

페루프 광섬유자이로스코프의 전기적 교차결합에 의한 불감응 영역 오차 분석

Analysis of Deadzone Error by Electrical Cross-coupling on a Closed-loop Fiber Optic Gyroscope

정 경 호, 정 길 도*
(Kyoung Ho Chong¹ and Kil To Chong^{2,*})

¹Agency for Defense Development

²School of Electronics Engineering, Advanced Electronics and Information Research Center, Chonbuk National University

Abstract: Due to electrical cross-coupling between modulation voltage and photodetector output in a closed-loop fiber optic gyro, deadzone inevitably occurs. In this paper, deadzone error by cross-coupling effect was analyzed and the overcoming method was suggested. Simulation and measurement results show the main reason for deadzone is mainly related to electrical cross-coupling, and it can be effectively reduced by square-wave dithering method.

Keywords: electrical cross-coupling, dithering, closed-loop fiber optic gyro

I. 서론

광섬유자이로(fiber optic gyroscope)는 각속도를 측정하는 회전센서로서 링레이저 자이로(ring laser gyroscope)와 더불어 대표적인 광학식 자이로에 해당한다. 광섬유자이로는 1970년대 Sagnac 효과를 기본원리로 설계 개념이 도입된 이후 1980년대 후반부터 2000년대에 이르기까지 지속적인 기술 개발이 이루어져 왔으며, 링레이저 자이로에 비해 제작 공정이 단순하고 소형 및 경량화가 가능한 장점을 갖고 있어 점차 링레이저 자이로를 대체하고 있는 추세에 있다[1-4].

광섬유자이로는 개루프 방식과 페루프 방식이 있으며, 회전량을 피드백 하느냐의 여부에 따라 구분된다. 일반적으로 1deg/hr 이하의 항법용 자이로에는 페루프 방식이 널리 사용되며, 이는 회전량의 피드백에 의해서 선형 특성이 뛰어나기 때문이다[5,6]. 그러나 선형을 유지하기 위해 생성되는 여러 전기적 신호들의 간섭에 의해 불감응 영역(deadzone)이 발생하며, 이는 하드웨어 구현상에서 피할 수 없는 부분이므로 이에 대한 연구가 지속되어 왔다[7-9].

불감응 영역(deadzone)이란 저 입력각속도에서 회전을 감지하지 못하고 영(zero)을 출력하는 영역을 말한다. 페루프 광섬유자이로에서 불감응영역이 발생하는 주요 원인은 입력각속도를 누적인 램프(세로다인) 신호와 광검출 전치증폭기 신호 사이에서 발생하는 전기적 교차결합(electrical

cross-coupling)으로 널리 알려져 있다[7-11].

전기적 교차결합이 발생하는 원인은 공간적인 전자기 간섭(electro-magnetic interference), 디지털 또는 아날로그 접지 등에서 발생하는 교차 결합 커패시턴스(coupling capacitance) 등에 의한 것이다. 아주 작은 교차 결합에 의해서도 큰 바이어스가 발생하며 광검출 전치증폭기에 수십pA의 램프 신호 교차 결합이 발생하면 수 deg/hr의 바이어스가 발생할 수 있다.

이러한 교차결합에 의한 바이어스가 단순히 고정(fixed) 바이어스로 나타나면 시스템 상에서 교정하면 되므로 큰 문제는 없다. 그러나 실제로 이 바이어스는 자이로 피드백 루프를 통해서 램프 신호를 변화되어 다시 자이로 바이어스 값을 변화시킨다. 이로 인하여 자이로는 양(+)의 값과 음(-)의 값을 반복하게 되고 불감응 영역에 빠지게 된다.

종래의 이와 관련된 논문 등의 문헌을 살펴보면, 교차결합이 불감응 영역의 원인이 됨을 지적하고 있으며, 이를 해결하기 위한 방법들이 제시되었다[7-9]. 그러나 교차결합이 불감응 영역의 원인이 됨을 지적하고 간단히 설명하는 수준에서만 밝히고 있으며, 구체적으로 각 신호들 간의 교차결합이 어떻게 발생하는지에 대해서는 알려지지 않았다.

본 논문에서는 교차결합과 불감응 영역과의 관계를 자세히 분석하고자 시뮬레이션과 측정을 수행하였다. 또한 불감응 영역을 개선하기 위해 사각파 디더를 적용한 결과에 대해서 살펴보았다.

