

論文

디지털 폐루프 신호처리를 적용한 광섬유 자이로 설계 및 성능평가

도재철*, 정경호*

Design and Performance Evaluation of Fiber Optic Gyro
with Digital Closed-loop Processing

Jae-Chul Do* and Kyoung-Ho Chong*

ABSTRACT

This paper described the design and performance evaluation of fiber optic gyro using digital closed-loop processing. For the feedback to null the gyro input rate, digital serrodyne modulation was employed, and for scale factor stabilization, the control circuits of modulation amplitude and optical power are implemented. Performance tests show that prototype fiber optic gyro has bias stability of 0.34 deg/hr, scale factor non-linearity of about 100ppm, and maximum measurement range of ± 500 deg/sec.

초 록

본 논문에서는 디지털 폐루프 신호처리를 이용한 광섬유자이로를 설계하고 성능 시험한 결과를 제시하였다. 회전 입력에 대한 자이로의 피드백 제어를 위해 디지털 세로다인 변조기법이 적용되었고, 환산계수의 안정화를 위해 변조진폭 및 광전력 제어회로를 설계하였다. 프로토타입 광섬유자이로를 시험한 결과, 바이어스 안정도 0.34 deg/hr, 환산계수 비선형도약 100ppm, 회전감지 영역 ± 500 deg/sec의 성능을 얻었다.

Key Words : Fiber Optic Gyro(광섬유자이로), Scale Factor Stability(환산계수안정도), Digital Serrodyne Modulation(디지털 세로다인 변조)

1. 서 론

광섬유자이로는 레이트를 측정하는 관성센서로서 링 레이저 자이로(RLG)와 더불어 대표적인 광학식자이로로 널리 알려져 있다. 1980년대 초에 "Sagnac효과"의 원리를 바탕으로 광섬유자이로가 처음 개발되었으며 1990년대에 이르러 자이로의 시제품이 세계 여러 나라에서 개발되어왔다 [1]. 1990년대 초에는 차량이나 유도조종에 쓰이는 100 deg/hr급 자이로가 개발되었으며 1990년대

중반부터 말까지 1deg/hr급과 항범용인 0.1deg/hr급 자이로가 개발되었다. 2000년대에 이르러 우주선 탐사용 고정밀 자이로(약 0.001deg/hr급)가 실험실 수준에서 개발되었으며, 점차 링레이저 자이로를 대체하는 추세에 있다[2][3]. 광섬유자이로는 기존 기계식 자이로에 비해 제작공정이 단순하고 소형이며 움직이지 않는 부품으로 구성되어 있다. 또한 적용되는 대부분의 광학부품들이 약 10년 이상 장시간 동안 고 신뢰성을 갖으며 통신용 부품들로 이루어져 있어 저가격으로 대량생산이 가능한 장점을 갖고 있다. 광섬유자이로는 신호처리 방식에 따라 개루프 방식과 폐루프 방식으로 나뉜다. 개루프 방식은 전광섬유 구조(All fiber configuration)를 갖으며, 저급 자이로에 주로 쓰이는 방식이다. 이 방식은 회전속

† 2006년 6월 16일 접수 ~ 2006년 8월 23일 심사완료

* 정회원, 국방과학연구소

연락처, E-mail : lenardo@add.re.kr

대전시 유성구 유성우체국 사서함 35-5호

정범위가 약 500 deg/sec이하로 제한되어 있으며 환산계수 비선형도가 수 퍼센트에 이른다. 페루프 방식은 중급이나 고급 자이로 개발에 널리 쓰이는 방식이다. 이 방식은 자이로 출력을 항상 0인 지점으로 유지시키기 때문에 1000deg/sec 이상의 높은 입력 레이트에도 비선형 오차가 수백 ppm에 이른다[4]. 본 논문에서는 광섬유자이로에 적용 가능한 디지털 페루프 신호처리기의 설계와 연구용 프로토타입의 제작 및 시험 결과에 대해 기술하였다.

II. 광섬유자이로 원리 및 구성

2.1 광섬유자이로의 원리

광섬유자이로의 광섬유 고리에 회전이 인가되면 서로 반대방향으로 회전하는 두 빛 사이에 경로차가 발생하며 이를 이용해서 회전각속도를 측정한다. 이것을 사낙효과(Sagnac effect)라 하며 이를 이용하여 회전 각속도를 검출한다.

