



위상변조기를 시간에 따라 변하는 전기 신호  $V_m(t)$ 로 구동했을때 두 역회전 빛살들의 위상은 각각  $\phi_m(t)$ 과  $\phi_m(t-T_f)$ 로 변조될 것이다. 여기서  $T_f$ 는 두 역회전 빛살들이 위상변조기를 통과하는 시간차이다. 두 간섭 광학신호에서 Sagnac 위상을 상쇄하기 위한 일정한 광학 위상차를 얻기 위해서는 위상변조  $\phi_m(t)$ 는 시간에 대하여 1차 함수인 경사위상(ramp phase) 이거나 Serrodyne 위상변조를 시켜야 한다. 그러나 광섬유로 된 이런 소자는 개발되지 않았다.

그림 1.과 같이 이상적인 톱니파 위상변조 일때 두 역회전 빛살 사이의 위상차 변조는 변조 주기  $T_m$  사이에서 어느 기간  $T_m-T_f$  또는  $T_f$  동안 일정한 위상차를 얻을 수 있다. 이와 같은 위상차 변조의 주기적 특성을 이용해서 위상차가 일정한 값을 갖는 기간만 광검출기 출력을 통과시킨다. 이 일정한 위상차는 Sagnac 위상차를 상쇄시켜서 개회로 출력은 0이 된다.

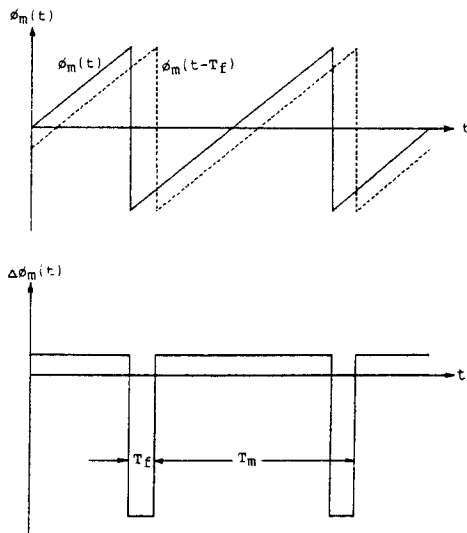


그림 1. 톱니파 신호에 의한 위상차 변조

현재 널리 이용되고 있는 광섬유 위상변조기중 하나는 원통형 PZT에 광섬유를 여러번 감은 것인데, 이러한 변조기는 모양이나 크기에 따라 여러개의 공진 주파수를 갖는다. 그러므로 톱니파나 삼각파와 같은 여러 주파수 성분을 갖는 전기 구동신호에 대해서는 비선형 응답을 하게 된다. 그러나 두개의 주파수( $f_m, 2f_m$ )를 갖는 구동신호로 위상변조를 시키고, 위상변조기의 비선형 응답을 보정해 줌으로써 어느 기간 동안 두 역회전 빛살 사이에 거의 일정한 위상차를 만들어 낼 수 있다. 이때 위상변조기에 가해주는 두 조화신호의 진폭이나 상대 위상은 적절히 조절되어야 한다.

동적으로 바이어스된 FOG에서 Sagnac 위상차를 상쇄

하기 위하여 광섬유 고리의 한쪽 끝에 있는 위상변조기를  $V_m(t)$ 로 구동시키면, 두 역회전 빛살 사이의 위상차 변조  $\Delta\phi_m(t)$ 은 다음과 같다.

$$\phi_m(t) = A(\sin \omega_m t - B \sin 2 \omega_m t) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Delta\phi_m(t) &= \phi_m(t+T_f/2) - \phi_m(t-T_f/2) \\ &= \phi_0(\cos \omega_m t - 2B \cos 2 \omega_m t) \quad (2) \end{aligned}$$

여기서  $\phi_0$ 는 위상차 변조의 진폭이고, B는 위상변조에서 제 1 조화 성분에 대한 제 2 조화 성분의 상대진폭이다. 그리고 주파수  $f_m$ 과  $2f_m$ 에서 위상변조기의 비선형 응답은 보정되었고,  $T_f f_m \ll 1$ 이라 가정하였다. 식(2)에서  $B \approx 0.15$ 로 하면, 그림 2.와 같이 어느기간은 거의 일정한 위상차를 얻을 수 있다.