II. 페루프 광섬유자이로 동작원리

페루프 광섬유자이로는 그림 1과 같이 회전을 감지하는 광학부와 회전신호를 처리하는 신호처리부로 나눌 수 있다. 광학부의 주요 구성품은 광섬유 광원(broadband source), 광검출기(photo detector), 광결합기(coupler), 집적광학소자

* Corresponding Author

Manuscript received December 6, 2013 / revised December 31, 2013 / accepted January 11, 2014

정경호: 국방과학연구소(khchong@add.re.kr)

정길도: 전북대학교 전자공학부(kitchong@jbnu.ac.kr)

※ 본 논문은 ICROS 전북제주지부에서 초안이 발표되었으며, 광역 선도사업 (No. 1301000836), 한국연구재단 (No. 2013009458), (No. 2013068127)의 지원으로 연구되었음.

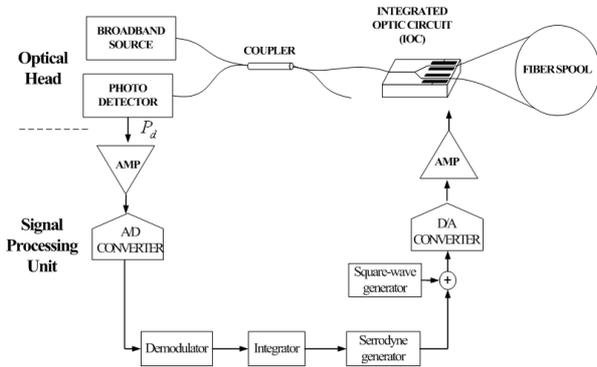


그림 1. 페루프 광섬유자이로 구성도.
Fig. 1. Configuration of Closed-loop Fiber Optic Gyroscope.

(integrated optic circuit), 광섬유 고리(fiber coil)이다. 광섬유 자이로에 광 신호를 제공하는 광섬유 광원은 선풍이 넓은 1550nm 파장 대역의 어븀첨가(Erbium Doped) 광섬유광원을 사용한다. 광섬유 고리는 편광유지 광섬유(polarization maintaining fiber)를 사중극 권선방식(quadrupole winding)으로 감아서 사용한다. 집적광학소자는 광분할기(beam splitter), 편광기(polarizer), 위상변조기(phase modulator)의 기능을 수행하는 부품으로서 온도특성이 우수한 리튬니오베이트(LiNbO3) 소재를 활용한다. 광학부의 제작과 조립은 특별한 공정과 조립을 거쳐 이루어진다.

신호처리는 A/D 변환기, 디지털 변-복조 로직, D/A 변환기, DSP 등으로 구성되며 입력 각속도 피드백 제어뿐만 아니라 변조진폭 피드백 제어, 불감용 영역 제거, 온도보상 등을 수행한다. 페루프 광섬유자이로의 기본적인 회전 출력은 다음과 같다. 회전이 발생할 때 회전량에 비례하여 Sagnac위상차 $\Delta\phi_R$ 는 입력각속도 Ω 와 다음과 같은 관계에 있다.

$$\Delta\phi_R = \frac{2\pi L D}{\lambda c} \cdot \Omega \quad (1)$$

- Ω : 입력각속도, $\Delta\phi_R$: Sagnac위상차
- L : 광섬유 길이, D : 광섬유 고리 직경
- λ : 광 파장

광출력은 위상차 $\Delta\phi_R$ 에 대해 코사인 응답을 출력한다. 회전이 발생할 때, 광학회로를 통과하여 광검출기에 입사된 광전력(optical power)이 P_0 라면, 광검출기를 통과한 신호(P_d)는 다음과 같다.

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

여기에 $\pm\pi/2$ 의 위상 바이어스를 인가하고 복조기를 통과하면 다음과 같다.