광학부에서 레이트를 감지하는 부분은 광학환산계수(Optical scale factor)에 의해 결정되는데 이들의 관계식은 다음과 같다.

$$\Delta\phi_R = \frac{2\pi LD}{\lambda c} \cdot \Omega = K_{sf} \cdot \Omega \quad (1)$$

$\Delta\phi_R$: 사낙(Sagnac) 위상 [rad]

L : 광섬유 길이 [m]

D : 광섬유 고리의 직경 [m]

λ : 광원의 중심파장 [m]

c : 진공중에서 광속 [m/sec]

Ω : 광섬유 고리의 회전속도[deg/sec]

K_{sf} : 광학환산계수(Optical scale factor : OSF)

전형적인 중급 광섬유자이로의 경우, 광섬유길이가 200m, 고리평균직경이 4cm, 중심파장이 1550nm일 때 광학환산계수(K_{sf})는 대략 0.11sec 정도가 되며 편의상 mrad/deg/sec의 단위로 표현하면 1.88 mrad/deg/sec이다. 최대 입력 레이트는 $\pm\pi/2$ 에 해당하며 이는 약 ± 830 deg/sec에 해당한다.

2.2 광학부 구성

광섬유자이로 광학부는 빛을 발생시키는 광원, 두 빛을 합하거나 한 빛을 두 갈래로 만드는 광결합기, 빛의 위상을 변조시키는 집적광학소자, 편광유지 광섬유 고리 및 광 신호를 출력하는 광

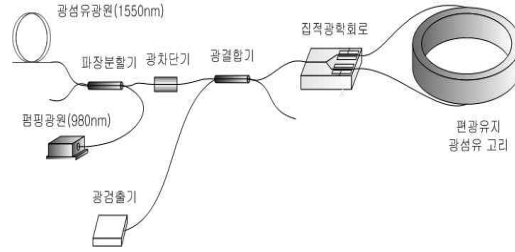


Fig. 1. FOG Optics Configuration

검출기 등으로 Fig. 1과 같이 구성된다.

광섬유자이로의 시스템 개발규격은 광학부에 의해 결정되며 주요 설계 변수는 광섬유의 길이, 광원의 파장, 광섬유 고리직경, 피드백 저항(광 신호를 전압으로 변환해주는 저항) 등이다. 이러한 변수들에 의해 식(2)와 같이 광섬유자이로의 잡음(N)이 결정된다[5].

$$N = \frac{\sqrt{2} \lambda c}{2\pi LD} \sqrt{\frac{4kT}{R} + 2e\eta I_0 \cos^2(\phi_m/2) + K\eta^2 I_0^2 \tau_c \cos^4(\phi_m/2)} \quad (2)$$

unit : [rad/ \sqrt{Hz}]

위 수식에서 k 는 볼츠만 상수, T 는 절대온도, R 은 전치증폭기의 피드백 저항값, e 는 전자 전하량, η 는 광검출기의 효율, I_0 는 광검출기에 도달하는 빛의 세기, ϕ_m 은 변조진폭, τ_c 는 광원의 가간섭 시간이다. 본 논문에 적용된 프로토타입 광섬유자이로의 설계 변수를 적용하여 잡음을 계산하면 다음과 같다.

즉, $\phi_m = 1.67\text{rad}$, $L = 503\text{m}$, $I_0 = 1\mu\text{W}$, $D = 90\text{mm}$, $R = 200\text{k}\Omega$, $\tau_c = 4 \times 10^{-13}\text{sec}$, $\eta = 0.9$, $K = 2$ (편극유지 광섬유의 경우)을 대입하여 N 을 구하고 이를 환산하면, 잡음은 약 0.01deg/hr에 해당한다.

이 정도의 수치는 1시간에 약 0.1도의 바이어스 오차를 갖는 0.1deg/hr급 자이로를 설계함에 있어서 통상적으로 설계 가능한 수치이며, 광섬유 고리의 굴절률이나 광학회로의 편광특성 등에 의한 바이어스 드리프트 특성을 배제한다면 0.1deg/hr급 광섬유자이로 개발이 가능하다[1]. 선진국에서의 설계 예를 보면 1990년대에 약 1000m의 광섬유 고리로부터 0.1deg/hr급 자이로를 개발하였으며, 이후 광학회로 특성을 개선하여 현재에서는 약 500~700m의 광섬유를 적용하고 있다[3].

