

技術論文

펄스 디더링을 이용한 광섬유자이로 불감응영역 제거

정경호*, 도재철*, 조민식*, 송기원*

Deadzone Elimination of Closed-Loop Fiber Optic Gyro
using Pulse Dithering

Kyoung-Ho Chong*, Jae-Chul Do*, Min-Sik Jo* and Ki-Won Song*

ABSTRACT

Gyroscope's deadzone is a region where can not detect the rate even though the actual rotation is applied. This paper analyzed the cause of deadzone by modeling/simulation and introduced pulse dithering method to overcome. From the testing of 3-axis fiber optic gyro system using 900m fiber, it confirmed deadzone could be effectively eliminated by combination of three factors, dither amplitude, dither frequency, and gyro loop gain.

초 록

자이로의 불감응영역은 외부 회전이 인가되고 있음에도 불구하고 이를 감지하지 못하는 영역을 말한다. 본 논문에서는 모델링/시뮬레이션을 이용하여 불감응영역의 원인을 분석하고 불감응영역을 제거하기 위해 디지털 펄스 디더링 기법을 도입하였다. 900m 광섬유를 적용한 3축 자이로 시스템으로 시험한 결과, 디더 진폭, 주파수, 그리고 자이로 루프 이득의 조합에 의해 불감응영역이 효과적으로 제거될 수 있음을 확인하였다.

Key Words : Deadzone(불감응영역), Closed-Loop Fiber Optic Gyro(폐루프 광섬유자이로), Modeling and Simulation(모델링 시뮬레이션), Pulse Dithering(펄스 디더링)

1. 서 론

광섬유자이로(FOG, Fiber Optic Gyro)는 광학식 자이로를 대표하는 관성센서로서 1970년도 후반에 "Sagnac효과"의 원리를 바탕으로 처음 개발되었다.[1] 당시에는 실험실 수준에서 광학 계측장비를 이용하여 개발가능성을 확인하는 수준이었으나 광통신의 발달에 힘입어 1990년대에는 세계 여러 나라에서 시제품이 개발되었다. 이후 현재에 이르러 차량이나 유도조종에 쓰이는 100deg/hr급 자이로로부터 우주 탐사용 고정밀 자이로(약

0.001deg/hr급)까지 다양한 분야에 적용 되고 있다.[2] 광섬유자이로는 1980년도부터 실용화 되었던 링레이저 자이로(RLG, Ring Laser Gyro)를 점차 대체하고 있는 추세이며 이는 제작공정이 단순하고 적용되는 광학부품들이 장시간동안 높은 신뢰성을 갖기 때문이다. 또한 대부분의 광학 부품들이 통신용 소자들로 구성되어 있어 저가로 대량생산이 가능한 장점을 갖고 있다[1~2].

광섬유자이로는 개루프 방식과 폐루프 방식으로 나뉜다.[3] 개루프 방식은 전광섬유 구조(All-Fiber Configuration)를 갖으며 SLD 광원, PZT 변조기 등의 저가형 광부품 소자와 아날로그 신호처리 방식을 적용하는 방식이다. 이 방식은 약 100deg/hr이상의 바이어스 특성 및 수 %의 환산계수 특성을 가지므로 회전 센서로서 사용된다.

† 2009년 2월 5일 접수 ~ 2009년 7월 24일 심사완료

* 정회원, 국방과학연구소 종합시험단 1-3

교신저자, E-mail : khchong@add.re.kr

충남 태안군 태안우체국 사서함 1호

반면 페루프 방식은 파장안정성이 우수한 EDFS(Er-Doped Fiber Source), 고효율 편광 IOC(집적광학소자) 등의 정밀 광부품 소자와 디지털 페루프 신호처리를 적용하는 방식이다. 이 방식은 주로 1deg/hr이하의 바이어스 특성과 100ppm이하의 환산계수 특성을 갖으며 항범용으로 사용된다. 페루프 방식은 개루프 방식에 비해 성능이 우수하나, 광학부품의 정밀도와 신호처리의 안정화 기법이 요구된다. 특히 페루프 방식의 신호처리에 있어 어려운 기술 분야 중 하나는 불감응영역(Deadzone)의 제거이다. 불감응영역은 위상변조신호의 2π -리셋이 발생할 때 위상변조신호와 광검출기 사이의 전기적 교차결합(Electrical Cross-Coupling)에 의해 나타나는 현상으로 널리 알려져 있다[4, 6~7].

본 연구에서는 불감응영역을 개선하기 위한 방법으로서 모델링/시뮬레이션 기법을 도입하여 불감응영역의 원인을 분석하였으며, 불감응영역을 제거하기 위한 방법으로 펄스 디더링 기법(Pulse Dithering Method)을 도입하였다. 펄스 디더링 기법[4, 7]은 Allied Signal사, Northrop Grumman사에서 널리 사용되었던 방식이지만, 펄스 디더링의 주파수, 진폭 등의 설계 변수는 공개되지 않았고 주로 실험결과에 의존하여 개선된 결과만 제시되었다.

본 연구에서는 시뮬레이션을 통하여 펄스 디더링의 설계 변수에 따른 불감응영역 오차를 정량적으로 제시하였으며, 최종적으로 얻어진 설계 변수에 대해 실제 시스템을 구성하여 평가한 결과를 살펴보았다.

