

## 자동차 주행용 광섬유 자이로스코프 개발\*

이승원 · 박경섭  
제어계측공학과

### <요 약>

적당한 성능의 광섬유 자이로스코프는 자동차 주행용의 회전율 측정 센서로 사용할 수 있다. 본 논문에서 구성한 광섬유 자이로스코프 시스템은 개회로 방식의 신호 처리를 하며, 단일 모드 광섬유와 방향성 결합기를 이용하여 시스템을 광섬유 일체식으로 구성하였다. 광원으로는 비편광 광원인 He-Ne 레이저를 사용하였다. 자동차 주행용으로 사용할 수 있도록 간단한 구성과 저가격이 되도록 하였다.

본 논문에서는 modified  $J_1 \cdots J_4$  방법을 응용한 신호 처리 방식을 사용하였다. 간섭계 출력을 고속 푸리에 변환(fast Fourier transform : FFT)하여 4 개의 연속 고조파를 구한 다음, modified  $J_1 \cdots J_4$  를 적용하여 변조도(modulation index)를 구한다. 이 방법은 광원의 파장 변동이나 편광 상태의 변화 등에 상관없이 계측할 수 있다. 여기서 구한 변조도를 이용하여 Bessel 함수  $J_n(x)$  를 계산한 결과와, 두 고조파의 비로 간단하게 회전율을 구할 수 있었다.

---

## Development of Fiber-Optic Gyroscope for Automobile Navigation

Seung-Won Lee, Kyeong-Seob Park  
Dept. of Control and Instrumentation Engineering

### <Abstract>

Fiber-optic gyroscope of modest performance can be used as angular rate sensor for vechile navigation

---

\* 이 연구는 1996 년도 울산대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

on land. A practical design is used an open-loop configuration with an all-fiber optical system together with single-mode fiber and directional coupler. We use the unpolarized light source, He-Ne laser as light source, and design simple construction for low cost.

In this paper, we used the modified  $J_1 \cdots J_4$  method which apply the signal processing technique. Measurements were made of the amplitudes of four harmonics in the electrical spectrum of the output of an interferometer using fast Fourier transform(FFT), and modified  $J_1 \cdots J_4$  was used to determine the amplitude of the modulation index. This method allowed us independents of the wavelength fluctuation of source and state of polarization changes in measurement. We can simply get the rotation rate with two harmonics ratio, Bessel function,  $J_n(X)$  and the modulation depth

## 1. 서 론

광섬유를 이용하여 각종 물리량을 정밀 측정하는 광섬유 센서 기술이 여러 분야에 응용됨에 따라, 최근 광섬유 센서에 관한 연구 개발이 활발히 진행되어 왔다. 광섬유 센서는 고감도를 가지기 때문에 기존의 센서로 검출하기 힘든 극소 변화의 검출에 적합하며, 고온, 고압 등의 환경에서도 사용이 가능하다. 또한 전자기 간섭을 받지 않으며 임의의 형태로 제작이 가능하다는 장점으로 각속도, 자기장, 온도, 압력 등의 측정에 활용되고 있다[1].

이중에서도 관성 회전(inertial rotation)의 정확한 측정의 필요성이 여러 분야에서 요구되었다. 빛을 이용한 회전을 측정은 1913년 Sagnac에 의해 처음 시도 되었는데, 그 효과가 매우 작았다. 그 후 1960년 레이저 개발에 의해 Sagnac 간섭계의 문제를 해결한 실질적인 관성 회전 측정 센서인 RLG(Ring Laser Gyroscope)가 1963년 Macek 과 Davis에 의해 개발되었다. 광섬유를 이용한 Sagnac 간섭계의 실현은 1976년 Vali와 Shorthill에 의하여 처음 시도된 이후, 이 간섭계를 이용하여 회전 감지기를 구성하려는 연구가 전 세계적으로 활발하게 진행되어 왔다. 광섬유 자이로스코프(fiber-optic gyroscope)는 군사용, 산업용 등 그 응용 범위가 넓으며, 기존의 자이로스코프에 비해 부피가 작고, 수명이 길다는 장점이 있다. 앞으로는 광섬유 자이로스코프가 기존의 관성 회전 측정 장치를 대체할 전망이다 [7].

광섬유 자이로스코프에서 회전 감지계가 회전하게 되면 서로 역방향으로 진행하는 두 빛 사이에 위상차가 생기게 되며, 이를 광 검출기에서 측정하게 된다. 그러나 회전에 의한 위상차 외에도, 광섬유의 특성이나 광학적 성질 등에 의한 비가역 위상차(nonreciprocal phase difference)가 생기게 된다. 광섬유 자이로스코프와 같은 간섭계형 센서에서의 비가역 위상차는 원래의 신호와 구별이 잘 되지 않는다. 비가역 위상차를 일으키는 요인들로는 광섬유의 복굴절(birefringence)에 의한 편광 상태의 변화[4], Rayleigh 후방 산란[2], optical

Kerr 효과[3] 등이 있으며, 이를 줄이거나 제거하기 위해서는 적당한 광원 과 가역성(reciprocity)을 만족하도록 시스템을 설계할 필요가 있다. 광섬유의 복굴절에 의한 편광 상태의 변화는 편광기(polarizer)나, 편광 유지 광섬유(polarization holding fiber)를 사용하여 줄일 수 있다. 편광 유지 광섬유(polarization holding fiber)를 사용하여 줄일 수 있다.

광섬유는 빛이 광섬유 속을 진행하면서 동일한 편광이 유지 되므로 편광에 의한 비가역 위상차를 줄일 수 있다[5]. 그리고 Rayleigh 후방 산란과 optical Kerr 효과는 광원의 가간섭 길이(coherence length)가 짧고 출력이 큰 LD(laser diode)나 SLD(superluminescent diode)를 사용하여 줄일 수 있다. 최근에는 희토류 원소가 첨가된 광섬유(Rare-earth doped fiber)를 이용한 광원이 개발되었다[9].

광섬유 자이로스코프의 신호 처리 방식은 크게 폐회로 방식(closed loop)[11]과 개회로 방식(open loop)으로 나눌 수 있다. 폐회로 방식은 높은 감도와 scale factor의 선형성 등이 뛰어나지만 신호 처리 방식이 복잡하다. 반면 개회로 방식은 신호 처리는 간단하지만, 광원이나 검출기의 출력 변동이나 전자 회로의 drift 등의 변화에 민감하다. 그러나 최근에 개회로 방식에 더욱 개선된 디지털 신호 처리[10]가 연구되어져 이러한 문제점이 많이 해결되어 관성 항법에 이용할 만한 수준까지 되었다.