2.3 디지털 페루프 신호처리부 구성

디지털 페루프 신호처리부는 광출력을 증폭하

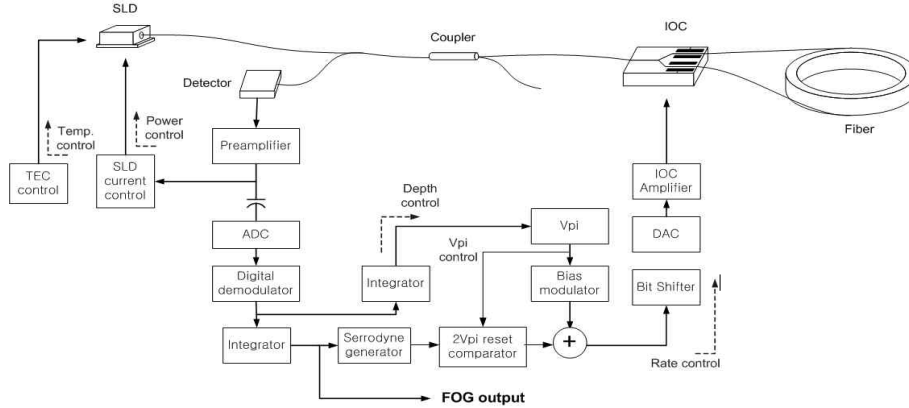


Fig. 2. Digital Closed-loop Signal Processing Configuration

는 광 검출기/증폭기, 광원에 일정한 전류를 공급하는 광원구동회로, 레이트를 제어하여 피드백 신호를 발생시키는 디지털 복조기, ADC, DAC 및 IOC 구동회로로 구성되며 아래 Fig. 2와 같다 [6].

광 검출기 증폭회로를 통과한 자이로 출력신호는 A/D변환기를 통과해 디지털 값으로 변환된다. 이 값은 디지털 적분기를 통해 누적되며 복조기의 입력으로 전달된다. 디지털 적분기는 A/D변환기의 출력을 임의의 구간에 대해 누적함으로써 저역통과필터와 유사한 역할을 한다

디지털 복조기(Digital demodulator)는 레이트 값을 검출하는 부분이며 변조기에서 $3\pi/2$ 변조 신호가 발생할 경우에는 변조진폭 오차 값이 검출된다. 적분기(Integrator)는 전체 루프의 제어기 역할을 하는 부분이며, 세로다인 발생기(Serrodyne generator)는 자이로 출력 값을 적분함으로써 레이트에 비례한 디지털 톱니파를 형성한다. 톱니파는 2π 마다 주기적으로 리셋을 수행하며, D/A 변환기의 범위는 $3\pi/2$ 의 변조신호와 2π 리셋을 감안할 때 신호왜곡이 발생하지 않기 위해서 $\pm 2\pi$ 범위로 설정되었다.

제어루프로서 자이로 출력 되먹임 제어루프(Rate control)는 자이로 출력을 IOC에 다시 되먹임하여 출력의 선형성을 향상시키는 역할을 하고, 변조 진폭 제어루프(Depth control)는 온도에 관계없이 일정한 IOC 변조진폭을 유지하기 위해서 변조 진폭 오차를 되먹임 하여 저온 또는 고온에서 MIOC에 인가되는 전압($V\pi$)을 변화시켜 일정한 변조진폭을 유지한다. 또한 광 전력을 온도에 관계없이 항상 일정하게 유지시키기 위해, 광 전력 되먹임 제어루프(Power control)와 온도 제어루프(Temp. control)가 있다.