II. 기본원리 및 설계

2.1 페루프 광섬유자이로의 동작원리

광섬유자이로는 사낙 간섭계(Sagnac Interferometer)의 원리에 의해 동작한다. 즉, 수백m ~ 수km의 광섬유 고리를 통과한 두 빛은 회전할 때 서로 다른 광경로(Optical Path Length)를 경험하게 되는데 이 차이가 광 위상차(Optical Path Difference)를 갖게 되고 이 값에 비례한 회전 정보가 발생하게 된다. 이러한 동작을 하는 간섭계를 사낙 간섭계라 부른다.

광 위상차는 광세기로 나타나며 입력 각속도에 대해 코사인 출력을 나타낸다. 광섬유 고리를 통과하여 광검출기에 입사된 광전력(Optical Power)이 P_0 라면, 광검출기를 통과한 신호는 아래와 같다.

$$P_d = \frac{P_0}{2} [1 + \cos(\Delta\phi_R)] \quad (1)$$

$$\Delta\phi_R = K_{sf} \cdot \Omega \quad (2)$$

Ω : 입력각속도[deg/sec]

$\Delta\phi_R$: Sagnac위상차[rad]

K_{sf} : 광학환산계수[rad/deg/sec]

자이로가 페루프 동작을 하기 위해서는 항상 영(Zero)인 지점에서 선형성을 가져야 한다. 그러나 광섬유자이로의 출력은 입력 회전에 대해 코사인 응답을 가지므로 저 입력 회전에서의 민감도(Sensitivity)는 매우 낮으며, 이 지점에서 자이로가 동작하게 되면 회전 변화에 대한 신호의 응답은 불규칙적이고 선형성이 떨어진다. 이러한 문제는 $\pi/2$ 만큼 바이어스 위상을 인가시켜 자이로 출력을 사인응답으로 변환함으로써 해결된다.

$$P_{rate} = 2P_0 \sin\phi_0 \sin\Delta\phi_R \approx 2P_0 \phi_R \cdot (\phi_0 = \frac{\pi}{2}) \quad (3)$$

Fig. 1은 회전이 없을 경우 바이어스 변조를 인가할 때의 광검출기 출력 신호이다. 사각파 바이어스를 인가하면 광검출기 출력은 사낙 간섭계의 코사인 응답을 통과하여 $\pm\pi/2$ 위상차 지점을 나타낸다.

페루프 광섬유자이로는 회전정보를 피드백하기 위한 신호가 필요하며 사낙 간섭계에서 회전이 발생하면 회전량($\Delta\phi_R$) 만큼 위상변조기에 피드백 하는 구조로 되어 있다. 이 피드백 신호($\Delta\phi_{FB} = -\Delta\phi_R$)를 세로다인 신호(또는 톱니파 신호)라 한다. 회전이 발생하고 광세기(P_0)가 일정할 경우 복조기 출력신호(P_{rate})는 입력 회전에 비례한 값을 출력하며 이 신호를 누적함으로써 세로다인 신호가 생성된다. 위상변조기는 광섬유 고리에 따른 광경로 시간차에 대해 미분기로 동

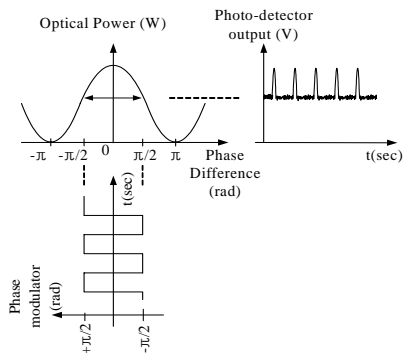


Fig. 1. Photo detector output with square-wave modulation

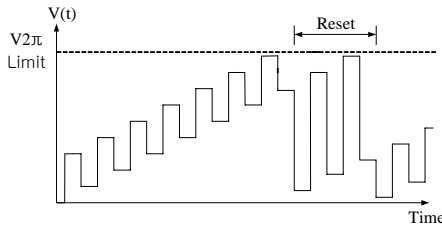


Fig. 2. Feedback modulation signal when positive rate is applied

작하기 때문에 적분된 세로다인 신호를 인가하여 야만 입력 회전에 비례한 값을 정상적으로 피드백 할 수 있다. 광위상 신호에 피드백 신호를 인가하고 P_0 를 항상 일정하게 유지하면 자이로는 회전 위상 값이 영인 부근에서 동작 ($\Delta\phi_{FB} + \Delta\phi_R = 0$)하여 선형성이 유지된다. Fig. 2는 양(+)의 회전이 발생하였을 때 피드백 되는 세로다인 신호($V(t) = K \cdot \Delta\phi_{FB}$)이다. 세로다인 신호는 인가전압의 한계로 인하여 2π 한계치($V2\pi$ Limit)를 넘지 못하며 유효한 회전정보를 유지하기 위해 2π 마다 주기적으로 리셋(Reset)을 시킨다.

2.2 불감응영역 발생 원인분석

불감응영역(Deadzone)이란 저 입력각속도에서 회전을 감지하지 못하고 영(Zero)을 출력하는 영역을 말한다. 광섬유자이로에서 불감응영역이 발생하는 주요 원인은 세로다인 변조신호($V(t)$)와 광검출 전치증폭기 신호($P_d(t)$)사이에서 발생하는 전기적 교차결합(Electrical Cross-Coupling)이다 [4, 6~7].