본 논문은 저가의 자동차 주행용 광섬유 자이로스코프 구현에 목적을 두고 있다. 기존의 RLG 나 광섬유 자이로스코프 등은 자동차 주행용으로 사용하기에는 그 가격이 비싸다는 문제가 있었다. 또한 폐회로 방식은 개회로 방식에 비해 가격을 줄이기 힘들기 때문에 본 논문에서는 간단한 구성과 저가격이 되도록 시스템을 구성하였다. 단일 모드 광섬유(single-mode fiber)와 방향성 결합기(directional coupler)를 이용하여 전체 시스템을 광섬유로 구성하였다. 신호 처리는 간섭계 출력을 고속 푸리에 변환(fast Fourier transform : FFT)하여 4 개의 연속 고조파를 구한 다음, 두 고조파의 비로 간단하게 회전율을 구하는 개루프 방식을 적용하였다[7].

## 2. 광섬유 자이로스코프의 기본 원리

### 2.1. Sagnac 효과

폐회로로 구성된 간섭계에서 빛이 서로 역방향으로 진행할 때, 이 시스템을 회전시키면 서로 역방향으로 진행하는 두 빛 사이에 간섭 무늬가 검출된다. 1913년 G. Sagnac 이 발표한 이 간섭계를 Sagnac 간섭계라 하며, 이러한 간섭 무늬가 나타나는 것을 Sagnac 효과라 한다. 모든 광학적 자이로스코프의 동작 원리는 회전율( $\Omega$ )에 비례한 광경로차( $\Delta L$ )를 만드는 Sagnac 효과에 기초한다.

회전율( $\Omega$ )에 따른 Sagnac 위상차,  $\Delta\phi$ 는

$$\Delta\phi = \frac{8\pi A}{\lambda c} \cdot \Omega = K \cdot \Omega \quad (1)$$

여기서  $K$ 는 scale factor,  $A$ 는 폐경로의 면적이다. 따라서 회전율에 따라 위상 변위6가 나타나므로 이러한 위상 변위를 측정 함으로서 상대적인 회전율의 측정이 가능함을 알 수 있다.

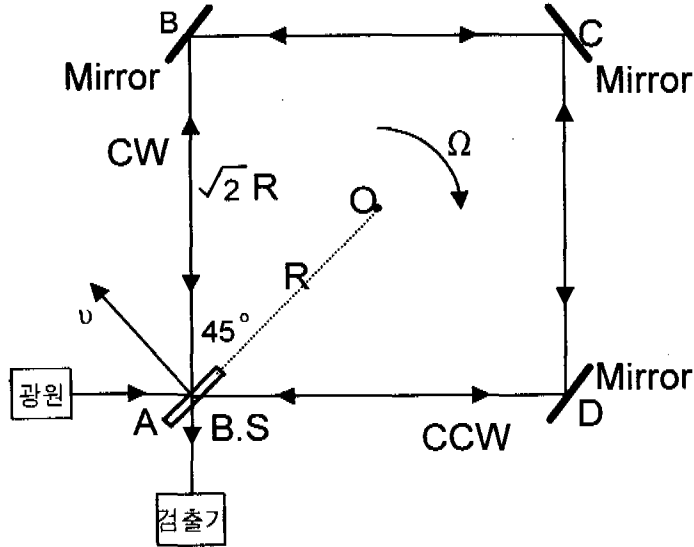


그림 1. Sagnac 간섭계

Sagnac 간섭계에서 빛의 경로를 자유 공간 대신 광섬유로 대체한 것이 광섬유 자이로스 코프이다. 광섬유 자이로스 코프가 회전하지 않을 때에는 두 빛이 같은 경로를 겪게 되어 위상차가 생기지 않으나,  $\Omega$ 의 속도로 회전하게 되면 회전 속도에 비례한 위상차가 발생하게 된다. 식 (1)을 광섬유로 회전 감지계를 구성한 경우로 고쳐 쓰면 다음과 같다.

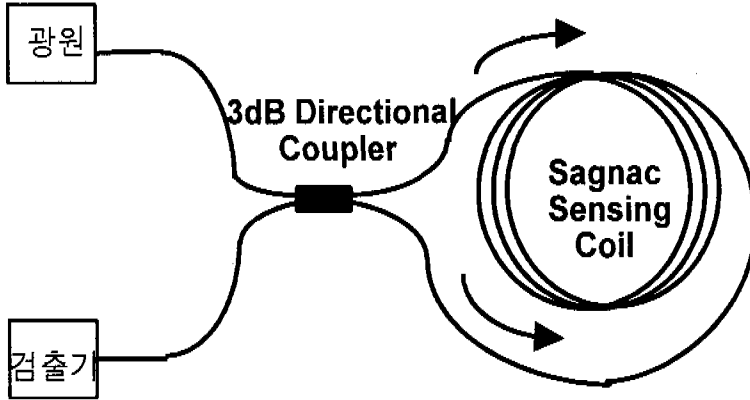


그림 2. 광섬유로 구성된 자이로스코프

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \frac{8\pi AN}{\lambda c} \Omega \\ &= \frac{4\pi LR}{\lambda c} \Omega \end{aligned} \tag{2}$$

여기서,  $L (= 2\pi RN)$ 은 광섬유의 길이,  $R$ 은 광섬유 코일의 직경, loop 면적  $A$ 는  $\pi R^2$ 이다.  $\lambda$ 는 진공 속에서의 파장이다. 식 (2)에서 보듯이 광섬유 자이로스코프는 광섬유 코일 부분의 직경과 코일에 감긴 광섬유의 길이가 길수록 Sagnac 위상차는 증가한다.

## 2.2. 위상 바이어스

두 빛 사이의 위상차를  $\Delta\phi$ 라 하면, 방향성 결합기의 결합 비율이 50/50 이고, 광섬유 손실을 무시하면, 광 출력  $I_D$ 은

$$I_D = \frac{1}{2} I_0 (1 + \cos \Delta\phi) \tag{3}$$

두 빛의 위상차  $\Delta\phi$ 는 이상적인 경우 이 간섭계의 회전 각속도  $\Omega$ 에 비례하며, 그 외의 변수에는 영향을 받지 않는다. 식 (3)에 대한 출력은 그림 3에 나타냈으며 이 그림에서 보듯이 미소 회전을 측정은  $\Delta\phi = N\pi (N = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots)$  근처에서는 어려우므로, 가장 감도가 좋은 부분에서 동작이 되도록 바이어스를 걸어주어야 한다. 위상 바이어스(phase bias)를 걸어 주는 방법을 그림 4에 보였다. 그림 4(a)와 같이 위상 바이어스를 걸어줄 경우, 광원이나 검출기의 출력이 변하면 회전

신호와 구분이 모호해지는 단점이 있다. 따라서 그림 4-(b)와 같이 대칭적으로 위상 바이어스를 걸어 주어야 한다. 이렇게 하면 광원이나 검출기의 광 출력이 변하더라도 그 출력차는 0이 된다.