III. 디지털 세로다인 알고리즘

3.1 바이어스 변조

광섬유자이로의 출력은 입력 레이트에 대해 코사인 응답을 갖는다. 따라서 저 입력 레이트에서의 민감도(sensitivity)는 매우 낮으며, 이 지점에서 자이로가 동작하게 되면 레이트 변화에 대한 신호의 응답은 불규칙적이고 선형성이 떨어진다. 이러한 문제는 $\pi/2$ 만큼 바이어스 위상을 인가시켜 자이로 출력을 사인응답으로 변환함으로써 해결된다. 바이어스 위상을 인가하는 방법으로는 $\pm \pi/2$ 크기를 갖는 구형파를 인가하는데, 입력 레이트가 변하면 반주기 마다 구형파 신호의 진폭이 변하기 때문에 그 차이를 이용하여 레이트 정보를 얻는다. 일단 레이트 정보가 얻어지면 페루프 시스템의 오차를 줄이기 위해 적분기를 통과하게 되고 이 값은 IOC를 통해 피드백하게 된다. 구형파를 인가할 때의 신호응답이 Fig. 3에 나타나 있다. 그림에서 ①-②의 차이 값이 레이트 변화량이며 이를 수식으로 표현하면 아래와 같다. 광학루프를 통과하여 광 검출기에 입사된 광전력(Optical power)이 P_0 라면, ϕ_b 의 위상 바이어스를 인가하고 복조기를 통과하면 다음과 같다.

P_0 가 일정할 경우 복조기 출력신호($P_{rate\ error}$)는 입력 레이트에 비례하여 나타나며 이 신호를 누적함으로써 세로다인 신호가 생성되어 위상변조기에 인가된다.

$$P_{d1} = P_0 [1 + \cos(\Delta\phi_R + \phi_b)] \tag{3}$$

$$P_{d2} = P_0 [1 + \cos(\Delta\phi_R - \phi_b)] \tag{4}$$

$$P_{rate\ error} = P_{d1} - P_{d2} = 2P_0 \sin\phi_b \sin\Delta\phi_R \tag{5}$$

$$\approx 2P_0 \phi_R, (\phi_b = \frac{\pi}{2})$$

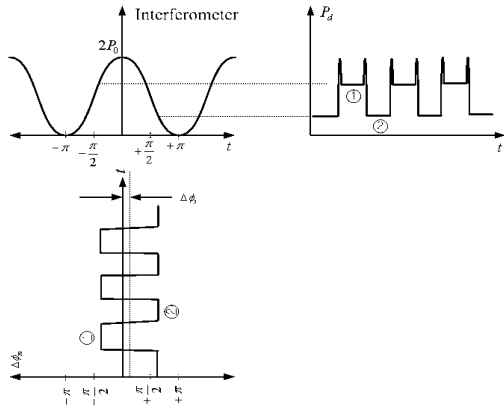


Fig. 3. Gyro Responses for Input Rate by Bias Modulation

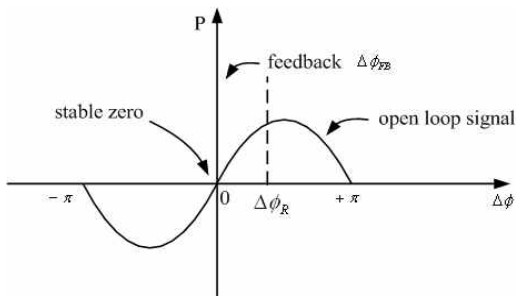


Fig. 4. Principle of Closed-loop FOG

위상변조기는 광섬유고리에 따른 광경로 시간차에 대해 미분기로 동작하기 때문에 적분된 세로다인 신호를 인가하여야만 입력 레이트에 비례한 값을 상쇄시킬 수 있다.

복조기 출력의 광위상 신호에 피드백 신호 ($\Delta\phi_{FB} = -\Delta\phi_R$)를 인가하고 P_0 를 항상 일정하게 유지하면 자이로는 항상 레이트 값이 0부근에서 동작한다. Fig. 4는 광섬유자이로의 폐루프 동작원리에 대해 나타낸 그림이다.

3.2 4-state 변조 기법

자이로의 환산계수 안정성에 가장 큰 영향을 주는 요소는 광전력, 광파장, 그리고 위상변조기 (IOC)의 변조진폭이다. 이중 변조진폭의 변화는 온도에 따른 광-위상계수의 민감도에 의해 환산계수 오차에 영향을 준다. 따라서 이 값을 온도에 따라 자동으로 변화시키는 기법이 필요하다. 변조진폭오차를 제어하는 알고리즘으로서는 가장 널리 알려진 방법이 $\pm 3\pi/2$ 의 신호를 인가하는 기법이다[6][7].

