

# DSP 기반의 비편광 광자이로스코프 설계

윤영규, 주민식, 김영진, 김재형\*

국립창원대학교

## Design of DSP based Depolarized Fiber Optic Gyroscope

Yeong-gyoo Yoon, Min-sik Joo, Yeong-jin Kim, Jae-hyoung Kim\*

Changwon National University

E-mail : hyung@changwon.ac.kr

### 요 약

Sagnac 효과를 사용한 회전센서로 알려진 광자이로스코프(이하 FOG)는 넓은 범위의 회전율을 측정하기 위해 개발 중에 있다. 본 논문은 개루프 FOG의 개발과 FPGA를 이용한 디지털 신호처리 기술을 다루고 있다. 첫째로 Good bias stability( $0.22^\circ/hr$ ), Scale factor stability, 단일모드 광섬유를 이용한 최대한 낮은 angle random walk ( $0.07^\circ/\sqrt{hr}$ )와 저가의 중급 자이로 (pointing grade)의 설계를 목표로 하고 있다. 둘째 Processing 이득에 의해 실질적으로 디지털 Demodulator 출력이 개선된 SNR을 갖는 디지털 FOG 신호처리 알고리즘을 디자인 했다. 적은 계산량을 가진 저가의 프로세서와 Adder, 그리고 Shift register만으로 필요로 하는 CIC타입의 Decimation 블록은 이러한 모든 디지털 FOG 프로세서에 사용 가능하다.

### ABSTRACT

The interferometric fiber optic gyroscopes (FOGs) are well known as sensors of rotation, which are based on Sagnac effect, and have been under development for a number of years to meet a wide range of performance requirements. This paper describes the development of open-loop FOG and digital signal processing techniques implemented on FPGA. Our primary goal was to obtain intermediate accuracy (pointing grade) with a good bias stability ( $0.22^\circ/hr$ ) and scale factor stability, extremely low angle random walk ( $0.07^\circ/\sqrt{hr}$ ) and significant cost savings by using a single mode fiber. A secondary goal is to design all digital FOG signal processing algorithms with which the SNR at the digital demodulator output is enhanced substantially due to processing gain. The CIC type of decimation block only requires adders and shift registers, low cost processors which has low computing power still can used in this all digital FOG processor.

### 키워드

FOG, Sagnac, Depolarizer, FPGA, CIC

## 1. 서 론

광자이로스코프(Fiber Optic Gyroscope:FOG)는 광섬유 속을 반대방향으로 진행하는 두 광파의 광학간섭을 이용하여 회전율을 측정하는 고감도 회전속도 센서이다. 가격이 비싼 편광유지광섬유(PM Fiber)를 대신해 SM Fiber를 사용하여 비편광 광자이로스코프를<sup>[1]</sup> 제작 하였다.

FOG의 광학간섭을 이용한 회전감지는 다른 회전 센서에 비해 높은 감도를 가질 수 있다. 하지만 높은 감도로 측정된 데이터의 신호처리를 위해서는 고감도의 신호처리부의 필요성 또한 요구된다. 본 논문에서는 디지털 방식의 Lock-In 증폭

기<sup>[2]</sup> 및 SNR 개선을 위한 신호처리 알고리즘을 FPGA 기반으로 설계 하였으며, CIC필터를 사용한 효율적 알고리즘 설계를 시도하였다.

## 2. 비편광 광자이로 스코프의 설계

본 연구에서는 고가의 상용 광자이로스코프에 사용되는 편광유지 광섬유 대신에 저가의 단일모드 광섬유(Single mode fiber : SMF)를 사용하여 센서 코일을 구성하였다. 단일모드 광섬유는 광섬유에서 발생하는 신호의 변동이 크기 때문에 이러한 변동을 억제하기 위해 비편광 광자이로스코