$$P_{d1} = \frac{P_0}{2} [1 + \cos(\Delta\phi_R + \frac{\pi}{2})] \quad (3)$$

$$P_{d2} = \frac{P_0}{2} [1 + \cos(\Delta\phi_R - \frac{\pi}{2})] \quad (4)$$

$$P_{demod} = P_{d1} - P_{d2} = P_0 \sin \Delta\phi_R \quad (5)$$

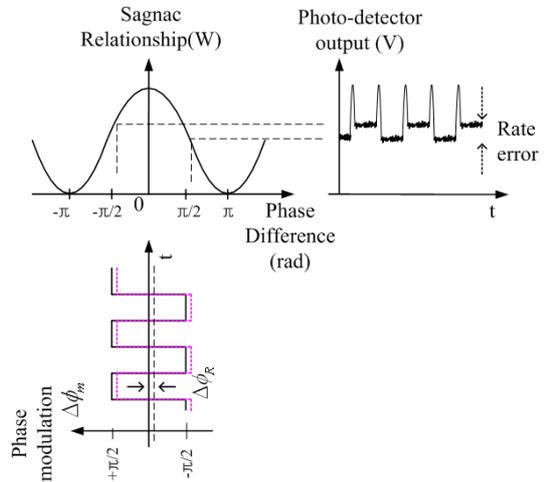


그림 2. 회전 $\Delta\phi_R$ 이 발생하였을 때 광검출기 출력 P_d 에 나타난 회전오차.
Fig. 2. Rate error at photodetector output P_d when the rotation $\Delta\phi_R$ is occurred.

위 수식에서와 같이 $\pm\pi/2$ 의 위상 바이어스를 인가하면 자이로 복조기 출력 P_{demod} 는 Sagnac위상차에 사인응답을 한다. 그림 2는 회전이 발생하였을 때 광검출기 출력을 나타낸다.

만약 회전량이 작다면, P_{demod} 는 $P_0 \Delta\phi_R$ 로 표현되며 광전력 P_0 가 일정한 값을 갖는다면 자이로 복조기 출력은 회전량 $\Delta\phi_R$ 과 비례한 결과를 얻는다. 페루프 광섬유자이로는 이 값을 위상변조기에 피드백($\Delta\phi_f = -\Delta\phi_R$)함으로써 자이로 동작점은 회전 위상과 피드백 위상의 합이 0인 부근에서 이루어져 선형 피드백 제어가 이루어진다. 그림 3은 피드백 제어가 이루어졌을 때, 회전위상에 대한 동작점을 나타낸다.

회전 제어를 위해서는 복조기로부터 얻은 아날로그 회전량을 A/D 변환기를 거쳐 디지털로 변환하고 이에 해당하는 디지털 램프 신호를 발생시킨다. 디지털 램프 신호는 D/A 변환기를 거쳐 위상변조기에 인가된다. 회전에 비례한 디지털 램프 신호는 그림 4와 같다. 그림 4는 위상 바이어스 $\pm\pi/2$ 를 인가한 상태에서 양(+)의 회전이 발생한 경우 디지털 램프 신호이다. 램프 신호는 점점 증가하다가 2π 에

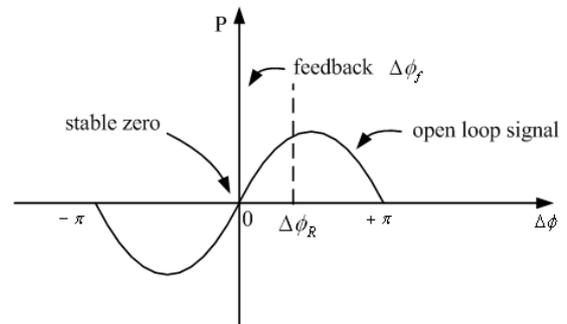


그림 3. 피드백 제어 동작점.
Fig. 3. Feedback control operating point.

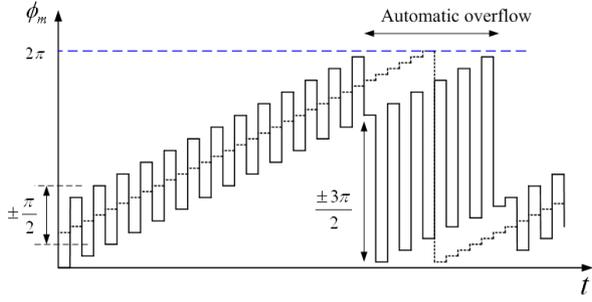


그림 4. 회전이 발생할 때 디지털 램프 신호.
Fig. 4. Digital ramp signal when the rotation is occurred.

도달하면 자동으로 리셋되며, 리셋되는 구간에서는 $\pm 3\pi/2$ 신호가 자동으로 생성된다. 이는 램프 신호를 아날로그로 구현하는데 있어서 현실적인 방법을 제시해주며, 또한 $\pm 3\pi/2$ 신호를 발생시켜 변조 진폭 오차(modulation amplitude error)를 제어하는 정보로도 활용된다.

III. 불감응 영역 원인 분석 및 개선 방법

1. 교차결합에 의한 불감응 영역 원인 분석

앞서 기술한 디지털 램프 신호는 회전 피드백 제어를 위해서 발생한 파형으로, 2π 리셋이 될 때 마다 반복적으로 생성된다. 이 파형은 자이로를 제어하기 위해 피할 수 없는 패턴이다. 그러나 이 패턴이 광검출 신호와 교차 결합을 일으키면 신호 왜곡을 발생시켜 자이로에 바이어스를 생성한다.