간섭계의 출력은 코사인함수로서 0을 중심으로

좌우가 대칭이므로 $+\pi/2, -\pi/2$ 의 신호만으로는 변조진폭이 변하여도 간섭계 출력은 동일하게 나타나기 때문에 변조진폭의 변화량을 얻을 수 없다. 그러므로 $+3\pi/2, -3\pi/2$ 변조신호를 넣어주면 자이로 출력은 $\pi/2$ 위치와 $3\pi/2$ 위치에서 서로 다른 기울기를 갖기 때문에 변조진폭 오차를 검출할 수 있게 된다.

4-state 변조 기법은 앞서 기술한 변조진폭 오차를 제어하기 위해 위상변조기에 $+\pi/2, -\pi/2$ 를 인가하는 대신에 $+\pi/2, -\pi/2, +3\pi/2, -3\pi/2$ 의 4 종류의 상태 값을 인가하는 방식을 말한다. Fig. 5는 변조진폭 오차가 발생하였을 때의 자이로 출력을 나타낸 것이다. 그림에서 변조진폭 오차는 ①+②-③-④이며 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$P_{d1} = P_0 [1 + \cos(\frac{\pi}{2} - \delta\phi_m)], \tag{6}$$

$$P_{d2} = P_0 [1 + \cos(-\frac{\pi}{2} - \delta\phi_m)]$$

$$P_{d3} = P_0 [1 + \cos(\frac{3\pi}{2} - \delta\phi_m)], \tag{7}$$

$$P_{d4} = P_0 [1 + \cos(-\frac{\pi}{2} - \delta\phi_m)]$$

$$P_{mod\ error} = P_{d1} + P_{d2} - P_{d3} - P_{d4} = 4P_0 \sin\delta\phi_m \tag{8}$$

또한, 광출력 오차는 다음과 같다.

$$P_{optical\ power} = P_{d1} + P_{d2} + P_{d3} + P_{d4} = 4P_0 \tag{9}$$

한편, 디지털 세로다인 신호가 IOC를 구동하는 전압은 한계치를 갖기 때문에 세로다인 신호는 주기적으로 리셋을 시켜야 한다. 이 경우 램프 신호에 먼저 V_π 를 비교한 후 $2V_\pi$ 를 빼거나

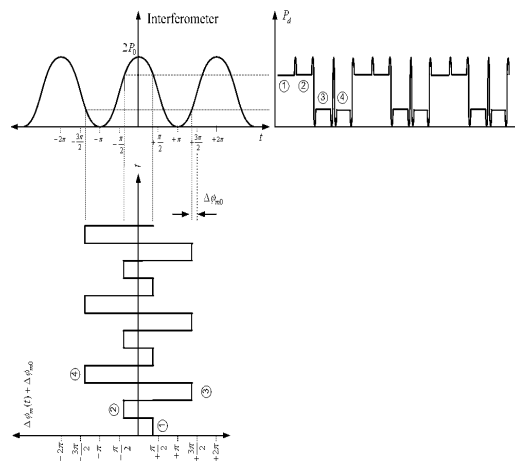


Fig. 5. FOG Output by Modulation Depth Error

더한 값과 4-state의 합을 IOC에 인가한다. 레이 트 입력을 $x(n)$ 이라 하고, 램프신호를 $y(n)$ 이라 하면, 세로다인 리셋은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{if } y(n) > V_{\pi} + \delta V_{\pi}, \quad y(n) &= y(n) - 2V_{\pi} \\ \text{else } y(n) < -V_{\pi} - \delta V_{\pi}, \quad y(n) &= y(n) + 2V_{\pi} \end{aligned} \quad (10)$$

여기에서 δV_{π} 는 잡음의 변화에 의해 여러 번 리셋이 발생하지 않도록 넣어준 값이다.