프를 제작하였다. 그림 1은 비편광 광자이로스코프의 구성도를 보인 것이며, 편광된 광학신호의 편광을 소멸시키기 위해 Lyot 비편광기<sup>[3]</sup>를 사용하였다. 본 논문에서 구현한 광자이로스코프는 5mW 출력의 SLD로부터 발생된 광파를 편광기를 거쳐 편광시킨 이후 광섬유 커플러를 이용해 두 개의 광파로 분리시킨다. 두 개로 분리된 광파는 센서 코일에 반대방향의 진행 경로로 인가되어 Sagnac 위상차를 발생시킨다. Sagnac 위상차를 검출하기 위해 광섬유를 통과한 두 광파의 간섭 현상을 광검출기(Photo detector : PD)를 통해 빛의 세기(Intensity)를 측정하는 간접적인 방법을 사용하여 검출하게 된다. 이때 이상적인 광 검출기의 출력 전류는<sup>[4]</sup> 식(1)과 같으며, 그림 1은 광자이로스코프의 광학부 구성도를 나타낸다.

$$I = I_0(1 + \cos\phi_s) \quad \text{단, } I_0 = \sigma \frac{P}{2} \quad (1)$$

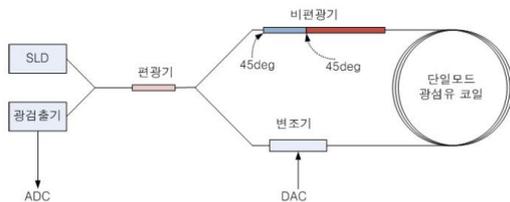


그림 1 광학부 구성도

광자이로스코프가 놓인 평면이  $\Omega$ 의 각속도로 회전할 때 Sagnac 효과는 다음 식 (2)와 같다.

$$\phi_s = \frac{8\pi AN\Omega}{\lambda c} = \frac{2\pi LD}{\lambda c} \Omega \quad (2)$$

A, D, N 은 각각 광학 회전을 감지코일의 면적, 직경, 턴 수를 나타낸다.

그림에서 볼 수 있는 Lyot 편광 소멸기는 L, 2L의 길이를 가지는 편광유지 광섬유를 45도의 각도를 가지도록 결합한 구조로 구성되어 있으며, 두 비편광기를 광유착 접속하여 사용하였다.

그림은 편광 측정기의 측정화면을 나타낸 것이며, 이와 같은 방식으로 사용할 경우 손실을 최소화하면서도 0.1% 이하의 DOP로 유지되는 비편광 신호를 사용할 수 있다.

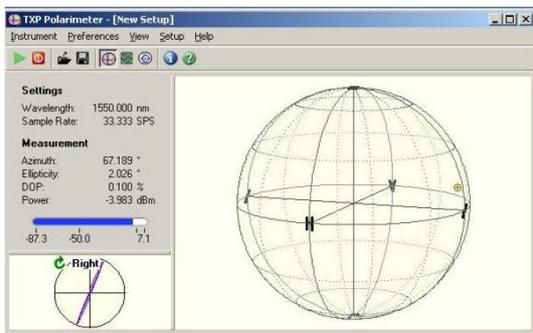


그림 2. 편광 측정기의 DOP 측정

### 3. 신호처리부 설계

FOG의 광검출기는 Sagnac 위상차를 간섭효과에 의하여 측정하며, 간섭 신호의 전력을 검출하여 식(1)과 같은 신호를 발생시킨다. 그러나 식(1)로 표현되는 신호는 Sagnac 위상차의 cosine 함수 형태이므로 감도도 낮을뿐 아니라 방향을 검출할 수 없다. 따라서, 위상변조기를 사용하여 감도를 개선하고 있다. 식(3)은 변조신호 주파수 ( $f_m$ )을 나타내었다.

$$f_m = \frac{c}{2Ln} \quad (3)$$

c는 광속, n은 광섬유의 매질인 실리카의 굴절율, L은 광학 센서코일의 길이를 나타낸다. 여기서  $n = 1.45$ ,  $L = 500m$ 이며, 계산된 최적 변조신호 주파수는 206.75kHz이다. 그러나 제작된 광학회로의 물리적 오차로 인해 190kHz의 실험적 최적 변조 주파수를 사용하였으며, 정현파로 위상 변조시킨 경우 광검출기의 출력은<sup>[5]</sup> 식(4)로 다시 주어진다.