전기적 커플링이 발생하는 원인은 주로 변조기 신호와 전치증폭기 사이의 공간적인 전자기 간섭(Electro-Magnetic Interference), 디지털 또는 아날로그 접지 등에서 발생하는 커플링 커패시턴스(Coupling Capacitance)에 의한 것이다. 아주 적은 량의 커플링에 의해서도 자이로 바이어스는 큰 값을 유발한다. 예를 들어 약 1km의 광섬유 고리를 갖는 자이로의 전치증폭기에 20pA의 커플링이 발생 하였다면 이는 1deg/hr의 바이어스를 발생시킨다. 일단 두 신호 사이의 전기적 교차결합에 의해 바이어스가 발생하면 전치증폭기 신호에 왜곡이 생기며 이로 인하여 복조기에서는 입력 회전값에 반대 부호를 갖는 회전값이 생성되어 전체회전량은 영으로 수렴한다. Fig. 3은 신호처리회로에서 발생하는 전기적 교차결합을 나타낸 것이다.

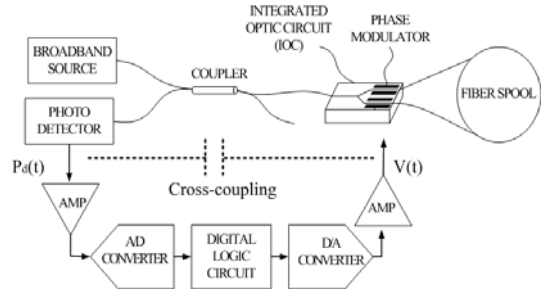


Fig. 3. Electrical cross-coupling of closed-loop FOG

전기적 교차결합 계수가 α 라면 교차결합을 고려한 전치증폭기의 출력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_d(t) = P_0 [1 + \cos(\Delta\phi_R + \Delta\phi_{FB} + \alpha V(t))] \quad (4)$$

$\Delta\phi_R$: Sagnac 위상차[rad]

$\Delta\phi_{FB}$: 피드백 위상차[rad]

α : 전기적 교차결합 계수

$V(t)$: 위상변조기 인가 전압[Volt]

위 수식에서 $\pm\pi/2$ 의 바이어스 변조를 인가하면 복조기 전압(V_{demod})은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_{d1}(t) \approx \frac{P_0}{2} [1 + \cos(\Delta\phi_R + \Delta\phi_{FB} + \alpha V(t) + \pi/2)] \quad (5)$$

$$V_{d2}(t) \approx \frac{P_0}{2} [1 + \cos(\Delta\phi_R + \Delta\phi_{FB} + \alpha V(t) - \pi/2)] \quad (6)$$

$$V_{demod}(t) = V_{d1}(t) - V_{d2}(t) \quad (7)$$

$$\approx P_0 \sin(\pi/2) \sin(\Delta\phi_R + \Delta\phi_{FB} + \alpha V(t))$$

$$\approx P_0 [\Delta\phi_R + \Delta\phi_{FB} + \alpha V(t)]$$

위 수식에서와 같이 교차결합에 의한 신호는 바이어스 값을 유발시킨다. 만약 이 값이 일정기만 하다면 고정바이어스가 되어 불감응영역을 발생시키지 않는다. 그러나 이 바이어스 값은 세로다인 신호의 2π -리셋영역 전후에서 서로 다른 부호의 값을 갖기 때문에 이 값들이 시간에 따라 누적되면 불감응영역을 유발한다. 그림 4는 세로다인 신호의 2π -리셋 영역에 따른 바이어스 변화를 나타낸 것이다.

Fig. 4의 첫 번째 그래프는 회전이 인가되었을 때의 세로다인 신호이다. 2π -리셋에 의해 각각 $\pi/2$ 영역과 $3\pi/2$ 영역이 생성되었다. 첫 번째 그래프에는 A는 변조신호의 양(+)의 전압을 의미하고 B는 음(-)의 전압을 의미한다. 여기에서 양(+)

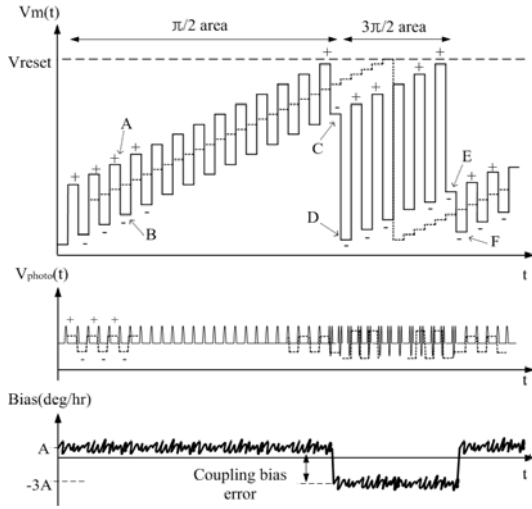


Fig. 4. Bias error due to electrical cross-coupling between serrodyne and photo-amplifier signal

의 전압 또는 음(-)의 전압은 신호의 상승또는 하강에 의해 구분된다. $\pi/2$ 영역에서는 A와 B는 각각 양(+)의 전압과 음(-)의 전압을 갖게 되어 교차결합에 의해 자이로 바이어스는 약 A(deg/hr)의 바이어스를 생성한다. 반면, $\pi/2$ 영역에서 C와 D는 모두 음(-)의 값을 가지므로 바이어스는 반대 부호를 갖게 되고 그 크기는 -3A(deg/hr)가 된다. 이는 $3\pi/2$ 에서의 전압이 $\pi/2$ 구간에 비해 3배 크기 때문에 바이어스 크기도 3배 차이가 난다. 마찬가지로 2π -리셋이 끝나는 구간에서 $\pi/2$ 영역이 생성되면 E와 F도 마찬가지로 모두 음(-)의 값을 갖게 되어 바이어스는 다시 반대가 된다. 이처럼 교차결합에 의한 커플링 바이어스는 양(+)의 값과 음(-)의 값을 교대로 갖게 되어 바이어스의 합은 영이 되어 불감응영역이 발생한다.