그림 5는 디지털 램프 신호 $V_m(t)$ 와 광검출 증폭 신호 $V_d(t)$ 와 교차 결합과 이를 해결하기 위한 디더 신호 $V_{dith}(t)$ 를 나타낸다. 일단 교차 결합이 발생하면 램프 변조 신호 $V_m(t)$ 의 전압은 광검출 신호 $V_d(t)$ 에 교차 결합이 생성되고 각 램프의 스텝에 따라 양(+) 또는 음(-) 부호

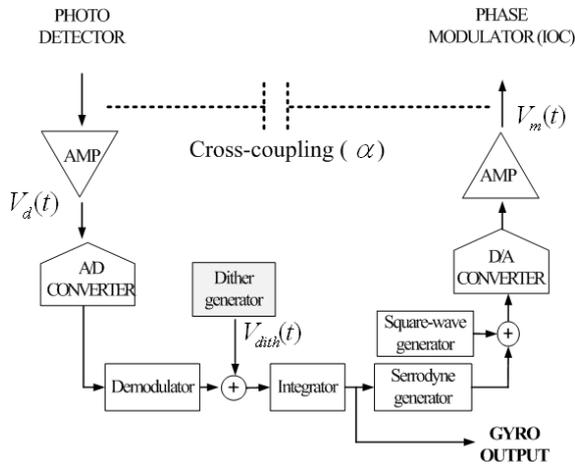


그림 5. 변조신호 $V_m(t)$ 와 광검출 신호 $V_d(t)$ 간 전기적 교차 결합 α 과 디더 신호 $V_{dith}(t)$.

Fig. 5. electrical cross-coupling between modulation signal $V_m(t)$ and photodetector $V_d(t)$, and dither signal $V_{dith}(t)$.

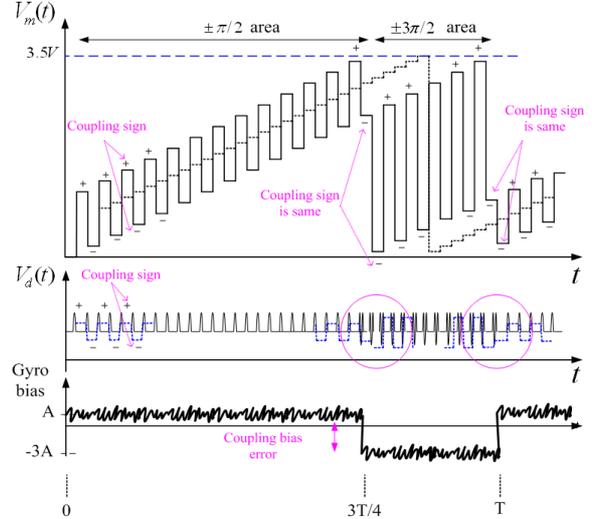


그림 6. 교차 결합에 의한 광검출 신호와 바이어스 오차.
Fig. 6. Photodetector signal and bias error by cross-coupling.

의 교차 결합 값을 갖는다. 복조기에서는 이 값들의 차이를 생성하므로 복조기를 통과하면 바이어스가 발생한다. 그림 6은 교차 결합 되었을 때 변조신호와 광검출 신호의 관계를 나타내며 이로 인하여 발생한 바이어스를 보여준다.

교차 결합이 발생할 때, 램프 변조신호는 $\pm\pi/2$ 구간에서 $\pm 3\pi/2$ 구간으로 리셋 되고 같은 부호 즉, 양(+), 양(+) 또는 음(-), 음(-)을 갖는다. 이러한 부호와 크기는 광검출기와 교차 결합 되고 이로 인하여 자이로는 $\pm\pi/2$ 구간에서 바이어스 값 A를 갖지만, $\pm 3\pi/2$ 구간에서는 바이어스 값 -3A를 갖는다. 이 바이어스 값들은 T주기 동안 양의 값과 음의 값을 반복하게 되고 바이어스 값이 누적된 피드백 램프 신호는 오실레이션 하여 자이로 출력은 0이 된다. 만약 교차 결합 값보다 회전량보다 충분히 크다면 교차 결합이 우세하게 작용하여 자이로는 회전을 감지하지 못하고 0을 출력하여 불감응 영역을 생성한다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