$$I = I_0 [(1 + J_0(\phi_\Delta)\cos(\phi_s)) + 2I_0 J_1(\phi_\Delta)\sin(\phi_s)\sin\omega_m t + 2I_0 J_2(\phi_\Delta)\cos(\phi_s)\cos 2\omega_m t + 2I_0 J_3(\phi_\Delta)\sin(\phi_s)\sin 3\omega_m t] \quad (4)$$

단,  $\phi_s, \phi_\Delta, J_n(\cdot)$ 는 각각 Sagnac 위상, 변조지수 및  $n^{th}$  order Bessel 함수이다.  $\phi_s$ 를 검출하기 위하여  $\sin\omega_m t$ 를 포함하는 두 번째 항만을 이용하면 되므로 신호처리부에서는 Lock-in 증폭기를 이용하여  $\sin(\phi_s)$ 를 측정한다.

본 논문에서는 16BIT ADC를 사용하여 설계하였다. 식(4)에서 알 수 있듯이  $\sin\omega_m t$ 의 진폭은  $\sin\phi_s$ 에 비례한다. 따라서 최대 측정범위는  $\phi_s \leq \frac{\pi}{2}$ 에 의하여 계산이 되며, 이론적으로 측정 가능한 최대 회전율은 190.3°/sec이다. 그러나 ADC의 분해능에 따라 측정 회전율의 범위가 결정되며, 0.002 deg/sec의 회전을 감도와 16Bit ADC로 설계할 경우 이론적인 측정가능 회전율 범위는 65.536deg/sec이다.

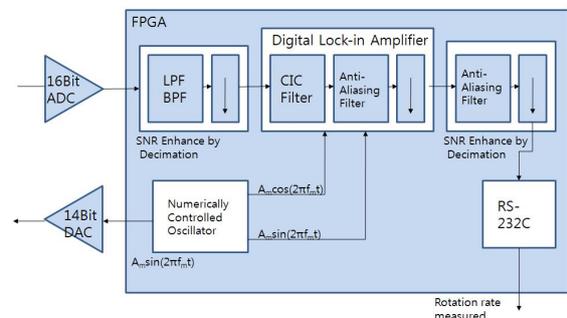


그림 3. FOG 신호처리부 블록도

FOG의 신호처리부는 그림 3과 같이 변조신호 발생기, Anti-Aliasing-Filter(AAF)와 decimator, 디지털 Lock-in 증폭기, CIC필터 그리고 가변 대역폭 LPF로 구성된다. AD변환기는 변조주파수 190kHz를 검출하기 위해 Nyquist 주파수인 380kHz보다 50배 높은 주파수인 19MHz로 오버 샘플링 한다. AD변환기로 샘플링된 신호는 AAF, Decimator에 의하여 1/10의 샘플율로 변환되는 과정에서  $10\log_{10}(10) \cong 10dB$ 의 프로세스 이득을 가지게 되며, 이는 신호대비 잡음비(SNR)의 향상을 의미한다.

BPF를 거치면서 검출신호의 Pass-Band를 좁혀 변조신호 주변의 잡음을 개선한 이후 Digital Lock-in amplifier로 입력된다. NCO는 190kHz의 sine 및 cosine 신호를 1.9Ms/s 속도로 Digital Lock-in amplifier의 기준신호로 입력한다. 이 신호는 동시에 DAC를 통하여 변조기에 입력이 된다. Digital LIA의 공급기는 1.9MSPS로 동작하며, 식(5)에서 LIA 특성을 수식으로 표현하였다.

$A\sin(ut) + B\cos(2ut) + C\sin(3ut)$  : LIA 인가신호  
 $k\sin(ut), k\cos(ut)$  : LIA 기준신호

$$\begin{aligned} & \frac{[A\sin(ut) + B\cos(2ut) + C\sin(3ut)]k\sin(ut)}{[A\sin(ut) + B\cos(2ut) + C\sin(3ut)]k\cos(ut)} = \quad (5) \\ & \frac{1}{2}k[A - B\sin(ut) + (C - A)\cos(2ut) + B\sin(3ut) - C\cos(4ut)] \\ & + \frac{1}{2}k[B\cos(ut) + (A - C)\sin(2ut) + B\cos(3ut) + C\sin(4ut)] \end{aligned}$$

여기서 A, B, C는 각각 Sagnac 효과로 발생한 광자이로스코프의 출력신호의 주요 성분이며, 필터 감쇄비는  $20\log_{10}131072 = 102.2502dB$ 의 감쇄비를 가지는 필터를 설계해야 한다. 그러나 이러한 디지털 Filter는 설계하기 어려우므로 CIC-필터를 사용하여  $w, 2w, 3w, 4w$ 의 주파수 신호를 제거한다. 그림4는 CIC필터의 필터 특성을 나타내었다.