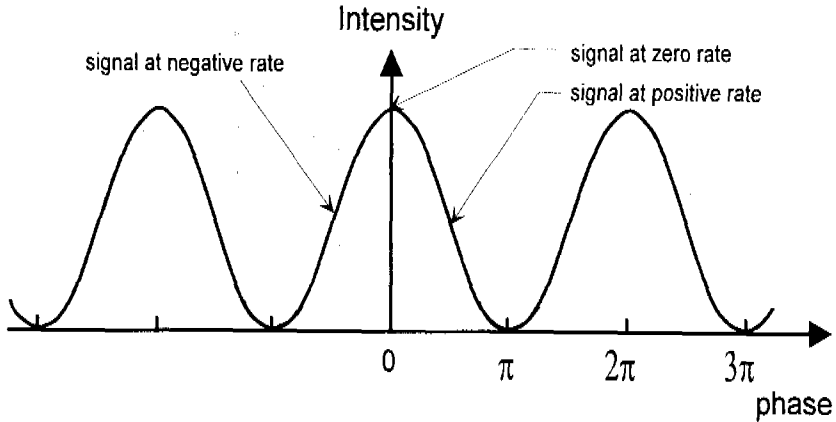


그림 3. Sagnac 간섭계의 출력

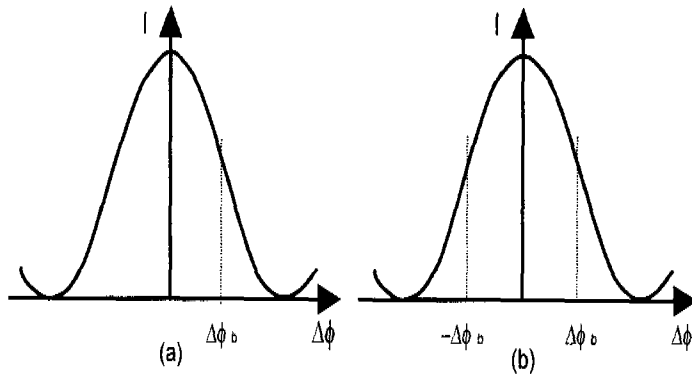


그림 4. 광 세기 대 위상차의 관계

(a) 위상 바이어스( $\Delta\phi_b$ )

(b) 위상 바이어스( $\pm \Delta\phi_b$ )

위상 바이어스를 대칭적으로 걸어주기 위한 가장 좋은 방법은 그림 5에서 보는 바와 같이 광섬유 코일 한쪽 끝에 위상 변조기(phase modulator)를 놓고 서로 역방향으로 진행되는 두 빛에 대해 위상차를 변조시키는 방법이다[8].

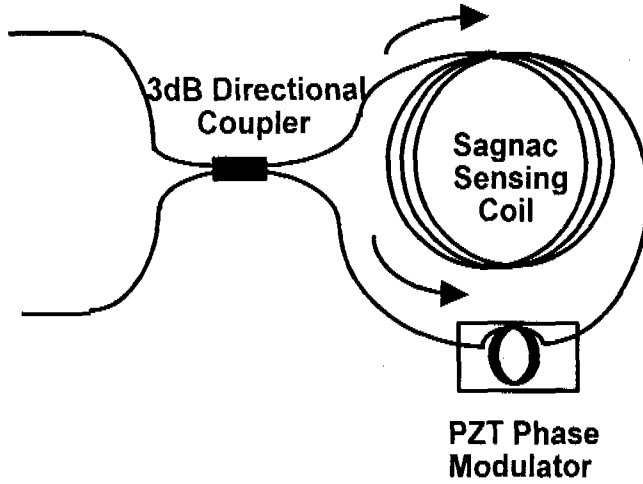


그림 5. Sagnac 간섭계에서 위상 변조기의 위치

위상 변조를 하였을 때, 서로 역방향으로 진행하는 두 빛 사이의 위상차  $\Delta\phi(t)$ 는

$$\Delta\phi(t) = \phi(t) - \phi(t - \tau) \tag{5}$$

이고, 여기서  $\tau$ 는 빛이 광섬유 코일을 통과하는데 걸리는 시간이다. 위상 변조기에서  $\phi(t) = \phi_0 \cos \omega_m t$ 의 신호로 위상차를 변조하면, 광섬유 코일에서 서로 역방향으로 진행하는 두 빛 사이에 나타나는 위상차  $\Delta\phi(t)$ 는

$$\begin{aligned} \Delta\phi(t) &= \phi_0 [\cos \omega_m t - \cos \omega_m (t - \tau)] \\ &= 2\phi_0 \sin\left(\frac{\omega_m \tau}{2}\right) \sin \omega_m \left(t - \frac{\tau}{2}\right) \end{aligned} \tag{6}$$

이다. 여기서 주어진  $\phi_0$ 에 대하여 서로 역방향으로 진행하는 두 빛의 위상차 변조를 가장 크게 해주는 주파수는  $\omega_m \tau = \pi$ 일 때이며, 이 변조 주파수를 적정 주파수(proper frequency)라고 한다. 적정 주파수에서 위상 변조를 하면 진폭 변조(amplitude modulation)와 편광 변조(polarization modulation)에 의한 위상 오차를 줄일 수 있다.  $t - \tau/2 = t'$ 라고 하고, 회진에 의하여 나타난 위상차를  $\Delta\phi_R$ 이라 할 때, 전체 위상차  $\Delta\phi(t')$ 은

$$\begin{aligned} \Delta\phi(t') &= \Delta\phi_R + 2\phi_0 \sin\left(\frac{\omega_m \tau}{2}\right) \sin \omega_m t' \\ &= \Delta\phi_R + x \sin \omega_m t' \end{aligned} \tag{7}$$

이고, 여기서  $x = 2\phi_0 \sin\left(\frac{\omega_m \tau}{2}\right)$ 이다. 이때 광 세기  $I_D$ 는

$$I_D = \frac{I_0}{2}(1 + \cos \Delta\phi(t')) \quad (8)$$

이다.  $t' = t$ 로 놓고, (7)식을 (8)식에 대입하여 전개하면

$$\begin{aligned} I_D &= \frac{I_0}{2} [(1 + \cos(\Delta\phi + x \sin \omega_m t))] \\ &= \frac{I_0}{2} \{1 + [J_0(x) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(x) \cos 2n\omega_m t] \cos \Delta\phi_R \\ &\quad - [2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(x) \cos(2n-1)\omega_m t] \sin \Delta\phi_R \} \end{aligned} \quad (9)$$

이 된다. 여기서  $J_n(x)$ 는  $n$ 번째 Bessel 함수이다. 회전이 없는 경우에는 식 (9)에서  $\Delta\phi_R = 0$ 이고 따라서 홀수 함수(odd function)는 나타나지 않고 짝수 함수(even function)만 남게 된다(그림 6-(a)). 회전이 있으면 Sagnac 위상차  $\Delta\phi_R$ 이 발생하며,  $\sin \Delta\phi_R$ 에 비례하는 홀수 함수 성분의 값을 갖게 된다(그림 6-(c)).