3.3 레이 트 제어루프 모델링

광섬유 자이로에 대한 제어루프의 모델링/시뮬레이션은 Matlab/simulink를 이용하였으며, Fig. 6과 같이 연속신호와 이산신호가 혼재되어 있는 모델을 간소화된 연속 신호모델(Simplified model)을 구성하여 각 모델에 대해 대역폭을 살펴보았다. 각 모델 블록의 전달함수를 구해보면 다음과 같다[8].

$$G(z) = \frac{K_1 K_2 K_3 K_4 T}{z-1}, \quad H(z) = K_5 K_6 K_7 \quad (11)$$

$$\frac{C(z)}{R(z)} = \frac{G(z)}{1 + G(z)H(z)} \quad (12)$$

이 전달함수는 이산신호에 대한 전달함수를 z-변환으로 표현한 것이며 Rectangular integral rule($\frac{T}{z-1} = \frac{1}{s}$)을 적용하면 연속신호로 근사화하여 Laplace 변환으로 표현할 수 있다.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} = K_{G1} \frac{P_1}{s + P_1} \quad (13)$$

$$K_{G1} = \frac{1}{K_5 K_6 K_7}, \quad P_1 = K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_7$$

여기서 $K_1=1[\text{V/rad}]$, $K_2=1/2^{12}[\text{bit/V}]$, $K_3=2 \cdot 16[\text{bit/bit}]$, $K_4=250,000[\text{bit/bit}]$, $K_5=1/2^8[\text{bit/(bit*sec)}]$, $K_6=1/2^{16}[\text{V/bit}]$, $K_7=4\pi[\text{rad/V}]$, $T=4\mu\text{sec}$ 이고, 이를 식(13)에 대입하면

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{3.277 \times 10^{10}}{s + 2.454 \times 10^4} \text{ 가 되며,}$$

대역폭은 $f_{BW} = \frac{P_1}{2\pi} = 3906.3[\text{Hz}]$ 이다. Fig. 6의 모델을 이용하여 시뮬레이션을 수행하고 실험치와 비교해 보았다.

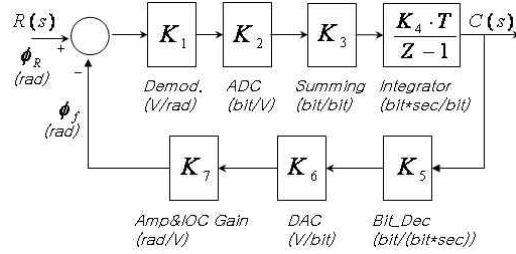


Fig. 6. FOG Control Loop

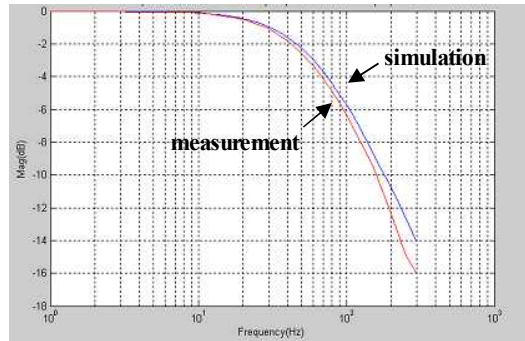


Fig. 7. FOG Bandwidth simulation

실제 실험에는 자이로 출력에 사인파를 더해서 살펴보았으며, 실험장치의 데이터 획득 대역폭이 낮아 이득을 1/64로 낮추어 실험하였다. Fig. 7에서의 결과를 살펴보면 루프이득을 1/64로 낮춘 자이로 제어루프 대역폭의 계산치는 60.44Hz이며 실제 측정 결과는 55Hz로 나타나 유사한 값을 얻었다.

IV. 프로토타입 제작 및 시험 결과

본 연구에서는 디지털 페루프 신호처리를 적용한 프로토타입 광섬유자이로를 제작하였다. Fig. 8과 같이 신호처리기 하드웨어는 광검출 증폭기 및 광원 제어부 등의 아날로그 보드와 디지털 데이터 처리를 위한 FPGA 및 DSP 등의 디지털 보드로 구성되었다. 변복조기 입출력부의 A/D 및 D/A변환기는 각각 14-bit, 16-bit로 구성되었으며, 디지털 세로다인 로직은 20만 게이트급 FPGA로 구현되었다. 자이로의 신호를 보정하고 필터링하는 역할은 TI사의 DSP(TMS320C6711)를 이용하였으며 1MHz의 SDLC통신을 수행하였다.