커플링 바이어스를 고려하여 불감응영역 바이어스를 살펴보면 다음과 같다. 실제 회전값에 해당하는 위상이 ϕ_R 이고 커플링 바이어스 위상이 각각 ϕ_{eL} ($\pi/2$ 에서의 커플링 바이어스 위상), ϕ_{eH} ($3\pi/2$ 에서의 커플링 바이어스 위상)이라면 $\pi/2$ 또는 $3\pi/2$ 에서의 바이어스 위상은 다음과 같다.

$$\phi_L = \phi_R - \phi_{eL} \quad (\pi/2\text{에서의 바이어스 위상}) \quad (8)$$

$$\phi_H = \phi_R - \phi_{eH} \quad (3\pi/2\text{에서의 바이어스 위상}) \quad (9)$$

디지털 램프 신호의 1주기는 $\pi/2$ 에서의 $3/4$ 주기와 $3\pi/2$ 에서의 $1/4$ 주기로 구성되어 있으므로 바이어스 위상의 평균값은 다음과 같다.

$$N_L = \frac{3}{4} * \frac{\phi_{2\pi}}{\phi_L} \quad (\pi/2\text{에서의 램프 스텝 개수}) \quad (10)$$

$$N_H = \frac{1}{4} * \frac{\phi_{2\pi}}{\phi_H} \quad (3\pi/2\text{에서의 램프 스텝 개수}) \quad (11)$$

바이어스 평균은 디지털 램프 스텝 개수들을 가중치로 하여 커플링에 의해 발생하는 바이어스 불감응영역 값(ϕ_{bias})을 계산하면 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi_{bias} &= \frac{\phi_L \times N_L + \phi_H \times N_H}{N_H + N_L} \quad (12) \\ &= \frac{\phi_{2\pi}}{\frac{3\phi_{2\pi}}{4(\phi_R - \phi_{eL})} + \frac{\phi_{2\pi}}{4(\phi_R - \phi_{eH})}} \\ &= \frac{4(\phi_R - \phi_{eL}) \times (\phi_R - \phi_{eH})}{4\phi_R - 3\phi_{eH} - \phi_{eL}} \end{aligned}$$

예를 들어 $\phi_{eL} = 0.05 \text{deg/hr}$, $\phi_{eH} = -0.15 \text{deg/hr}$ 이면 ϕ_{bias} 는 약 0.2deg/hr 의 불감응영역을 갖는다.

III. 시뮬레이션 및 설계 검증

3.1 교차결합 모델링 시뮬레이션

이제까지 전기적 교차결합으로 인하여 커플링 바이어스가 발생하여 불감응영역을 유발할 수 있음을 확인하였다. 이절에서는 페루프 광섬유자이로의 모델링을 수행하고 커플링 량에 따른 불감응영역의 발생 과정을 시뮬레이션을 통해 살펴본다.

Fig. 5는 광학부와 신호처리를 Matlab/Simulink로 모델링한 것이다. 광학부 모델은 입력각속도(Input Rate), 광학환산계수(OSF; Optical Scale Factor), 광잡음(Band-Limited White Noise), 집적광학소자(IOC)등으로 구성되었다.

신호처리기 모델은 광증폭기 필터, A/D변환기, D/A 변환기 등의 아날로그 모델과 디지털 복조기(Digital Demodulator), 세로다인 발생기(Serrodyne Generator)등의 디지털 모델로 구성되었다. 교차결합 모델은 교차결합의 정도를 나타내는 이득과 고주파 필터(High Pass Filter)로 구성되었다.

Fig. 6에서는 커플링에 의한 바이어스 변화를 개루프 동작을 통해 살펴본 것이다. 임의의 입력각속도(-20deg/hr)를 인가하고, -90dB의 간섭을 주었을 때 $\pi/2$ 구간에서의 커플링 바이어스 값이 입력각속도로 부터 약 +20deg/hr가 증가되어 나타났으며 $3\pi/2$ 구간의 바이어스 값은 입력각속도로 부터 약 -60deg/hr가 감소되어 나타났다.

