

링레이저 자이로의 출력오차 최소화를 위한 불규칙 몸체진동잡음 연구

심규민[†]

국방과학연구소 기술연구본부

Ⓣ 305-600 대전광역시 유성구 유성우체국 사서함 35-5호

손승현

고등기술연구원 포토닉스 및 RF 마이크로 웨이브 센터

Ⓣ 449-800 경기도 용인우체국 사서함 25호

(2003년 8월 2일 받음, 2003년 10월 22일 수정본 받음)

본 논문에서는 몸체진동형 링레이저 자이로에서 레이저 공진기에 인가되는 입력 각속도가 lock-in 영역에 있을 때 발생하는 맥놀이신호 위상오차의 크기는 맥놀이신호의 위상에 관계된다는 것을 수치해석적인 계산을 통하여 확인하였다. 그리고 그 오차가 누적되지 않고 통계적 평균값이 영이 되도록 하기 위하여 몸체진동의 진폭을 변화시키는 몸체진동잡음 인가방식에 대한 요구조건을 연구하였다. 그 결과 몸체진동잡음에는 진폭을 증가시키고 감소시키는 진폭경사가 필요하고 여기에 유사 백색 잡음을 첨가해주어야 하며 진폭경사의 기울기 및 진폭의 최대값과 최소값을 불규칙적으로 변화시켜야 됨을 알 수 있었다. 그리고 이러한 조건을 만족하는 것과 그렇지 않은 몸체진동잡음을 이용하여 자이로를 동작시키면서 주변온도의 변화에 의하여 나타나는 출력변화를 비교함으로써 몸체진동잡음에 의하여 오차가 누적되는 특성을 확인하였다.

주제어 : ring laser gyroscope, amplitude modulation, dither noise.

I. 서 론

링레이저 자이로는 기계식 자이로에 비하여 동작범위가 넓어서 짐벌(Gimbal) 시스템이 필요 없고, 모터에 의한 회전부가 없으므로 구조가 간단하며, 넓은 온도영역에서 동작이 가능하므로 별도의 온도조절장치가 필요 없다는 장점이 있다. 그러므로 링레이저 자이로의 성능이 항법장치에 적용 가능한 수준으로 발전한 90년대 이후에는 이 자이로가 기존의 기계식 자이로를 대체하고 있는 추세이다.

링레이저 자이로는 삼각형 또는 사각형의 폐경로로 이루어진 He-Ne 레이저에서 서로 반대방향으로 유도방출 되는 빛의 공진 주파수가 공진기의 회전에 의하여 서로 달라지는 현상을 이용한 회전검출 센서이다. 서로 반대방향으로 진행하는 빛의 진동수가 다르므로 두 빛을 간섭시키면 맥놀이 현상이 발생하는데 이 맥놀이신호의 주파수를 측정함으로써 입력되는 회전을 알 수 있다.^[1-3] 그런데 링레이저 자이로에는 외부에서 인가되는 입력 각속도가 어느 한정된 값 이하인 경우에 자이로 출력이 나타나지 않는 lock-in 현상이 발생한다. 이 lock-in 현상에 의한 오차를 최소화하기 위하여 300Hz~500Hz정도의 공진주파수로 링레이저 공진기를 각진동 시킴으로서 자이로가 lock-in 영역에서 동작하는 시간을 최소화하는 몸체진동(Dither) 방법이 주로 사용되고 있다. 그런데 이 방법에 의하면 링레이저 공진기에 입력되는 각속도가 lock-in을 주기적으로 통과하게 되며, 이 lock-in 영역을 통과하는 동안에 맥놀이 신호의 오

차가 발생하게 된다. 1986년에 J. E. Killpartrick은 그 오차의 크기가 맥놀이신호의 위상에 관계된다는 것을 해석적으로 계산하였다.^[4] 자이로가 동작하는 동안에 입력 각속도가 lock-in 영역을 통과하는 회수는 1초당 몸체진동 공진주파수의 2배에 해당되므로 lock-in 영역을 통과 할 때마다 맥놀이신호의 위상을 측정하여 오차를 보상하는 것은 불가능하다. 그러므로 lock-in을 통과하는 동안에 발생하는 오차가 어느 한쪽으로 누적되지 않고 통계적인 평균값이 영이 되도록 해야 한다. 이를 위해서는 lock-in 영역에서 맥놀이신호의 위상이 몸체진동의 매주기마다 다른 값을 갖도록 불규칙적인 몸체진동을 인가해야 한다. 불규칙적인 몸체진동은 진폭이나 주파수를 불규칙적으로 변화시킴으로서 가능하나 일반적으로 몸체진동의 매 주기마다 주파수를 변화시키는 것은 공진기 몸체와 몸체진동 스프링이 이루는 각진동기의 Q-factor가 너무 크므로 어려움이 있으며 주로 진폭을 변화시키는 방법을 사용한다. 그런데 lock-in을 통과하는 동안에 발생하는 오차의 통계적인 평균값이 0이 되도록 하기 위해서 몸체진동의 진폭을 어떤 형태로 어느 정도 변화시켜야되는지가 어려운 문제이다.