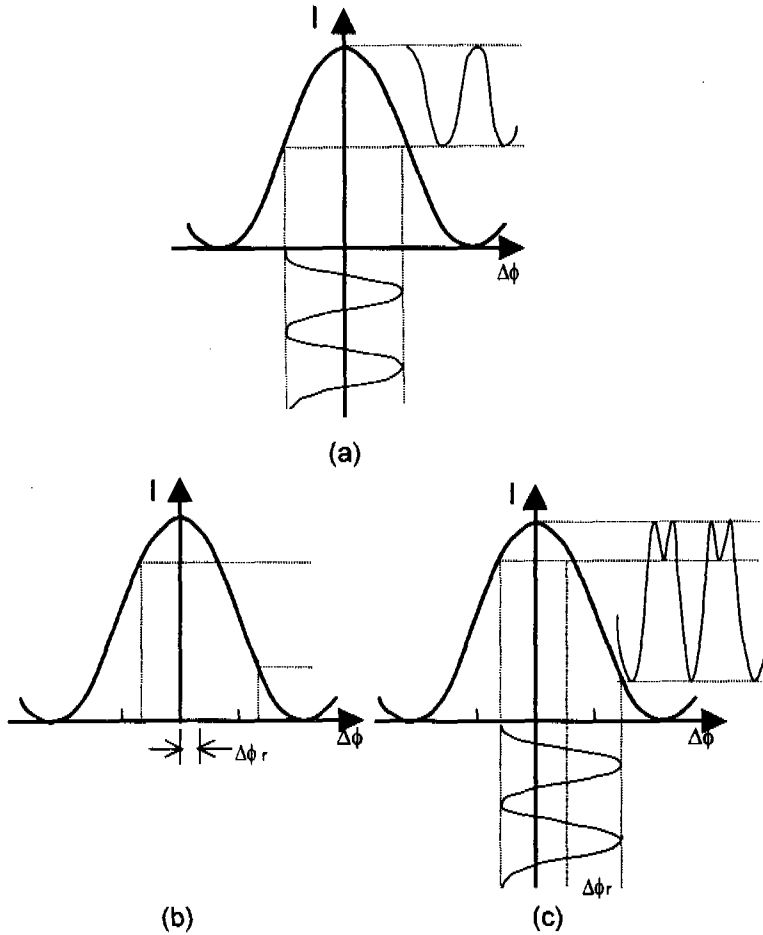


그림 6. 자이로스코프에서 위상 변조를 할 때의 출력 특성

- (a) 정지 상태의 출력 특성
- (b) 회전에 의한 위상차( $\Delta\phi_r$ )가 생겼을 때
- (c) 회전하고 있을 때의 출력 특성

### 3. 광섬유 자이로스코프

#### 3.1. 신호 처리 방법

위상 변조기에  $\phi(t) = \phi_0 \cos \omega_m t$ 의 신호로 위상차를 변조해 주었을 때의 간섭계의 출력 세기는

$$I_D(t) = \frac{I_0}{2} \{1 + \cos[\Delta\phi_R + x \sin(\omega_m t + \phi_s)]\} \quad (10)$$

가 된다. 여기서  $I_0$ 는 입력광의 세기이고  $x$ 는 변조도,  $\Delta\phi_R$ 은 회전에 기인한 Sagnac 위상차이다.  $J_1 \cdots J_4$  방법[1]은 간섭계 출력의 스펙트럼 분석에 의해 동적 위상 변화를 검출하는 것으로, 아래 식 (11)에서 보듯이 간단하게 변조도를 결정할 수 있다. 그러나 이 방법은 각 고조파의 크기만을 취하기 때문에 항상 양수만 가지게 된다. 따라서 각 고조파의 하나 혹은 그 이상이 음수가 되면, 변조도 값을 정확히 측정하는 데는 불충분하다.

$$x^2 = \frac{24J_2(x)J_3(x)}{[J_2(x)+J_4(x)][J_1(x)+J_3(x)]} \quad (11)$$

간섭계 출력을 cosine 과 sine 푸리에 급수 표현을 사용하여 동적인 위상 변조도를 결정하는 modified  $J_1 \cdots J_4$  방법[12]은 Bessel 함수의 부호를 지니고 있어 모든 변조도에 대해서 계산이 가능하다. 식 (10)을 Bessel 함수로 나타내면

$$\begin{aligned} I_D(t) = \frac{I_0}{2} \{ & 1 + [J_0(x) + 2\sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(x) \cos(2n\omega_m t) \cos(2n\phi_s) \\ & - \sin(2n\omega_m t) \sin(2n\phi_s)] \cos \Delta\phi_R \\ & - [2\sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(x) (\cos(2n-1)\omega_m t \cdot \cos(2n-1)\phi_s \\ & + \cos(2n-1)\omega_m t \cdot \sin(2n-1)\phi_s)] \sin \Delta\phi_R \} \end{aligned} \quad (12)$$

으로 되며, 또한 식 (10)은 푸리에 급수로 전개할 수 있다.

$$I_D(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_m t) - b_n \sin(n\omega_m t)] \quad (13)$$

여기서  $a_n$  과  $b_n$  은 푸리에 계수를 나타낸다. 식 (12)와 식 (13)을 비교하면

$$\begin{aligned} \text{odd terms} & \begin{cases} a_{2n-1} = -I_0 J_{2n-1}(x) \sin \Delta\phi_R \sin(2n-1)\phi_s, \\ b_{2n-1} = I_0 J_{2n-1}(x) \sin \Delta\phi_R \cos(2n-1)\phi_s, \end{cases} \quad (14) \\ \text{even terms} & \begin{cases} a_{2n} = I_0 J_{2n}(x) \cos \Delta\phi_R \cos 2n\phi_s, \\ b_{2n} = I_0 J_{2n}(x) \cos \Delta\phi_R \sin 2n\phi_s, \quad (n=1,2,3,\dots) \end{cases} \quad (15) \end{aligned}$$

으로, 간섭계 출력을 샘플링(sampling)하여 고속 푸리에 변환을 하면 위의 계수 값들을 구

있다. 식 (14)와 식 (15)는 FFT의 홀수 고조파(odd harmonics)의 실수부와 허수부를 나타내며, 식 (16)과 식 (17)은 짝수 고조파(even harmonics)의 실수부와 허수부를 나타낸다. FFT의 계수  $a_n$ 과  $b_n$ 은 음수 혹은 양수를 가지게 된다.

$c_n$  ( $n = 1, 2, \dots$ )을 다음과 같이 정의하면

$$c_{2n-1} = I_0 J_{2n-1}(x) \sin \Delta\phi_R = \begin{cases} -\frac{a_{2n-1}}{\sin(2n-1)\Delta\phi_s}, & |a_{2n-1}| > |b_{2n-1}| \\ \frac{b_{2n-1}}{\cos(2n-1)\Delta\phi_s}, & |a_{2n-1}| < |b_{2n-1}| \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} \frac{b_{2n-1}}{\cos(2n-1)\Delta\phi_s}, & |a_{2n-1}| < |b_{2n-1}| \end{cases} \quad (19)$$

$$c_{2n} = I_0 J_{2n}(x) \cos \Delta\phi_R = \begin{cases} -\frac{a_{2n}}{\sin 2n\Delta\phi_s}, & |a_{2n}| > |b_{2n}| \\ \frac{b_{2n}}{\cos 2n\Delta\phi_s}, & |a_{2n}| < |b_{2n}| \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} \frac{b_{2n}}{\cos 2n\Delta\phi_s}, & |a_{2n}| < |b_{2n}| \end{cases} \quad (21)$$

여기서  $c_{2n-1}$ 과  $c_{2n}$ 은 각각 홀수와 짝수 고조파의 크기(amplitude)로 표시되어지며,  $x$ 와  $\Delta\phi_R$ 에 따라 음수 혹은 양수 값을 가진다.