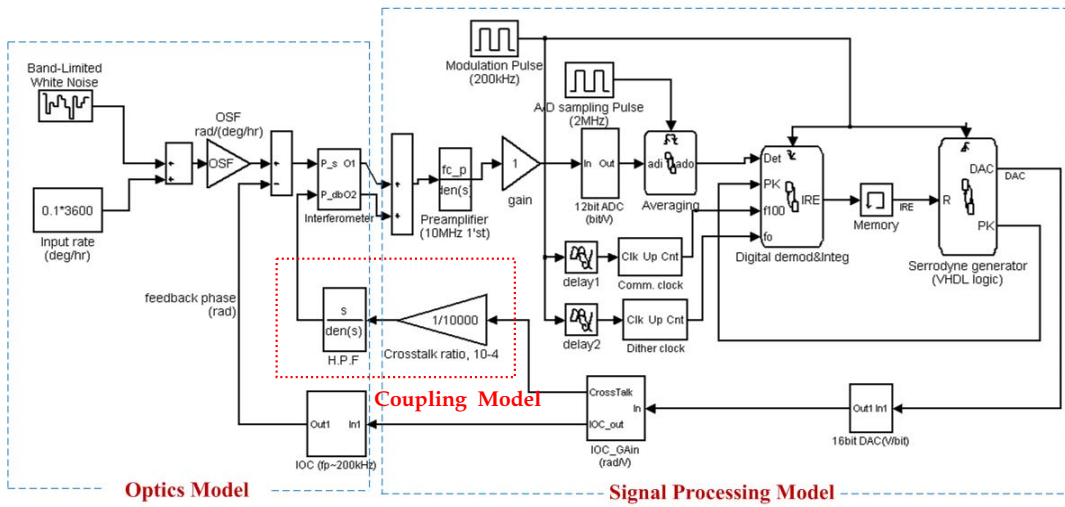


Fig. 5. Modeling of closed-loop FOG optics and signal processing

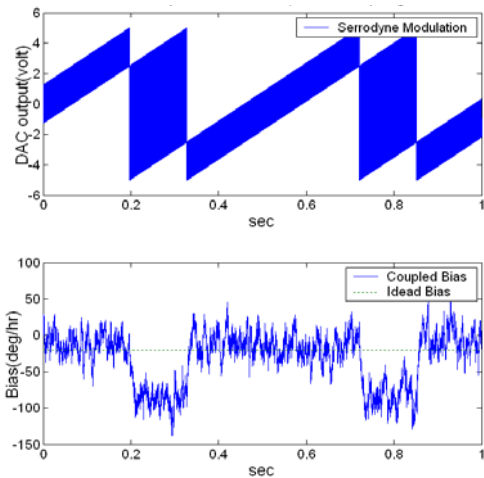


Fig. 6. Open loop bias error when cross-coupling(-90dB) is applied (simulation)

Fig. 6의 시뮬레이션 결과는 앞서 그림 4에서의 설명한 전기적 교차 결합에 의해 발생하는 바이어스 변화와 일치하는 결과임을 알 수 있다.

Fig. 7~9는 폐루프 동작에서 교차결합 정도에 따른 바이어스 특성을 살펴본 것이다. 그림 7은 임의의 입력각속도(100deg/hr)를 인가하고, 커플링을 인가하지 않았을 때의 세로다인 신호와 바이어스를 나타낸다.

커플링이 없으면 바이어스는 세로다인의 변화와 무관하게 정상적인 출력을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 교차결합을 -92dB로 인가하였을 때

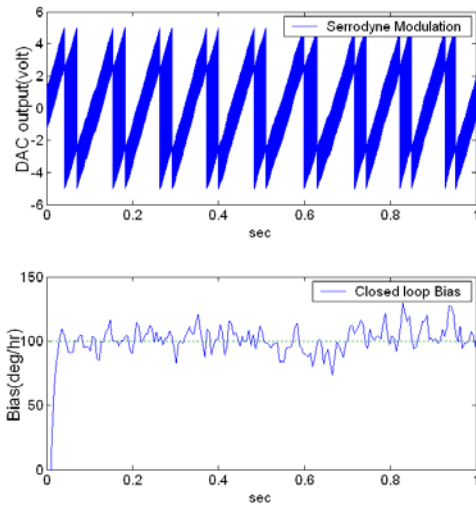


Fig. 7. Closed loop bias error when cross-coupling is not applied (simulation)

에 세로다인 신호(DAC 출력)와 바이어스 변화를 살펴본 것이다. 교차결합에 의해 $\pi/2$ 구간과 $3\pi/2$ 구간에서의 바이어스 값이 변하게 되어 자이로 루프를 통과하면서 자이로 출력이 오실레이션하고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 교차결합을 -86dB로 인가하였을 때의 결과이다. 교차결합이 임계값을 넘어서자 세로다인 신호의 기울기는 더 이상 입력각속도에 반응하지 않고 자이로 바이어스는 영(Zero)을 출력하게 되어 불감응영역이 발생함을 알 수 있다.

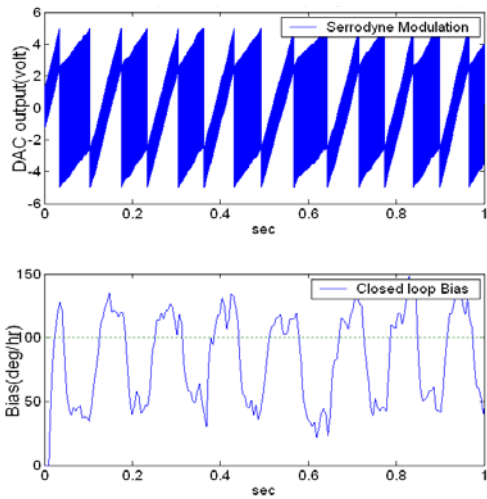


Fig. 8. Closed loop bias error when cross-coupling(-92dB) is applied (simulation)

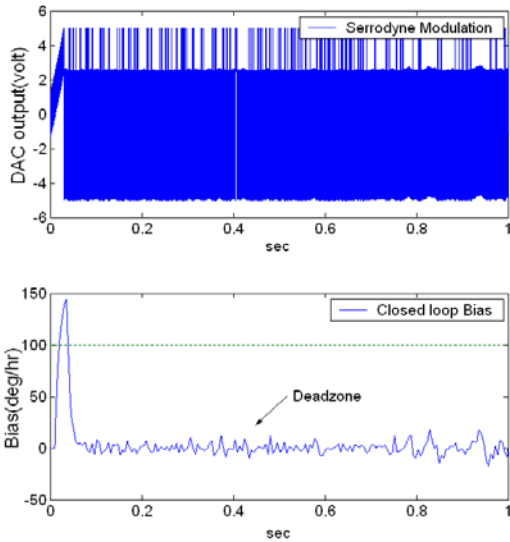


Fig. 9. Closed loop bias error when cross-coupling(-86dB) is applied (simulation)

