding", U.S. Pat. No. 5,506,923, 1996.
- [5] N. Frigo, "Compensation of Linear Sources of Non-Reciprocity in the Sagnac Interferometers", Fiber Optics and Laser Sensors I, Procs. SPIE, v. 412, p. 261, 1983.
- [6] A. Cordova, "Sensor Coil for Low Bias Fiber Optic Gyroscope", U.S. Pat. No. 5,371,593, 1994.
- [7] IEEE Std 952-1997, IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Gyros, IEEE Inc., 2007.
- [8] George M. Siouris, Aerospace Avionics Systems Chapt. 3, Academic Press, Inc., New York, pp. 127~130, 1993.