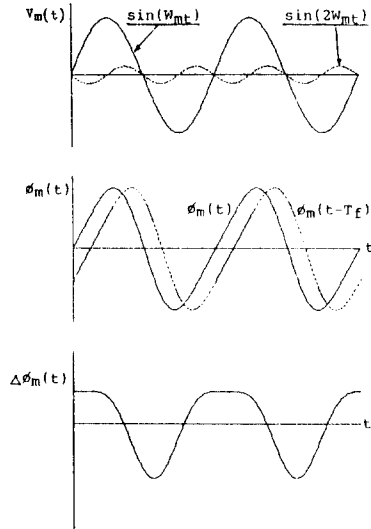


그림 2. 두 주파수( $f_m, 2f_m$ ) 신호에 의한 위상차 변조

위상차 변조  $\Delta\phi_m(t)$ 를 갖는 FOG의 출력에서 바이어스 주파수  $f_b$ 의 성분은 다음 식으로 나타낸다.

$$I(f_b) = K J_1(\eta_b) \sin \{ \phi_s - \Delta\phi_m(t) \} \quad (3)$$

여기서 K는 비례상수이며,  $J_1(\eta_b)$ 는 제 1차 Bessel 함수이다.  $\eta_b$ 는 위상 바이어스의 진폭( $\phi_b$ ) 및 광섬유 통과시간  $T_f$ 와 관계된 상수이다. 그리고  $\phi_s$ 는 회전에 의하여 유기된 Sagnac 위상차이다. 즉,

$$\phi_s = \frac{4 \pi L R}{\lambda_0 c} \Omega \quad (4)$$

이다. 이때  $L$ 은 광섬유 코일의 길이,  $R$ 은 코일반경,  $\lambda$ , 및  $c$ 는 각각 진공중에서 광원의 파장 및 광속도이고  $\Omega$ 는 FOG가 받는 각속도이다. 식(2)와 같은 위상차 변조에서 거의 일정한 값을 갖는 기간 동안만 게이트를 작동시키면 그림 3.과 같이 개회로 출력은 거의 0이 된다. 이때 생긴 오차 신호  $\Delta\phi(t) = \phi_s - \Delta\phi_m(t)$ 는 적분기를 통과한 후, 되먹임 회로에 있는 AGC 증폭기의 이득을 조절하여 위상변조기의 구동신호 진폭을 자동적으로 제어할 수 있는 폐회로 방식으로 FOG를 작동하게 한다. 이때 적분기의 출력은 회전( $\Omega$ )에 대한 정보를 주는 폐회로 FOG의 출력이다.

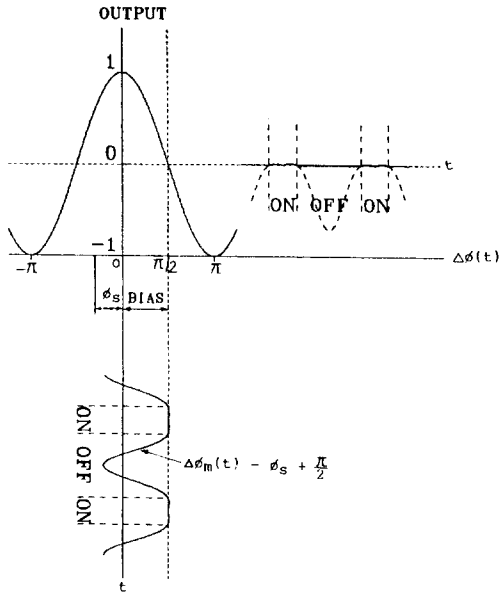
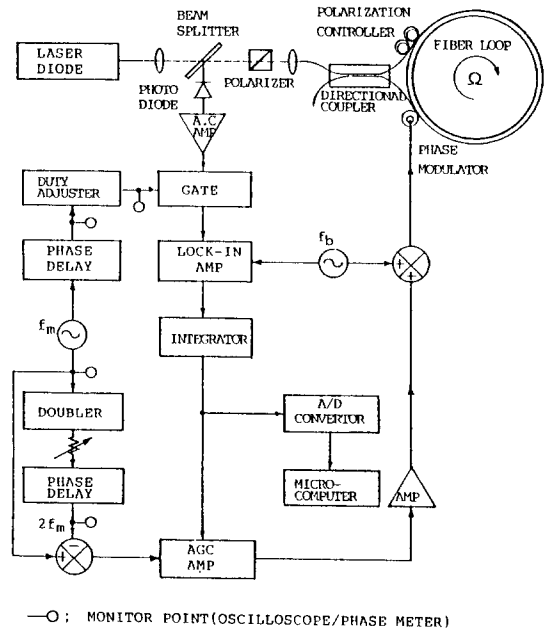