Fig. 10은 교차결합을 -106dB로 설정한 후 불감응영역을 살펴본 것이다. 약 15deg/hr의 불감응영역이 발생하였으며 양(+)의 방향이 약 10deg/hr, 음(-)의 방향이 약 5deg/hr 나타났다. 이러한 비대칭이 발생한 원인은 변조신호가 $\pi/2$ 구간과 $3\pi/2$ 구간을 갖고 있어 각 구간에서의 영향을 주는 정도(Weighting Factor)가 다르기 때문이다.

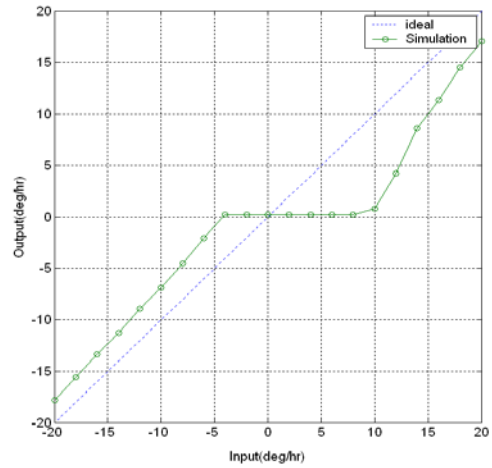


Fig. 10. Deadzone when cross-coupling(-106dB) is applied (simulation)

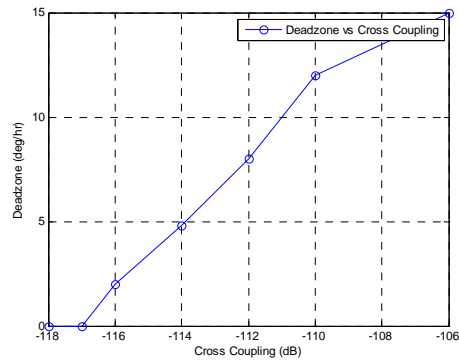


Fig. 11. Deadzone via cross-coupling (simulation)

Fig. 11은 교차결합을 -106dB에서 -118dB로 변화시키면서 불감응영역을 살펴본 것이다. 교차결합이 감소할수록 불감응영역도 작아졌으며 -117dB 이하가 될 때 불감응영역이 없어졌다. 교차결합 -117dB는 변조전압이 3V일 때 광증폭기에 약 4uV에 해당하는 매우 작은 값이며 하드웨어를 구현시 공통 접지나 전원에 의해 흔히 발생할 수 있는 수치이다. 요약하면 -117dB이하의 교차결합을 갖도록 하드웨어를 설계하면 불감응영역은 나타나지 않지만, 현실적으로 매우 어려운 일이며, 이를 극복하기 위한 제거 기법이 필요함을 알 수 있다.

3.2 펄스 디더링 기법

이제까지 페루프 광섬유자이로와 교차결합을 모델링하고, 교차결합에 따른 불감응영역의 결과를 살펴보았다. 이절에서는 불감응영역을 제거하

기 위한 펄스 디더링을 모델링하고 시뮬레이션을 수행한 결과에 대해 살펴본다. 디더링(Dithering)은 작은 민감도에서 감지되지 않는 신호를 큰 신호의 영역으로 이동하므로써 민감도를 향상시키는 방법으로서 일반적인 제어 시스템에 널리 사용되는 방식이다. 또한 유사한 광학식 자이로인 링레이저 자이로에서도 적용하는 방식이며, 링레이저 자이로에서는 기계적인 정현파 회전을 인가하는 반면 광섬유자이로에서는 가상의 크기를 갖는 디지털 펄스를 인가한다.

디더링 기법을 구현할 때 고려해야 할 사항은 임의의 신호가 자이로 출력에 영향을 주지 않아야 된다는 것이다. 즉, 디더신호는 양(+)의 값과 음(-)의 값에 대한 평균이 0이 되어야 바이어스와 잡음을 유발하지 않는다. 페루프 광섬유자이로에서는 디지털 신호처리를 적용하고 있기 때문에 펄스 디더 신호를 디지털로 구현이 가능하고 신호의 듀티 주기(Duty Cycle)를 50:50으로 설정할 수 있어 바이어스나 잡음에 영향을 주지 않는다. Fig. 12는 펄스 디더 신호를 인가한 신호처리 블록도이다.

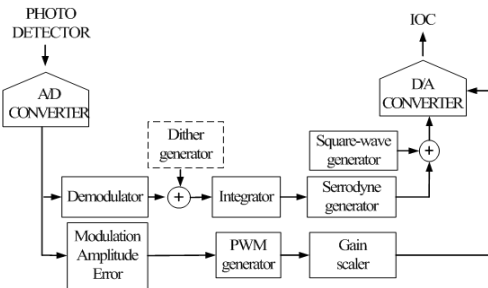


Fig. 12. Closed-loop FOG signal processing with dither generator

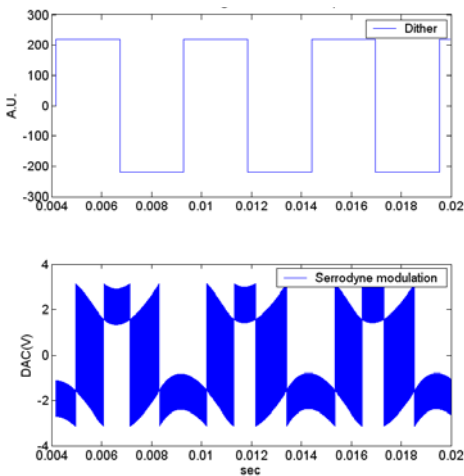


Fig. 13. Pulse dither and Serrodyne modulation(simulation)

Fig. 13은 펄스 디더 신호와 자이로에 펄스 디더를 인가하였을 때 세로다인 변조신호를 나타낸 것이다.