Fig. 9는 광학부와 전자부 결합 후 자이로의 바이어스를 측정된 결과로서 8kHz의 샘플링 데이터를 400Hz 전송속도로 100초 평균을 약 10시간 동안 획득한 것이다. 데이터의 평균은 그 수에 따라 바이어스 안정도가 작아지는데, 잡음을

충분히 제거하고, 바이어스 안정도를 살펴 볼 수 있을 정도로 설정하였다. 바이어스 안정도는 0.094deg/hr이었으며, 유사한 광섬유 길이를 갖는 외국 제품과 비교할 때 비교적 양호한 값을 얻었다.

잡음은 약 0.02deg/√hr를 얻었다. 이 수치는 이론치인 0.01deg/√hr보다 약2배 정도 큰 값이며 이는 전치증폭기 출력을 A/D변환할 때 샘플링 갯수가 충분치 않아 커진 것으로 판단된다. 실제로 샘플링 위치는 전치증폭기 신호의 끝부분에서 수행되고 있으며 이는 사각파 신호의 기울기로 인한 왜곡을 피하기 위해서이다. 향후 샘플-홀드(S/H)를 이용하여 이러한 왜곡을 최소화 하

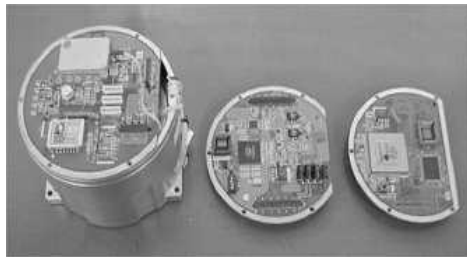


Fig. 8. Prototype FOG Signal Processing Hardware

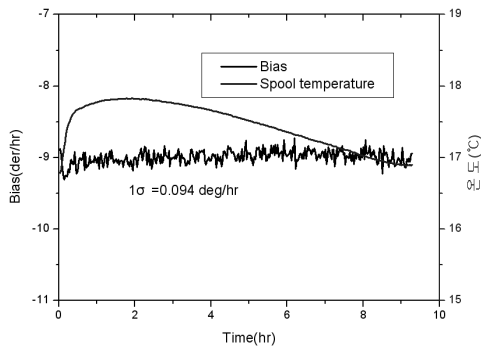


Fig. 9. Bias Stability(Room Temperature)