이론적으로,  $\phi_s$ 를 알고 있다면,  $c_{2n-1}$ 은 식 (18)과 식 (19)로 계산할 수 있으며, 두 계산 값은 같다. 비슷하게,  $c_{2n}$ 도 식 (20)과 식 (21)로 계산할 수 있다. 계산상의 오차를 줄이기 위해서는 분자와 분모가 큰 값을 가지는 식 (18) 혹은 식 (19)에 따라  $c_{2n-1}$ 의 값을 선택한다. 만약 분자와 분모 둘 다 작은 경우에는 큰 오차를 발생시킨다. 비슷한 방법으로 식 (20) 혹은 식 (21)로부터  $c_{2n}$ 을 선택할 수 있다.

위의 식을 적용하면

$$x^2 = \frac{24c_2 \cdot c_3}{(c_2 + c_4)(c_1 + c_3)} \quad (22)$$

으로 되어, 편광의 변화 등에 상관없이 간단하게 변조도를 구할 수 있다. 위의 방법을 적용하기 위해서는  $\phi_s$ 를 알고 있어야 한다.  $\phi_s$ 는 임의의 각으로 매 샘플링 때마다 다른 값을 가지기 때문이다. 만약  $\sin \Delta\phi_R$ 가 작지 않을 때,  $n = 1$ 로 정하고 식 (14)와 식 (15)에서

$$\tan \phi_s = -\frac{a_1}{b_1} \quad (23)$$

으로,  $\phi_s$ 는  $0 \leq \phi_s < 2\pi$  범위에서 두개의 값을 가진다.

$$\phi_s = \theta \quad (24)$$

$$\phi_s = \pi + \theta \quad (25)$$

따라서 다음과 같이 된다.

$$\theta = \tan^{-1}\left(-\frac{a_1}{b_1}\right) \quad (26)$$

만약  $\sin \Delta\phi_R$ 가 작으면,  $\cos \Delta\phi_R$ 가 크므로, 식 (16)와 식 (17)에서  $n=1$ 로 하면

$$\tan 2\phi_s = \frac{b_2}{a_2} \quad (27)$$

그리고,  $n=1$ 로 하여 식 (14)와 식 (15)을 곱하면 다음과 같이 된다.

$$\sin 2\phi_s = -\frac{a_1 b_1}{l_0^2 J_1^2(x) \sin^2 \Delta\phi_R} \quad (28)$$

여기서  $-a_1 b_1$ 의 부호는  $l_0^2 J_1^2(x) \sin^2 \Delta\phi_R > 0$  이므로  $\sin 2\phi_s$ 와 같다. 따라서  $-a_1 b_1$ 을 계산하여  $2\phi_s$ 의 범위를 알 수 있다.  $0 < \phi_s < 2\pi$  (i.e.,  $0 < 2\phi_s < 4\pi$ ) 범위에서  $\phi_s$  또한 두 값을 가진다.

$$\phi_s = \theta \quad (\text{i.e., } 2\phi_s = 2\theta) \quad (29)$$

$$\phi_s = \pi + \theta \quad (\text{i.e., } 2\phi_s = 2\pi + 2\theta) \quad (30)$$

여기서  $-a_1 b_1$ 의 부호에 따라  $2\theta = \tan^{-1}(b_2/a_2)$  혹은  $2\theta = \pi + \tan^{-1}(b_2/a_2)$ 이다. 지금까지의 해석에서  $\phi_s$ 는  $\theta$  혹은  $\pi + \theta$ 의 두 값을 가진다. 이 두 값을 식 (18)~(21)에 대입한 다음 식 (22)를 계산하면, 같은 결과가 나옴을 알 수 있다. 이렇게 되는 이유는 다음과 같다.

$$\left. \begin{array}{l} \sin \\ \cos \end{array} \right\} (2n-1)(\pi + \theta) = \left. \begin{array}{l} -\sin \\ -\cos \end{array} \right\} (2n-1)\theta \quad (31)$$

$$\frac{\sin}{\cos} \left\{ 2n(\pi + \theta) \right\} = \frac{\sin}{\cos} \left\{ 2n\theta \right\} \quad (32)$$

식 (22)의 계산에서 분자와 분모는 동시에 부호가 변하게 된다. 따라서 최종 결과는 동일하게 유지된다.

### 3.2. 광섬유 자이로스코프의 구성

자동차 주행용으로 구현한 광섬유 자이로스코프의 전체 구성도는 그림 7 과 같다. 광원은 He-Ne(파장 0.6328 $\mu$ m, 출력 2mW) 레이저를 사용하였으며, 단일 모드 광섬유 약 80m 를 직경 15.2cm 인 원통에 169 번 감아 구성하였다. 광섬유 코일은 주위의 여러 가지 환경 변화에 의하여 섭동이 있을 때 서로 역방향으로 진행하는 두 빛이 동일한 영향을 받지 않으면 비가역 위상 오차를 일으키므로, 광섬유 코일의 중심으로부터 광섬유를 대칭으로 감아줘야 한다. 방향성 결합기는 Newport 사의 L2263C50(손실 0.8dB)을, 광섬유의 연결은 Newport 사의 splice(F9/5)를 사용하였다. 그림 7에서 검은 점은 광섬유를 splicing 한 곳을 나타낸다. 위상 바이어스를 걸어주기 위하여 사용한 위상 변조기는 piezoelectric tube(PZT)의 원통에 광섬유를 12 회 감아서 구성하였다. 사용한 PZT 는 16-16062 tubes PZT 로 Vernitron 사 제품을 사용하였다. 광학 시스템은 모두 광섬유를 사용하였으며 최소의 구성이 되도록 하였다.

Modified  $J_1 \cdots J_4$  방법을 광섬유 자이로스코프에 적용하여 회전을 구하여 보면, 식 (22)에서 계산한 변조도로 Bessel 함수의  $J_n(x)$ 를 구할 수 있다. 간접계 출력의 1 차 고조파와 2 차 고조파의 비를 구하면

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{J_1(x)}{J_2(x)} \tan(\Delta\phi_R) \quad (33)$$

으로 회전에 의한 위상차를 구할 수 있다. Sagnac 위상차  $\Delta\phi_R$  은

$$\Delta\phi_R = \tan^{-1} \left( \frac{J_2(x) \cdot c_1}{J_1(x) \cdot c_2} \right) \quad (34)$$

으로, 입사광의 세기,  $I_0$ 의 변동에 무관하게 회전을 구할 수 있다.