세로다인 신호는 펄스 디더 신호에 따라 기울기가 변하고 있음을 알 수 있다. 또한 펄스 디더의 부호가 변하는 시점에서 기울기가 완만해 지는 현상을 볼 수 있다. 이는 세로다인 신호가 자이로 루프를 통과하면서 자이로 루프의 대역폭에 의해 스무딩 되기 때문에 나타나는 것이다.

Fig. 14는 디더를 적용하여 디더 주파수, 디더 진폭, 자이로 루프 이득에 따른 불감응영역 시뮬레이션 결과이다. 각각의 그래프는 3 개의 변수 중 2개를 고정시킨 상태에서 측정한 결과이다. 첫 번째 그래프는 디더 진폭을 2.8deg/sec, 자이로 루프 이득을 8(a.u)로 고정시킨 경우이며, 두 번째 그래프는 디더 주파수를 100Hz, 자이로 루프 이득을 8(a.u)로 고정시킨 경우이고, 세 번째 그래프는 디더 진폭을 2.8deg/sec, 자이로 루프 이득을 8(a.u)로 고정시킨 경우이다.

디더 주파수는 작을수록 디더 효과가 크게 나타났다. 이는 디더 주기가 길어지면 펄스 디더의 부호가 교차하는 시점이 멀어져 Fig. 13에서 살펴본 세로다인 신호의 스무딩 효과가 적게 영향을 주기 때문이다. 디더 진폭의 경우 클수록 디더 효과가 크게 나타났으며 디더 신호의 일반적인 경향을 알 수 있다. 자이로 루프 이득의 경

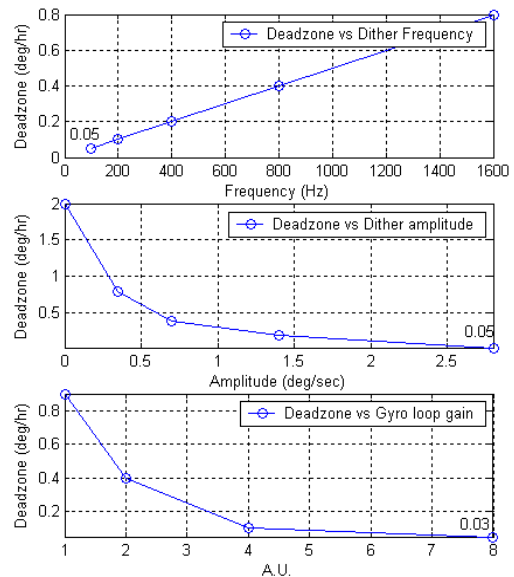


Fig. 14. Deadzone as dither frequency, amplitude, and gyro loop gain (simulation)

표 1. 디더 최적 설계값(시뮬레이션, 900m 광섬유 고리 적용)

디더 설계 변수	최적값
Dither frequency	100Hz
Dither amplitude	2.8 deg/sec
Gyro loop gain	8 (a.u)

우 이득이 클수록 불감응영역이 디더 효과가 크게 나타났으며 이는 디더 주파수의 경우와 동일한 원리로서, 루프 이득이 클수록 자이로 대역폭이 커져서 세로다인 신호의 스무딩 효과 작아지기 때문이다.

세 개의 그래프 결과를 요약하면 디더 주파수는 작을수록, 디더 진폭과 자이로 루프 이득은 클수록 디더 효과가 높음을 알 수 있다. 표 1은 Fig. 14의 시뮬레이션 결과로부터 얻어진 디더 최적 설계값을 요약한 것이다.

3.3 설계 검증 시험 및 결과

이제까지 모델링/시뮬레이션을 통하여 교차결합으로 인한 불감응영역의 발생 과정, 교차결합 정도 및 디더 변수에 따른 불감응영역의 크기를 살펴보았다. 이절에서는 실제 광섬유자이로 시스템을 구성하여 교차결합에 의한 개루프 바이어스 결과를 측정하고 시뮬레이션을 통해 얻어진 디더 최적 설계값을 실제 시스템에 적용한 결과에 대해 살펴본다. Fig. 15는 900m 광섬유고리를 갖는 3축 광섬유자이로 프로토타입 시스템을 구성한 형상이다.