전기적 교차결합 계수가 α 이고, 교차결합에 의해 발생한 위상 $\alpha V_m(t)$ 이 회전량 $\Delta\phi_R$ 보다 충분히 클 경우 복조기 전압 $V_{demod}(t)$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_{d1}(t) = \frac{K_p P_0}{2_0} [1 + \cos(\Delta\phi_R + \alpha V_m(t) + \pi/2)] \quad (6)$$

$$V_{d2}(t) = \frac{K_p P_0}{2} [1 + \cos(\Delta\phi_R + \alpha V_m(t) - \pi/2)] \quad (7)$$

$$\begin{aligned} V_{demod}(t) &= V_{d1}(t) - V_{d2}(t) \\ &= P_0 \sin(\pi/2) \sin(\Delta\phi_R + \alpha V_m(t)) \\ &\approx P_0 \alpha V_m(t) \end{aligned} \quad (8)$$

when $\Delta\phi_R + \alpha V_m(t) \approx \alpha V_m(t)$

$$\begin{aligned} gyro\ bias &= \int_0^T V_{demod}(t) dt \\ &= 3 \times P_0 \alpha V_m(t) - P_0 \cdot 3 \alpha V_m(t) = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

α : 전기적 교차결합 계수

K_p : 광검출기 전류-전압 이득, $V_m(t)$: 변조 전압

2. 적정주파수와 변조주파수 차이에 의한 불감응 영역 발생
 불감응 영역을 발생시키는 또 다른 원인은 적정주파수 (proper frequency)와 변조주파수(modulation frequency)의 차이이다. 적정주파수는 광섬유 길이에 따른 변이시간(transit time)의 역수에 해당되는 값이며 변조주파수는 변조 신호의 주파수이다.

광섬유자이로에서 적정주파수는 광섬유 길이에 의해 결정되며 변조주파수와 차이가 있으면 광검출기에 비대칭적인 주기가 생겨 바이어스를 유발한다. 이러한 바이어스는 쿼드러처 바이어스(Quadrature Bias)의 성질을 갖으며 복조기의 위상이 90도 차이가 날 때 크게 발생한다.

또한 쿼드러처 바이어스는 안정도를 저하시키며 불감응 영역을 발생시키는 원인이 된다. 적정주파수와 변조주파수의 차에 의한 바이어스 오차는 아래와 같이 유도된다.

$$\Omega_{bias} \approx \frac{\lambda c}{2\pi LD} \cdot 2\Delta\tau \cdot \Delta_0 \cdot f_m \cdot ctg\left(\frac{\phi_m}{2}\right) \quad (10)$$

$$\Delta\tau : \frac{1}{f_{proper}} - \frac{1}{f_m}$$

Δ_0 : IOC 세기 변조 지수(intensity modulation factor)

f_{proper} : 적정 주파수

f_m : 변조 주파수

ϕ_m : 위상변조 진폭

그림 7은 500m 광섬유고리에 대해 변조주파수와 적정주파수의 차이를 주었을 때 불감응 영역을 측정할 예들 보여 준다. 변조주파수와 적정주파수의 차이가 약 0.1%이하던 경우에는 불감응 영역이 0.5deg/hr 내외의 값으로 나타났으나 차이가 약 -0.5%인 경우에는 불감응 영역이 2deg/hr로 크게 나타났다. 이러한 주파수 차이에 의한 불감응 영역은 통상적으로 전기적 교차결합에 의한 영향보다 작으며, 광섬유 길이를 조절하는 등의 공정 개선으로 극복될 수 있으므로 본 절에서는 불감응 영역 원인의 하나로서 간단히 언급 하였다.

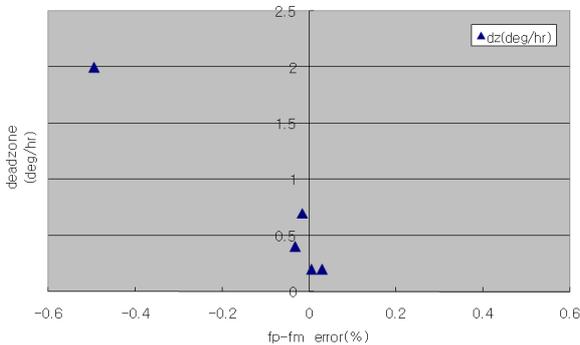


그림 7. 변조주파수와 적정주파수 차에 의한 불감응 영역.
 Fig. 7. Deadzone induced by difference between modulation and proper frequency.