Modified  $J_1 \cdots J_4$  방법을 이용할 경우 변조도를 광원의 파장 변동이나 편광의 변화, 외부 환경 등에 의한 불규칙 위상 변화 등에 관계없이 선형적으로 구할 수 있다. 이 방법을 이용하여 구한 변조도로 Bessel 함수의 각 성분을 찾은 다음, 고속 푸리에 변환한 간접계 출력의 1 차와 2

차 고조파의 비로 간단하게 회전율을 측정할 수 있다.

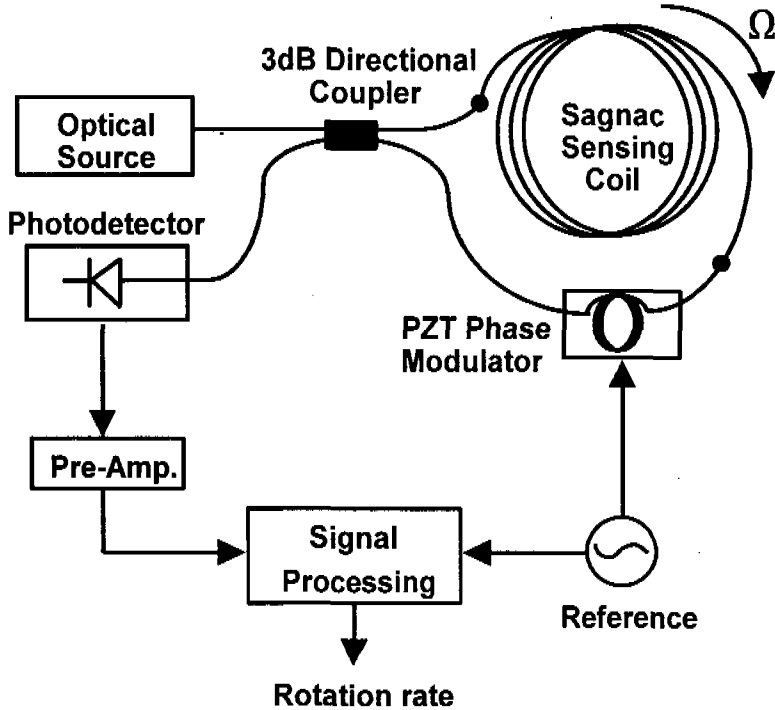


그림 7. 광섬유 자이로스코프

#### 4. 실험 결과 및 평가

데이터의 획득에 사용한 A/D 변환기는 4 채널에, 각 채널당 변환 시간이  $8\mu\text{s}$  이고 12bit 분해능(resolution)을 가지는 AD 7874 를 사용하였다. 샘플링 주파수는 20kHz 이며, 위상 변조기에 인가한 변조 주파수는 1kHz로 하였다. 변조 주파수를 낮게 잡은 이유는, 1km의 광섬유를 사용할 경우 적정 변조 주파수는 100kHz가 되지만, 약 80m의 광섬유일 경우는 이보다 더 높은 1.25MHz가 된다. 본 논문에서는 주파수 분석에 의하여 회전율을 검출하는 관계로, 주파수를 높게 할 경우 A/D 변환기의 샘플링 주파수가 높아져 데이터 획득 회로를 구성할 때 가격이 올라가게 된다. 그리고 modified  $J_1 \cdots J_4$  방법으로 신호 처리를 하게 되면 편광에 의한 위상 오차를 무시할 수 있기 때문이다.

간접계 출력에서 각 고조파 성분을 측정하기 위하여 A/D 변환기로 샘플링한 데이터를 Cooley-Turky 알고리즘을 이용한 256 point FFT 를 하였다.

먼저 시뮬레이션을 통하여, modified  $J_1 \cdots J_4$  방법을 적용하여 회전율을 측정해 보았으며, 위

상 변조기에 인가할 적정 변조도를 구하였다. 그림 8은 불규칙 위상 변화를 인가하지 않은 상태에서 시뮬레이션한 결과로 적정 변조도가 2.5일 때 선형적으로 회전율을 측정할 수 있었다. 그림 9는 불규칙 위상 변화를 인가하였을 때의 결과이다. 불규칙 위상 변화가 인가 되었지만 거의 선형적으로 회전율을 측정할 수 있음을 볼 수 있다.

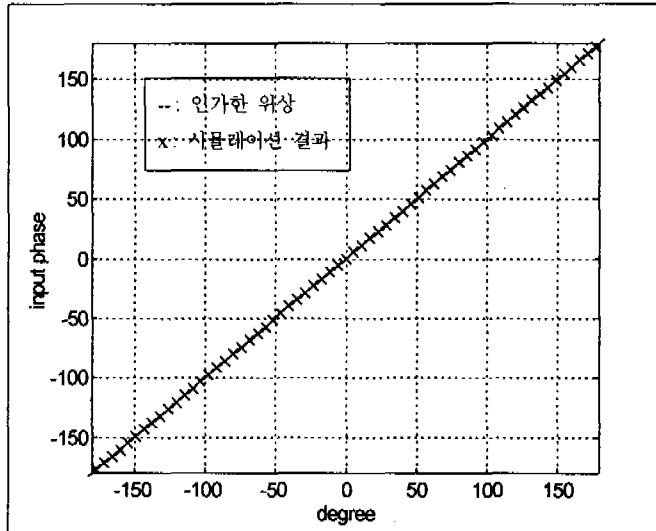


그림 8. 불규칙 위상 변화를 인가하지 않았을 때의 시뮬레이션 결과

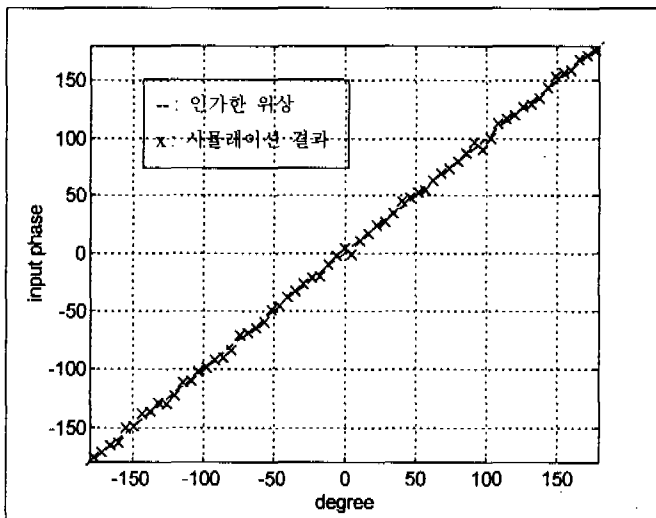


그림 9. 불규칙 위상 변화가 인가되었을 때의 시뮬레이션 결과

정지 상태에서 위상 변조기의 신호와 광원을 차단해 가면서 광섬유 자이로스코프에 존재하는

잡음을 측정하여 보았다. 그림 10은 위상 변조기에 신호를 인가하지 않았을 때의 간섭계 출력이며, 그림 11은 광원을 차단하였을 때의 출력이다. 이 두 그림을 비교해 보면 자이로스코프에 나타난 잡음의 크기가 비슷함을 알 수 있다. 이 잡음은 대개가 전자 회로에서 발생한 것으로 광원에 의한 것보다 자이로스코프의 감도에 더 많은 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