Fig. 16은 광섬유자이로의 신호처리기에 매우 느린 임의의 세로다인 신호를 인가하였을 때 광 출력으로 얻어진 개루프 자이로 출력이다. 개루프 자이로 출력은 고정 바이어스를 중심으로 $\pi/2$ 구간에서는 약 0.8deg/hr의 바이어스가 발생

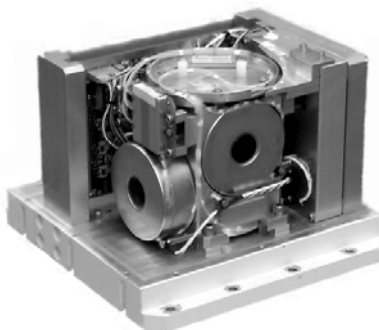


Fig. 15. 3-axis FOG prototype

표 2. 3축 광섬유자이로 프로토타입 구성

설계 변수	구 성
광섬유 고리	900m
광원	Er-doped 1550nm fiber source
광검출기	InGaAs 1550nm photodiode
위상 변조기	Integrated optic circuit
신호처리	Digital closed-Loop

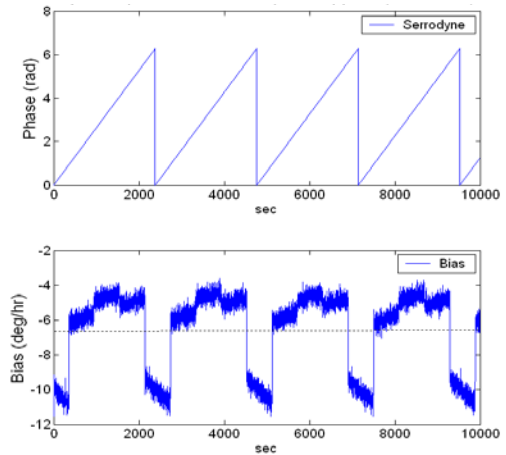


Fig. 16. Open loop bias error when serrrodyne is applied (experiment)

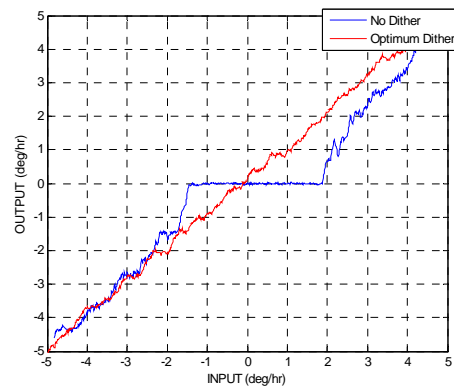


Fig. 17. Deadzone with and without pulse dither(experiment)

하였으며, $3\pi/2$ 구간에서는 약 -2.4deg/hr의 바이어스가 발생하였다. 이는 앞서 기술한 교차결합에 의해 발생한 개루프 바이어스 오차(그림 4, 그림 6)와 일치하는 결과이다. Fig. 16에서 얻어진 개루프 바이어스 오차를 그림 11의 시뮬레이션 결과와 비교하여 추정하면 약 -115dB의 교차

결합이 존재함을 알 수 있다.

Fig. 17은 표 1에서 얻어진 디더 최적 설계값을 적용하기 전후의 결과를 나타낸다. 디더를 인가하지 않았을 때는 약 3.2deg/hr가 나타났으나 디더 최적값을 적용한 결과 불감응영역이 완전히 제거되었음을 확인 할 수 있었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 불감응영역 제거를 위한 이론적 분석과 모델링/시뮬레이션, 그리고 디지털 펄스 디더링 기법을 도입한 결과를 소개하였다. 불감응영역의 발생원인은 세로다인 신호와 광검출기 사이의 전기적 교차결합임을 확인하였으며 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 불감응영역을 제거하기 위해 펄스 디더 기법을 도입하였으며 시뮬레이션을 통하여 디더 주파수, 디더 진폭, 자이로 대역폭에 따른 결과와 최적 설계값을 도출하였다. 3축 자이로 프로토타입을 구성하여 시뮬레이션 결과와 비교한 결과, 교차결합에 의한 바이어스 오차가 유사하게 나타났으며, 시뮬레이션으로부터 얻어진 펄스 디더의 최적 설계값을 적용하여 불감응영역을 살펴본 결과 불감응영역이 완전히 제거되었음을 확인 할 수 있었다.

향후 불감응영역을 보다 효과적으로 제거하기 위해서는 전기적 교차결합을 최소화 하는 하드웨어 설계기술과 디더 신호가 스무딩 되지 않도록 자이로 루프 내에서 보정하는 기술이 필요할 것으로 판단된다.

참고 문헌

- 1) H. C. Lefevre, "Fiber Optic Gyroscope", Artech House, 1993.
- 2) H. C. Lefevre, "Fundamentals of the Interferometric Fiber-Optic Gyroscope", SPIE Vol. 2837, 1996.
- 3) G. A. Sanders, et al., "Fiber Optic Gyros for Space, Marine and Aviation Applications", SPIE Vol. 2837, 1996.
- 4) George A. Pavlath, "Closed-loop fiber optic gyros", SPIE Vol. 2837, 1996.
- 5) Michael S. Bielas, "Stochastic and dynamic modeling of fiber gyros", SPIE Vol. 2292, 1994.
- 6) G. Spahlinger, "Error Compensation via Signal Correlation in High Precision Closed-Loop Fiber Optic Gyros", SPIE Vol.2387, 1996.
- 7) Robert A. Kovacs, "Fiber Optic Gyroscope with Reduced Non-linearity at Low Angular Rates", 21st Annual AAS Guidance and Control Conference, AAS 98-043, 1998.
- 8) 정경호 외, "페루프 광섬유자이로의 불감응영역 오차 감소를 위한 모델링 시뮬레이션", 제 14차 유도무기 학술회의, 2007. 11.
- 9) 도재철, "디지털 페루프 신호처리를 적용한 광섬유 자이로 설계 및 성능평가", 한국항공우주학회, 제 34권 9호 pp. 97~103, 2006. 9.