3. 디더에 의한 개선 방법

불감응 영역을 개선하기 위한 방법으로는 사각파 디더 (Squarewave dither)가 널리 알려져 있다. 사각파 디더는 평균이 0인 큰 바이어스를 주기적으로 인가하는 방법이다.

큰 디더 신호가 인가된다면 교차 결합 바이어스가 있을 지라도 램프 신호에 강제적으로 리셋이 발생하므로 자이로는 불감응 영역에 빠지지 않고 입력각속도를 감지 할 수 있다. 디더신호 $V_{dith}(t)$ 가 교차결합 $\alpha V_m(t)$ 보다 충분히 클 때 주기적으로 디더가 인가된다면 다음과 같이 표현 할 수 있다.

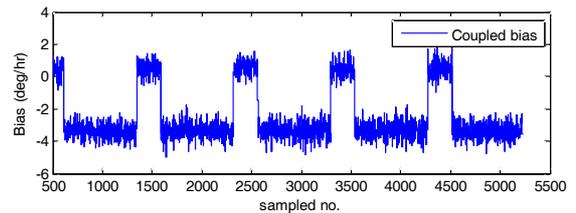
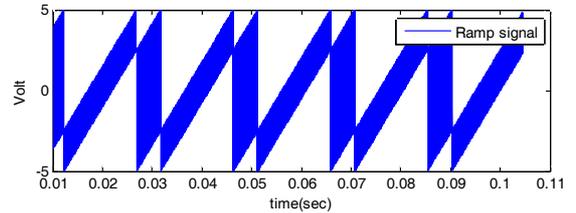
$$\Delta\phi_R + \alpha V_m(t) \pm V_{dith}(t) \approx \Delta\phi_R \pm V_{dith}(t) \quad (11)$$

$$\int_0^T V_{demod}(t)dt \approx P_0 \Delta\phi_R (V_{dith}(t) - V_{dith}(t)) = P_0 \Delta\phi_R \quad (12)$$

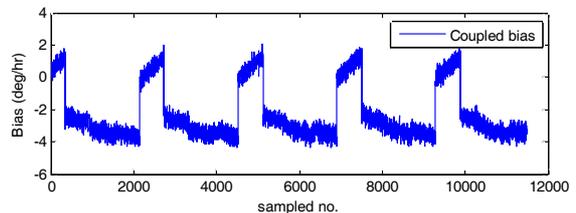
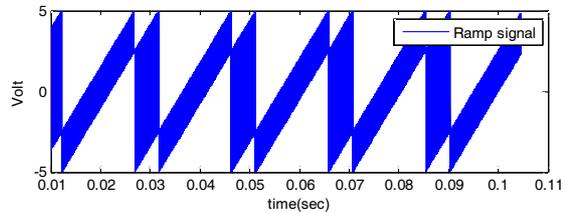
when $T = \text{dither period}$

IV. 시뮬레이션 및 측정 결과 분석

교차 결합에 의한 불감응 영역 오차를 분석하고 디더에 의한 개선을 확인하기 위해 몇 가지 시뮬레이션과 측정을



(a) Simulation.



(b) Measurement.

그림 8. 교차결합에 의한 개루프 바이어스 특성.

Fig. 8. Open loop bias characteristics by cross-coupling.

수행하였다. 시뮬레이션은 Matlab/Simulink를 이용하였으며, 자이로의 광학부와 신호처리부를 모델링 하였다. 광학부 모델링에는 광학 환산계수(optical scale factor), 광잡음 등을 고려하였으며, 신호처리부 모델링에는 2차 저역통과 필터, A/D 및 D/A Quantizer, digital logic 등을 고려하였다. 디지털부는 이산모델인 Z-변환으로 표현될 수 있으나 신호처리 알고리즘에서 디지털 샘플의 일부만을 사용하기 때문에 실제 알고리즘과 가깝게 모사하기 위해 Stateflow를 이용하여 32-bit 정수로 표현되었다. 시뮬레이션 결과와 비교를 위해 900m 광섬유코어를 갖는 프로토타입(Prototype)을 설계하여 자이로 출력을 살펴보았다.