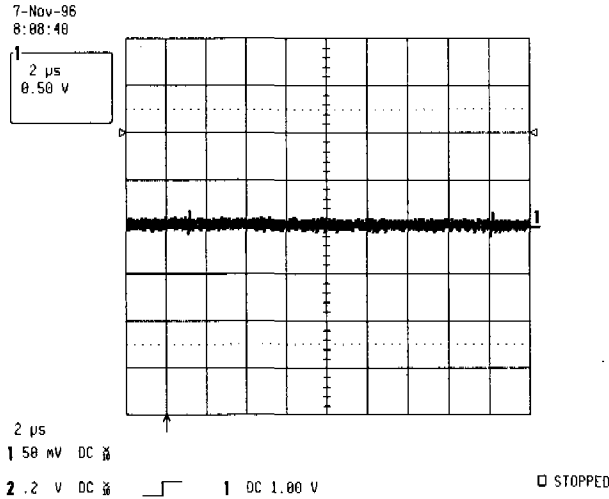


그림 10. PZT 에 전압을 인가하지 않았을 때의 간섭계 출력

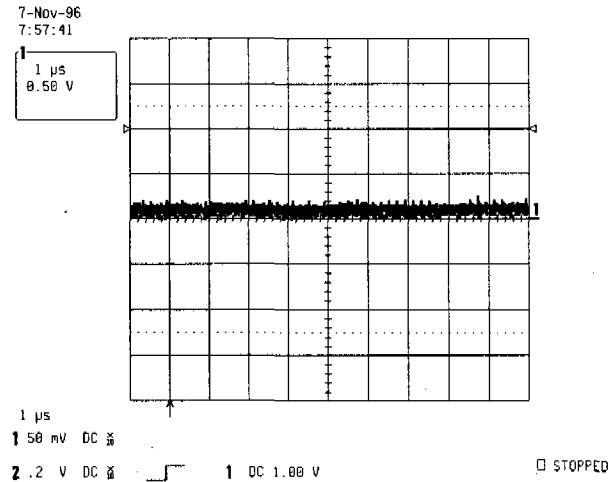


그림 11. 광원을 차단하였을 때의 간섭계 출력

그림 12는 위상 변조기에 변조 신호를 인가하였을 때의 Sagnac 간섭계 출력을 나타낸 것이다. 위의 파형이 간섭계의 출력을 나타내며, 아래의 파형이 위상 변조기에 인가한 신호를 나타낸다. 위상 변조기에 1kHz의 변조 신호를 인가하였을 때, 회전이 없을 경우, 변조기에 인가한 신호가 간섭계의 출력에 나타남을 볼 수 있다.



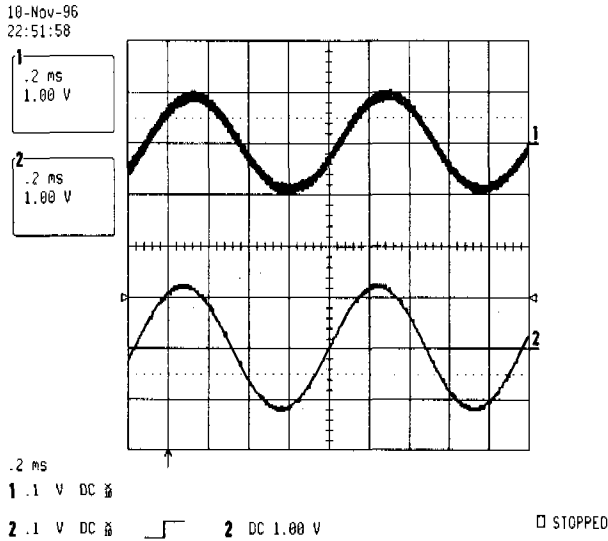


그림 12. PZT 에 신호를 인가하였을 때의 간섭계의 출력

지금까지 시뮬레이션 결과와 Sagnac 간섭계가 정지 상태로 있을 때의 실험 결과를 보였다. 광섬유 자이로스코프에 직류 전동기로 회전량을 인가하여 실험한 결과를 다음에 나타내었다. 그림 13 은 1.5096rad/sec 로 광섬유 자이로스코프가 회전하고 있을 때의 간섭계의 출력이다. 회전에 의해 발생한 Sagnac 위상차 만큼 위상 바이어스 점이 이동 함으로서 간섭계 출력에 고조파 성분이 섞여 나타남을 볼 수 있다. 그림 14 는 인가 회전율이 2.513rad/sec 일 때의 출력이다. 직류 전동기를 구동할 때 발생한 진동의 영향으로 파형이 깨끗하게 나오질 않았으며, 이로 인한 오차가 다소 크게 발생하였다.

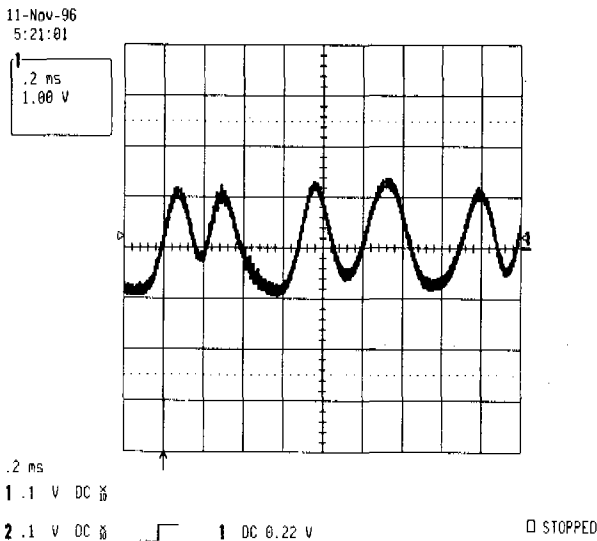


그림 13. 인가 회전량이 1.5096rad/sec 일 때의 간섭계 출력

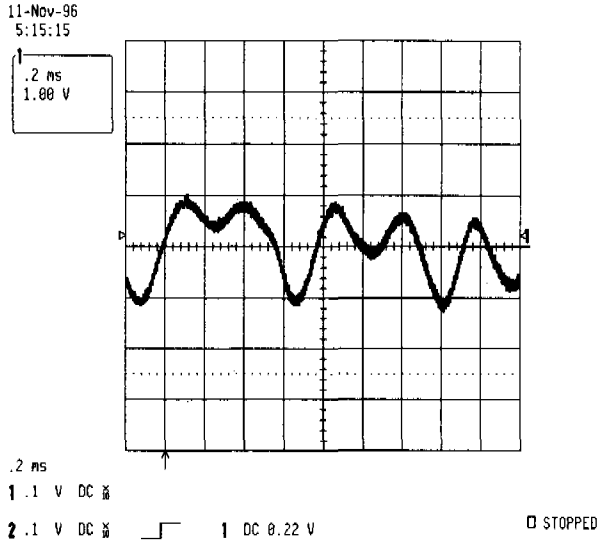


그림 14. 인가 회전량이 2.513rad/sec 일 때의 간섭계 출력

그림 15 는 0.967 ~ 3.127 rad/sec 사이의 속도를 인가하여 회전율을 측정 한 결과이다. 본 시스템이 측정할 수 있는 최소의 감도는 0.688 rad 로 감도가 좋지 않았다.