그림 3. 두 조화신호에 의한 위상변조 및 게이팅에 의한 FOG의 개회로 출력

### 3. 실험 및 결과

위상변조와 게이트 방법을 이용한 폐회로 방식의 광섬유 자이로스코프에 대한 실험장치의 개략도를 그림 4.에 보였다. 1010m의 단일모드 광섬유를 직경 15cm인 알루미늄 원통 둘레에 온도 영향을 최소로 줄이도록 대칭으로 감았다. 광섬유 고리의 한쪽 끝 근처에 편극조절기를 부착하고, 다른쪽 끝은 PZT 원통형 세라믹에 감아서 위상변조기로 사용하였다. 광원으로는 다중모드 GaAlAs 레이저 다이오드를 사용하였는데, 중앙파장은 823nm이고, 선폭이 2.3nm이며, 모드 수가 10개인 것이다. 위상변조 신호는 주파수  $f_m$ 인 정현파를 주파수 배가기(frequency doubler)를 사용하여  $2f_m$ 인 정현파를 만들고 이것을 기본 정현파와 합성하였다. 이때 상대 진폭 및 위상

을 조절할 수 있도록 하였다. 동적 바이어스 주파수는 진폭 변조 또는 편극 변조를 고려하여 적정 주파수(proper frequency) 102kHz로 선택하는 것이 바람직하지만 이 실험에서는 그 문제가 크게 영향이 없고, 또 변조 주파수  $f_m=14$ kHz를 선택하였으므로 선형도에 동적 바이어스의 영향을 줄이기 위해 10배 이상인  $f_b=140$ kHz로 선택하였다. 주파수  $f_m$ 인 정현파를 사각파로 만들어 게이트 구동신호로 사용하였고, 위상이나 작동기간을 조정할 수 있도록 구성하였다.



—○: MONITOR POINT(OSCILLOSCOPE/PHASE METER)

그림 4. 실험장치의 개략도

본 실험에 사용된 PZT 위상 변조기의 주파수 응답특성을 개회로-FOG를 이용하여 측정하고 그림 5.에 그렸다. 주파수가  $f$ 인 정현파로 위상 변조기를 구동하고 일정한 각속도를 받는 FOG의 출력을 관찰한다. 구동전압을 증가시키면서 그 출력이 0일때, 구동전압을 측정한다. 이때  $J_1(\eta) = 0$ 이다. 즉  $\eta = K_f V(f) \sin(f/2f_p)$ 가 3.83임을 의미한다. 여기서  $V(f)$ 는  $\eta = 3.83$ 일 때 구동전압의 rms 값이며  $f_p$ 는 광섬유 고리의 적정주파수 102kHz이다.  $K_f$ 는 전압-위상 변환 계수로서 구동신호의 진폭에 대하여 일정하고 주파수에 따라 달라진다. 그림 5.에서 PZT의 주파수 응답을 이 계수로 표시했다. 이 PZT 원통의 직경은 25.4mm이며, 첫번째 공진은 주파수가 38.6kHz 일때 생겼다. 위상변조에 사용된 구동신호의 주파수인 14kHz와 28kHz에 대한 PZT의 주파수 응답 비율( $K_{28}/K_{14}$ )을 측정한 결과 1.3이다. 그래서 가장 근사한 파형을 얻기 위해서 구동신호에서는

제 2 조화신호의 상대진폭을 0.77B로 보정하였다.