그림 8은 램프 신호가 발생하였을 때, 자이로의 개루프 바이어스 특성을 살펴본 것이다. 그림 8(a)는 교차결합계수를 임의로 -70dB로 설정하였을 때 결과이고 그림 8(b)는 임의의 디지털 값을 회전값으로 자이로에 인가한 상태에서의 결과이다. 실제로 교차결합정도를 측정하여 정확히 모사하는 것은 현실적으로 매우 어렵기 때문에 임의로 -70dB의 결합계수를 설정하여 측정치와 유사한 결과가 얻어지는지를 확인하였다. 다만 그림 8(b)의 측정치에서는 리셋의 전후에서 점점 증가하거나 감소하는 경향이 나타났으며, 이는 집적광학소자의 저주파 드리프트 현상에 의한 것으로

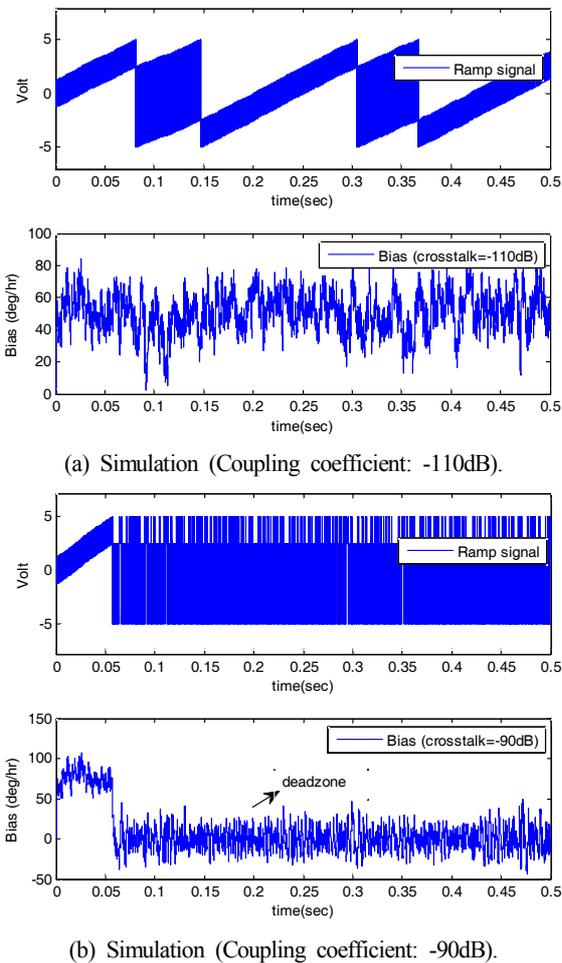


그림 9. 교차결합계수에 따른 페루프 바이어스 특성.
Fig. 9. Closed loop bias characteristics by cross-coupling.

추정된다.

그림 9(a)-(b)는 페루프 상태에서 입력각속도 50deg/hr, 교차결합계수를 각각 -110dB, -90dB를 인가하여 자이로 출력을 시뮬레이션 한 것이다. 교차결합계수가 -110dB인 경우에는 영향이 거의 없이 자이로 출력이 -50deg/hr를 유지하고 있는 반면, -90dB인 경우 자이로 출력에 오실레이션이 발생하고 불감응 영역에 빠지게 됨을 확인 할 수 있다.

그림 10은 교차결합계수가 -106dB일 때 저입력 각속도에서 불감응 영역 결과를 보여주고 있다. 그림 11은 불감응 영역을 개선하기 위해 사각파 디더를 적용한 측정 결과이며, 디더 진폭이 증가할수록 불감응 영역 개선효과가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

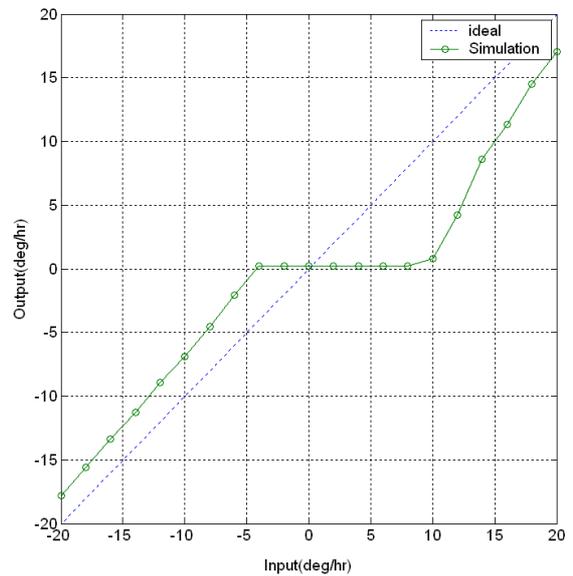


그림 10. 교차결합계수가 -106dB인 경우 불감응 영역 (Simulation).
Fig. 10. Deadzone by cross-coupling coefficient -106dB (Simulation).