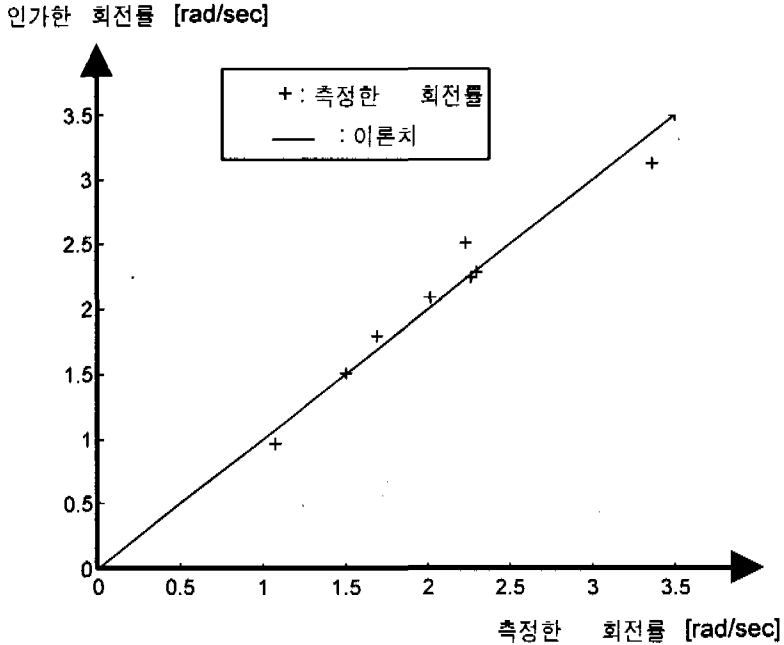


그림 15. 인가 회전 속도에 따라 측정 한 회전율

## 5. 결 론

본 논문에서는 저가격의 자동차 주행용으로 사용할 수 있는 광섬유 자이로스코프 시스템을 구성하여 실험을 하였다. 기존의 광섬유 자이로스코프의 신호 처리 방식은 폐회로 방식을 사용하거나 개회로 방식을 사용하더라도 그 구성이 복잡하였다. 그러나 본 논문에서는 간섭계 출력을 스펙트럼 분석을 하여 4개의 연속하는 고조파를 찾아 modified  $J_1 \cdots J_4$  방법을 이용하여 편광 상태의 변화 등에 관계없이 간단한 방법으로 회전율을 측정하고자 하였다.

먼저 회전 감지계가 정지 상태로 있을 때, 간섭계 출력에 대해 주파수 분석을 하여 1차 고조파와 2차 고조파의 비로 감도를 측정하였다. 본 논문에서 구성한 자이로스코프의 감도는 0.688 rad로 좋지 않게 나왔다. 광섬유 코일을 중심에 대해서 대칭적으로 감아야 하나 정확한 대칭이 되지 않았으며, 사용한 광섬유의 길이가 짧았고, 또한 데이터 획득 회로상의 잡음으로 감도가 나쁘게 나왔다. 따라서 감도를 더 개선하기 위해서는 좀 더 긴 광섬유를 사용하고 광섬유 코일을 정확히 대칭이 될 수 있도록 해야 하며, 전자 회로의 잡음을 줄일 수 있는 방법을 찾아야 할 것이다.

회전 감지계가 회전하고 있을 때, 0.967 ~ 3.127 rad/sec의 속도에 대해서 회전율을 측정하여 본 결과, 검출기 출력이 인가해준 회전 속도에 비례하여 나타났다. 그러나 직류 전동기의 진동에 의한 잡음으로 오차가 다소 크게 나왔다.

## 참 고 문 헌

- [1] 권오서, “ $J_1 \cdots J_4$  방법을 이용한 광섬유 자장계의 구현”, 울산대학교 석사학위논문, 1994.
- [2] C. C. Cutler, S. A. Newton, H. J. Shaw, “Limitation of Rotation Sensing by Scattering”, Opt. Lett., Vol. 5, No. 11, pp. 488-490, 1980.
- [3] R. A. Bergh, H. C. Lefevre, H. J. Shaw, “Compensation of the Optical Kerr Effect in Fiber-Optic Gyroscopes”, Opt. Lett., Vol. 7, No. 6, pp. 282-284, 1982.
- [4] E. C. Kintner, “Polarization Control in Optical-Fiber Gyroscopes”, Opt. Lett., Vol. 6, No. 3, pp. 154-156, 1981.
- [5] W. K. Burns, R. P. Moeller, C. A. Villarruel, M. Abebe, “Fiber-Optic Gyroscope with Polarization-Holding Fiber”, Opt. Lett., Vol. 8, No. 10, pp. 540-542, 1983.
- [6] D. Allen, S. M. Bennett, J. Brunner, R. B. Dyott, “A low Cost Fiber Optic Gyro for Land Navigation”, SPIE, Vol. 2292, Fiber Optic and Laser Sensors XII, pp. 203-217, 1994.
- [7] W. Gopel, J. Hesse, J. N. Zemel, “Sensors - A Comprehensive Survey”, Vol. 6, VCH, 1992.
- [8] R. A. Bergh, H. C. Lefevre, H. J. Shaw, “An Overview of Fiber-Optic Gyroscopes”, J. of Lightwave Tech., Vol. LT-2, No. 2, pp. 91-107, 1984.
- [9] 전민용, “모드록킹된 광섬유 레이저 자이로스코프”, 한국과학기술원 박사학위논문, 1994.
- [10] K. Toyama, K. A. Fesler, B. Y. Kim, H. J. Shaw, “Digital Integrating Fiber-Optic gyroscope with Electronic Phase Tracking”, Opt. Lett., Vol. 16, No. 15, pp. 1207-1209, 1991.
- [11] B. Y. Kim, H. J. Shaw, “Gated Phase-Modulation Approach to Fiber-Optic Gyroscope with Linearized Scale Factor”, Opt. Lett., Vol. 9, No. 8, pp. 375-377, 1984.
- [12] W. Jin, L. M. Zhang, D. Uttamchandani, B. Culshaw, “Modified  $J_1 \cdots J_4$  Method for Linear Readout of Dynamic Phase Changes in a Fiber-Optic Homodyne Interferometer”, Appl. Opt., Vol. 30, No. 31, pp. 4496-4499, 1991.