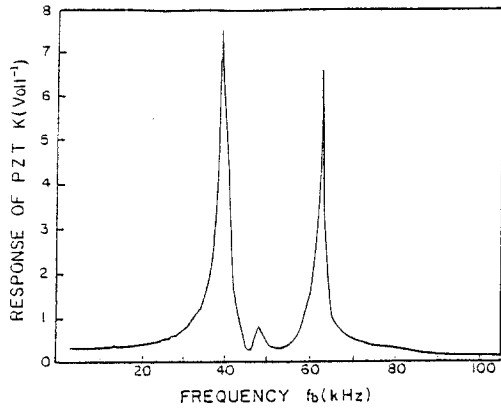


그림 5. PZT의 주파수 응답도

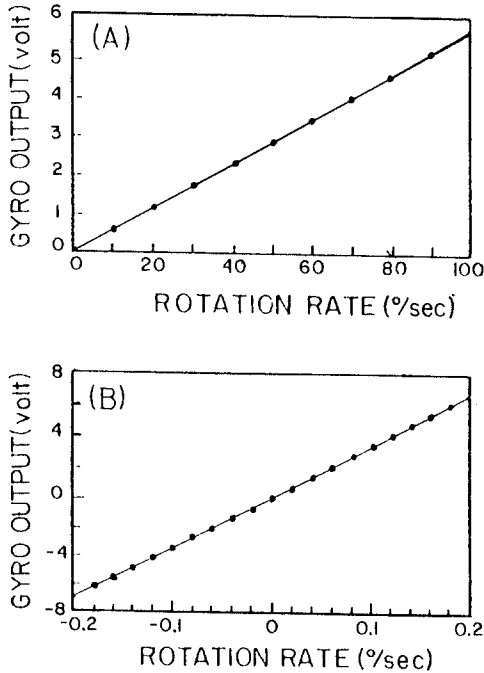


그림 6. 폐회로 방식의 FOG에서 회전에 대한 출력 곡선  
 — ; 계산치, ●●● ; 실험치

광검출기에서 얻어진 전기적 신호는, 주파수  $f_m$ 로 작동되는 게이트를 통과한 후 바이어스 주파수  $f_b$  성분만을 얻기 위해서 PSD(phase sensitive demodulator)로 보내진다. 다시 적분기를 거쳐나온 출력은 자동 이득조절 증폭기에서 구동신호의 진폭을 조절하게 된다. 또한 폐회로 FOG의 출력인 적분기의 출력을 A/D 변환기를 거쳐 전자계산기로 보내서, 필요한 계산을

하도록 하였다.

본 실험에서는 Sagnac 위상  $2\pi$ 에 대응하는 각속도  $95^\circ/\text{sec}$ 까지  $10^\circ/\text{sec}$ 씩 증가시키면서 적분기 출력전압을 측정하였다. 또한  $-0.2^\circ/\text{sec}$ 에서  $+0.2^\circ/\text{sec}$ 까지  $0.02^\circ/\text{sec}$  간격으로 데이터를 얻었다. 이들 각속도에 대한 폐회로 FOG의 출력을 그림 6.에 그렸다.  $90^\circ/\text{sec}$  내에서 얻어진 척도 계수의 비선형도 약 0.5% 정도이었다. 그리고 회전이 없을때, FOG의 단기잡음 rms 값은  $0.1^\circ/\text{hr}$ 이고 이때 적분시간은 10sec 이었다.

#### 4. 분석 및 논의

폐회로 FOG에서 Sagnac 위상이동을 상쇄할 위상차 변조  $\Delta\phi_m(t)$ 가 식(2)로 표시될때 게이트의 작동기간과 위상을 적당히 선정되면 개회로의 출력인 식(3)은 평균적으로 0으로 만들 수 있다. 즉,

$$\int_{-\tau/2}^{+\tau/2} \sin \{ \phi_s - \Delta\phi_m(t) \} dt = 0 \quad (5)$$

여기서  $\tau$ 는 게이트 작동기간이다. 식(2)를 식(5)에 대입하면 Sagnac 위상은 다음과 같이 표시된다.

$$\phi_s = \tan^{-1} \frac{\int_{-\tau/2}^{+\tau/2} \sin \{ \phi_0 (\cos \omega_m t - 2B \cos 2\omega_m t) \} dt}{\int_{-\tau/2}^{+\tau/2} \cos \{ \phi_0 (\cos \omega_m t - 2B \cos 2\omega_m t) \} dt} \quad (6)$$

척도 계수  $S = \phi_0 / \phi_s$ 는 식(6)으로 부터 수치계산에 의해 얻어질 수 있다. 주어진 측정 범위내에서 척도 계수의 선형성은 다음과 같은 비선형도로 표시한다.

$$\text{비선형도} = 2(S_{\max} - S_{\min}) / (S_{\max} + S_{\min}) \quad (7)$$

여기서  $S_{\max}$ 와  $S_{\min}$ 은 척도 계수의 최대, 최소값을 의미한다. 척도 계수의 비선형도는 게이트의 작동기간 ( $\tau$ )과 위상, 그리고 구동신호에서 제 2 조화 성분의 상대진폭(B)과 상대위상에 의해 변하게 된다.