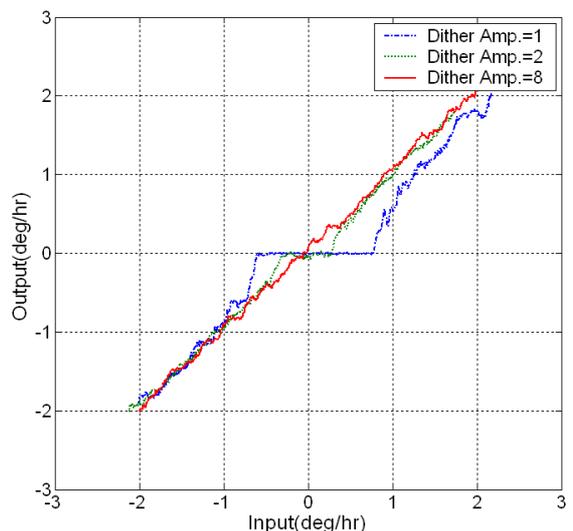


그림 11. 디더 진폭에 따른 불감응 영역 (Measurement).
Fig. 11. Deadzone by dither amplitude variation (Measurement).

V. 결론

이 논문에서는 페루프 광섬유자이로에서 교차결합에 의한 불감응 영역의 발생 원인에 대해 분석하고 감소 효과를 살펴보았다. 불감응 영역의 주 원인은 램프 변조신호와 광검출기 신호사이의 전기적인 교차결합이며 시뮬레이션과 측정을 통하여 교차결합이 클수록 불감응 영역이 크게 발생함을 확인 하였다. 불감응 영역을 개선하기 위해서 사각파 디더 신호를 적용하였으며, 디더 진폭이 클수록 불감응 영역이 개선되는 것을 확인 할 수 있었다.

REFERENCES

- [1] H. C. Lefevre, *Fiber Optic Gyroscope*, Artech House, 1993.
- [2] I. R. Edu, R. Obreja, and T. L. Grigorie, "Current technologies and trends in the development of gyros used in navigation applications - a review," *CIT'11 Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on Communications and Information Technology (StevensPoint, Wisconsin, USA, 2011)*, pp. 63-68.
- [3] V. C. Lefevre and W. R. Lindberg, "Fiber optic gyroscopes and the accomplishments of the DARPA-sponsored GPS guidance package program," *Proc. of SPIE*, vol. 6314, 63140B1-9, 2006.
- [4] T. Buret, D. Ramecourt, and F. Napolitano, "From space qualified fiber optic gyroscope to generic fiber optic solutions available for space application," *ICSO - 7th International Conference on Space Optics (Toulouse, France)*, pp. 14-17, Oct. 2008.
- [5] H. C. Lefevre, P. Martin, J. Morisse, P. Simonpietri, P. Vivenot, and H. J. Arditti, "High dynamic range fiber gyro with all-digital signal processing," *Proc. of SPIE*, vol. 1367, 1991.
- [6] M. S. Bielas, "Stochastic and dynamic modeling of fiber gyros," *Proc. of SPIE*, vol. 2292, 1994.
- [7] G. A. Pavlath, "Closed-loop fiber optic gyros," *Proc. of SPIE*, vol. 2837, 1996.
- [8] G. Spahlinger, "Error Compensation via signal correlation in high precision closed-loop fiber optic gyros," *Proc. of SPIE*, vol. 2387, 1996.
- [9] R. A. Kovacs, "Fiber optic gyroscope with reduced non-linearity at low angular rates," *21st Annual AAS Guidance and Control Conference*, AAS 98-043, 1998.
- [10] S. J. Park, "Phase control loop design based on second order PLL loop filter for solid type high Q-factor resonant gyroscope," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 6, pp. 546-554, 2012.
- [11] J. H. Jin, "Dynamic models of hemispheric resonator gyros and tests of basic control characteristics," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 19, no. 10, pp. 947-954, 2013.



정 경 호

1995년 전북대 제어계측공학과(공학사). 1997년 전북대 의용생체공학과(공학석사). 1997년~현재 국방과학연구소 선임연구원. 관심분야는 센서 신호처리.



정 길 도

1984년 Oregon State University 기계공학(공학사). 1986년 Georgia Institute of Technology 기계공학(공학석사). 1992년 Texas A&M University (기계공학 공학박사). 1995년 3월~현재 전북대학교 전자공학부 교수 및 학부장, 전북대 전자정보신기술연구소 소장. 관심분야는 Time-Delay, Robotics, 인공지능, 센서네트워크.