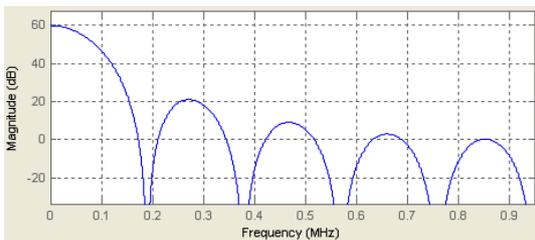


그림 4. CIC 필터의 특성

설계한 CIC 필터는 3개의 Section으로 구성하여 5개의 Null을 포함한다. Null지점의 주파수는 LIA에서 생성한  $w, 2w, 3w, 4w$ 의 주파수와 일치되어 제거되도록 설계 했다. 이러한 구성은 고성능의 필터를 요구하는 LIA를 효율적으로 구성할 수 있게 하므로, 적은 하드웨어만을 사용해 신호

처리부를 구성할 수 있다. CIC필터를 통과한 이후에는 여러 번의 필터링과 Decimation 과정을 거치면서 SNR을 개선시키는데, 일반적으로 FOG의 입력신호인 회전율은 수십 Hz 이하의 동적인 특성을 가지므로, AAF와 decimator에 의하여 200Hz의 대역폭을 가지는 신호로 변환된다. 이러한 신호처리를 통해 43dB의 SNR 개선을 가져온다. 190kHz 정현파 변조신호를 위하여 14bit DAC, IFOG 신호를 샘플링하여 DSP 처리를 하기 위하여 16bit ADC를 장착하였다.

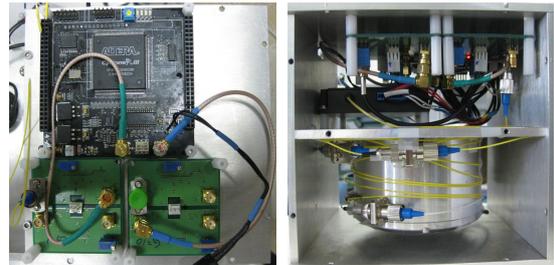


그림 5. 신호처리부 장착 사진

#### 4. 결과

그림 6은 제작된 광자이로스코프의 특성을 측정하기 위하여 구성된 테스트 셋업을 보여준다. 회전율을 측정하기 위해 Harmonic모터로 제작한 회전테이블과 온도측정을 위한 온도계로 구성했다.

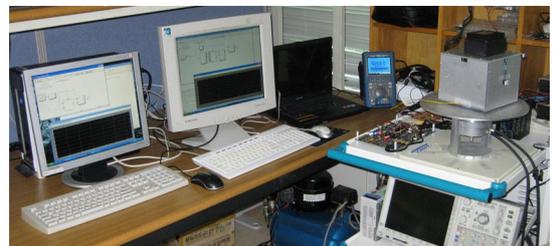


그림 6. FOG회전 테스트 셋업

##### 4.1. FOG의 입출력 특성 및 감도 측정

광자이로스코프의 출력감도를 측정하기 위해 본 연구의 감도 목표치인 0.002deg/sec의 회전율부터  $\pm 30deg/sec$  까지 회전율을 변화 시키며 출력을 측정했다. 외란 및 Drift 오차를 제거 하고자 정지 상태 Offset을 제거한 회전율을 측정하였으며, 그림 과 같이 모터 진동에 의한 영향으로 60sec동안 평균 회전율을 그림 7에 나타내었다. 여기서 제작된 광자이로스코프의 측정 가능한 최저 회전율은 0.002deg/sec 이며, Scale factor error는 2,036ppm으로 측정되었다.