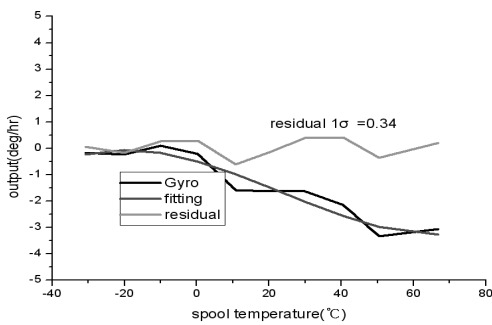


Fig. 10. Bias Temperature Stability

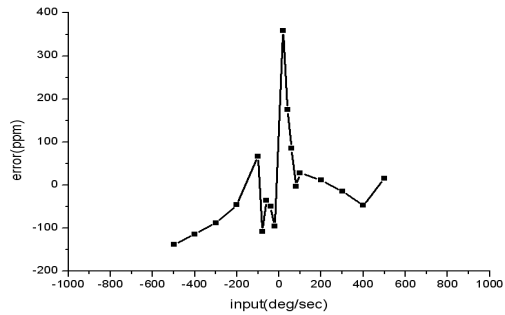


Fig. 11. Scale Factor Non-linearity

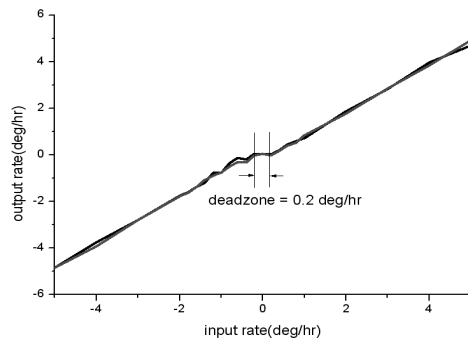


Fig. 12. Deadzone

고 A/D변환기 앞단에서 충분히 필터링을 한다면 이론치에 근접한 잡음을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 10은 온도 변화(-30~70°C)에 따른 바이어스를 나타낸다. 시험결과 온도에 따라 약 0.03deg/hr/°C의 변화율이 나타났고, 저온에 비해 고온에서 변화가 심하게 나타났는데 이는 광섬유 고리에 적용된 에폭시에 의한 영향이 크게 작용한 것으로 추정된다. 3차 피팅을 수행하고 남은 오차값(1σ)은 약 0.34 deg/hr이다. 자이로의 최대 회전측정 범위는 약 ±500deg/sec였으며 환산계수 비선형도는 약 100ppm(1σ)으로 비교적 양호하게 나타났다(Fig. 11).

불감응영역(Deadzone)은 -5deg/hr~+5deg/hr 범위에서 측정하였으며, 약0.2deg/hr로 나타났다(Fig. 12). 이는 세로다인 신호를 발생하는 변조신호와 광검출기 입력신호 사이에 전기적 커플링에 의해 발생하며, 이 커플링으로 인해 세로다인 신호는 리셋 되지 않고 오실레이션 되기 때문에 나타난다. 특히 불감응영역의 크기는 광섬유 고리의 길이에 따른 적정주파수(Proper frequency)와 변조주파수(Modulation frequency)와의 차이에 비례하게 나타났으며 이는 쿼드러처 바이어스(Quadrature bias)를 증가시켜 저 입력 레이트에

서 바이어스 드리프트를 크게 만들기 때문이다. 불감응영역은 디지털 디더 알고리즘이나 랜덤변조방법 등을 적용함으로써 해결이 가능하다.

V. 결 론

본 논문에서는 디지털 페루프 신호처리방법을 적용하여 광섬유자이로를 설계하고 프로토타입을 제작 및 시험한 결과에 대해 기술하였다. 자이로의 바이어스와 환산계수 특성을 개선하기 위해 레이트 제어기, 광원 및 변조진폭 안정화 제어기를 개발하였으며, $+\pi/2$, $-\pi/2$, $+3\pi/2$, $-3\pi/2$ 의 4-state 변조패턴을 도입하여 온도에 따른 진폭오차를 자동으로 보정하였다.

제작된 프로토타입 광섬유자이로를 시험한 결과, 최대입력각속도 $\pm 500\text{deg/sec}$ 에서 약 100ppm의 비선형 오차와 상온에서 0.094 deg/hr의 바이어스 안정도와 전 온도구간에 대해 약 0.34deg/hr의 바이어스 오차, 그리고 약 0.2deg/hr의 불감응 영역이 측정되었다. 온도에 대한 바이어스 오차의 주요 원인은 광섬유고리에 적용된 예폭시의 온도 변화 때문이며, 향후 예폭시에 따른 온도변화 및 히스테리시스 특성 등의 개선연구가 필요하다. 또한 불감응 영역은 전기적 간섭 등에 의해 나타나는 현상으로서 거의 모든 광섬유자이로에서 발생하는 오차이다. 이를 해결하기 위해서는 구형파 디더(Square-wave dither) 알고리즘이나 랜덤 변조(Random modulation) 등을 적용함으로써 개

선될 것으로 판단된다.

참고문헌

- 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) George A. Pavlath, "Challenges in the Development of the IFOG", AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit 11-14 August 2003.
- 4) George A. Pavlath, "Closed-loop fiber optic gyros", SPIE Vol. 2837, 1996.
- 5) J.Blake and B. Szafraniec, "Random Noise in PM and Depolarized Fiber Gyros", Technical Paper OWB2, 12th International Conference on Optical Fiber Sensors, 1997.
- 6) H. C. Lefevre et al., "High dynamic range fiber gyro with all-digital signal processing", SPIE Vol. 1367, 1990.
- 7) 도재철 외, "페루프 광섬유자이로용 4-state 디지털 세로다인 로직 설계", pp. 259~261, 제 13회 광전자 및 광통신 학회, 2006. 5.
- 8) 정경호 외, "페루프 광섬유자이로의 디지털 세로다인 신호처리 모델링 시뮬레이션", 한국군사과학기술학회, pp. 355~358, 2004. 8.