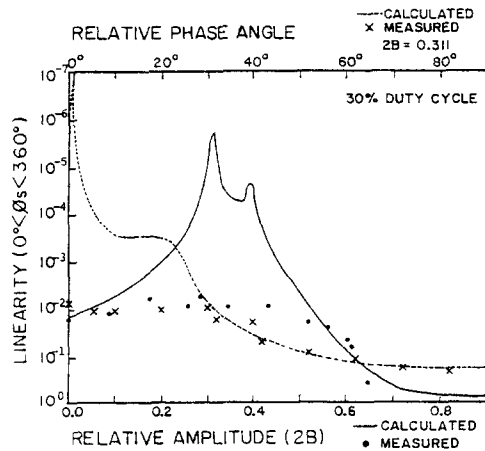


그림 7. 제 2 조화신호에 의한 비선형도

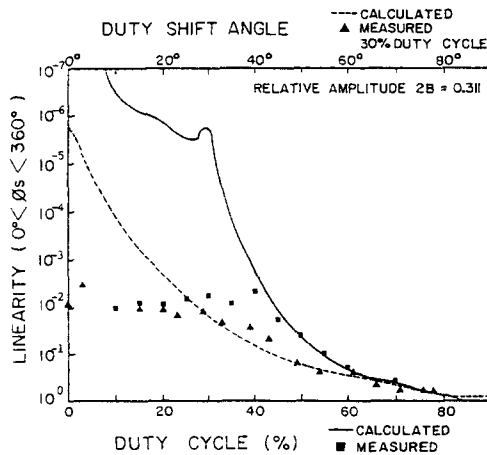


그림 8. 게이트 신호에 의한 비선형도

제 2 조화성분과 게이트 신호들이 척도 계수의 선형성에 미치는 영향을 고찰하기 위해 그림 4.의 관측점 (●)에서 오실로스코프와 위상측정기를 이용하여 파형들을 관측하면서 조정하였다. 제 1 조화신호에 대한 제 2 조화신호의 상대 진폭과 상대위상이 미치는 영향에 대하여 계산한 결과와 실험한 결과를 그림 7.에 그렸다. 그리고 게이트의 작동기간과 위상에 대해서는 그림 8.에 그려있다. 한 변수를 측정할때 다른 변수들은 가장 좋은 선형성을 얻을 수 있는 조건의 수치로 고정하였다. 즉, 게이트의 작동 비율( $f_m \tau$ ) 및 위상은 각각 0.3과 0°이다. 그리고 제 2 조화신호의 상대진폭(2B)과 상대위상은 각각 0.311 및 0°이다. 그림 7.과 8.에서 보는 바와 같이 실험에 사용된 폐회로 FOG에서 척도 계수의 비선형도는 이론적으로 계산된 값인  $10^{-5}$  정도이고 실험에서 얻은 결과는  $5 \times 10^{-3}$  정도이었다. 그리고 1% 정도의 비선형도는 쉽게 얻을 수 있었다. 측정치와 이론

치의 차이는 PZT 위상변조기 및 전자회로의 선형성과 안정성에 기인한 것으로 보인다. 더 좋은 결과를 얻으려면 이들 소자들 뿐 아니라 데이터 처리용 A/D 변환기도 사용된 12-비트(bite) 보다 더 큰 것을 사용하여야 한다.

## 5. 결 론

폐회로 광섬유 자이로스코프에서 두 조화 신호로 위상 변조를 시키고, 그 개회로 출력을 게이팅시킴으로써 넓은 범위의 각속도를 측정하는데 척도 계수가 선형적임을 보이는 실험결과를 얻었다. 이 방식으로 각속도 90°/sec 이내에서 척도 계수의 비선형도는 0.5%임을 보였다. 위상변조의 구동신호는 정현파 신호에서 주파수 배가기를 이용하여 제 2 조화신호를 만들어 합성하였다. 제 2 조화신호의 상대진폭과 상대위상들이 척도 계수의 선형성에 미치는 영향을 이론과 실험으로 고찰하였다. 또한 게이트 신호의 작동기간과 위상에 대해서도 분석하였다. 실험결과는 이론적으로 계산된 비선형도  $10^{-5}$ 에 못 미치고 있지만, PZT 위상변조기와 전자회로들을 개선한다면 이론치에 접근시킬 수 있을것으로 예상된다. 얻어진 실험결과는 응용분야가 다양한 저등급 자이로의 요구성능을 충분히 만족시킬 수 있다.

## 참 고 문 헌

- (1) R.F.Cahill and E.Udd, "Phase-nulling fibre-optic laser gyroscopes", Opt. Lett., Vol.4, p.93, 1979.
- (2) J.L.Davis and S.Ezekiel, "Closed-loop, low-noise fiber-optic rotation sensor" Opt. Lett., Vol.6, p.505, 1981.
- (3) W.C.Davis, W.L.Dandrom and D.E.Thomson, "Fiber optic gyro using magneto-optic phase nulling feedback", in proceedings of the International Conference on Fiber Optic Rotation Sensors and Related Technologies, Springer-Verlag, Berlin, p.308, 1982.
- (4) A.Ebberg and G.Schiffner, "Closed-loop fiber-optic gyroscope with a sawtooth phase-modulated feedback", Opt. Lett., Vol.10, p.300, 1985.
- (5) B.Y.Kim and H.J.Shaw, "Gated Phase-modulation approach to fiber optic gyroscopes with linearized scale factor" Opt. Lett., Vol.9, p.375, 1984.