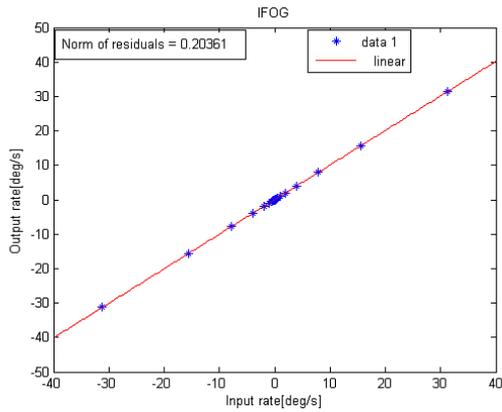


그림 7. 회전율 대한 FOG 응답특성

#### 4.2. Allan variance 분석

제작된 광자이로스코프의 성능을 평가하기 위해 IEEE에 명시된 Allan variance를 이용하여 성능을 분석했다. Allan variance은 식(6)으로 표현되며,

$$AVAR^2(\tau) = \frac{1}{2(n-1)} \sum_i (y(\tau)_{i+1} - y(\tau)_i)^2 \quad (6)$$

Angle random walk 및 Bias instability를 그림 10에 나타내었다. 가로축은 출력 평균을 구하기 위한 단위 시간의 길이( $\tau$ )이며, 세로축은 출력 평균의 편차이다. 그림 에서 FOG의 Bias instability는  $0.22^\circ/hr$ 로 측정되었으며, Angle random walk는  $0.07^\circ/\sqrt{hr}$ 로 측정되었다.

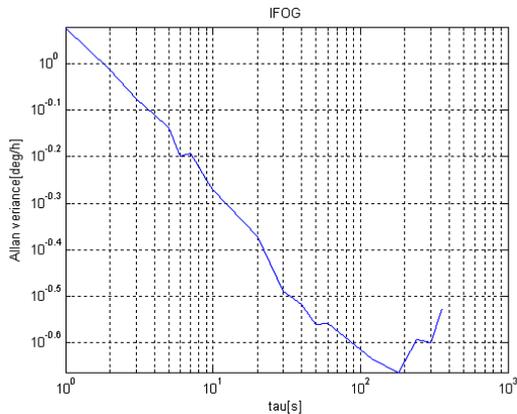


그림 10. FOG Allan variance 응답특성

여기서  $n$ 은 데이터의 개수,  $y$ 는  $\tau$ 구간의 평균을 나타낸다.

#### 5. 결론

본 논문에서 제작한 FOG는 디지털 신호처리를 통한 성능개선을 위해 Lock-in증폭기와 여러 번의 필터링을 거치면서 SNR을 개선하였으며, 효율적 신호처리부 구성을 위해 CIC필터를 설계하여 적용하였다. CIC필터를 적용함으로써 9,764Logic만으로 신호처리부를 구성 했고, Allan variance 및 회전테스트를 통해 성능을 분석하였다. CIC필터를 적용한 신호처리부 설계는 Altera사의 저가형 디바이스인 CycloneIII 로도 구성하기에 충분하며, 저가형 FOG의 설계에 적합하다. 이러한 CIC필터는 덧셈기만으로 구현할 수 있는 간단한 구조의 필터이므로, CIC필터만을 사용하여 구현할 경우 일반적인 DSP프로세서를 통해서도 구현이 가능하다.

#### 참고문헌

- [1] Hua Lia, Shufen Chena, and Lei Fua, "A novel realization of signal processing to improve the precision of the open-loop IFOG", SPIE, vol. 5634, pp. 323-329, 2005.
- [2] "The Digital Lock-in Amplifier", AMETEK, V3.1.
- [3] B.Hillerich, E.Weidel,"Polarization noise in single mode fibers and its reduction by depolarizers", Optical and Quantum Electronics, pp. 281-286, 1983
- [4] 김용재 "Single mode fiber를 이용한 비편광 광자이로스코프 설계 및 제작", 국립창원대학교. 제어계측공학과. 석사학위논문. 2007.
- [5] Brian Culshaw, Alan Rogers, and Henry Taylor, "The fiber-optic gyroscope", Artech House, 1993.