본 연구에서 우리는 lock-in 영역에서 발생하는 오차의 크기가 맥놀이신호 위상에 의하여 변화된다는 Killpartrick의 해석적인 계산결과를 수치해석적인 계산을 통하여 분석하고, 이를 바탕으로 하여 lock-in영역에서 발생하는 오차의 통계적 평균값이 영이 되도록 하기 위한 몸체진동잡음의 요구조건을 연구하였다. 그리고 두 가지 형태의 몸체진동잡음을 자이로 공진기에 인가하고 주변온도 변화에 의한 자이로의 출력변화를 비교함으로써 몸체진동잡음에 의하여 오차가 누적되는 특성을 비교하였다.

[†]E-mail: kmshim@add.re.kr

II. 링레이저 자이로의 맥놀이 주파수 이론

2.1 링레이저 자이로의 동작원리

폐광로를 이루는 링레이저 공진기가 각속도 Ω 로 회전하는 경우에 공진기 내부에서 서로 반대방향으로 진행하는 빛이 공진기를 일주하고 처음 출발한 지점으로 되돌아오기까지 걸리는 시간 t_1, t_2 에는 다음과 같은 차이 Δt 가 발생한다.

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{4\pi R^2 \Omega}{c^2} \quad (1)$$

그러므로 서로 반대방향으로 진행하는 빛에 대한 상대적인 공진기의 길이 L_1, L_2 는 다음과 같이 달라진다.

$$\begin{aligned} L_1 &= 2\pi R - R\Omega t_1 \\ L_2 &= 2\pi R + R\Omega t_2 \end{aligned} \quad (2)$$

그 결과에 의하여 서로 반대방향으로 진행하는 빛의 공진주파수 ν_1, ν_2 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \nu_1 &= n \frac{c}{L_1} \\ \nu_2 &= n \frac{c}{L_2} \end{aligned} \quad (3)$$

그러므로 서로 반대방향으로 진행하는 빛의 공진주파수 차이 $\Delta\nu$ 는 다음과 같이 입력가속도 Ω 에 비례하므로 이것을 검출하면 자이로의 회전을 알 수 있다. 여기서 L 은 공진기의 길이, A 는 공진기의 면적, 그리고 λ 는 He-Ne 레이저의 파장으로 0.6328 μm 이다.

$$\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1 = Scf \Omega$$

$$Scf = \frac{4A}{\lambda L} \Omega \quad (4)$$

He-Ne 레이저의 공진진동수는 $\nu \sim 10^{15} \text{Hz}$ 이므로 두 빛의 주파수 차이를 검출하기 위해서는 두 빛을 간섭시켜서 맥놀이 주파수를 측정해야 한다.

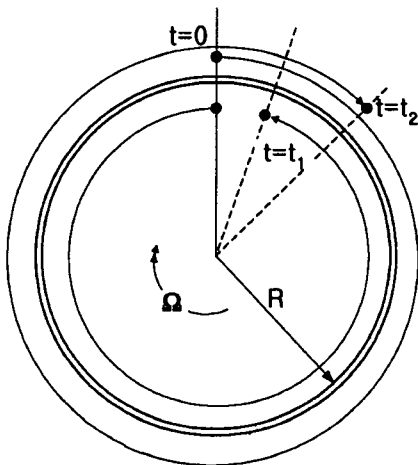


그림 1. 링레이저 자이로의 동작원리.

공진기 내부에서 서로 반대방향으로 진행하는 빛의 진폭 E_1, E_2 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} E_1 &= E_{1m} \sin(\omega_1 t + \phi_1) \\ E_2 &= E_{2m} \sin(\omega_2 t + \phi_2) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $\omega_1 = 2\pi\nu_1, \omega_2 = 2\pi\nu_2$ 이고 ϕ_1, ϕ_2 는 초기 위상이다.

만일 두 빛의 진동수가 같으면 초기 위상차 $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1$ 에 의한 고정된 간섭무늬가 발생하게 되며 두 빛의 진동수가 다르면 위상차가 시간에 따라 변화되어 간섭무늬가 시간에 따라서 변하게 된다. 그러므로 두 빛을 간섭시켜서 발생하는 빛의 세기 I 는 다음과 같이 시간의 함수가 된다.

$$\begin{aligned} I &= [E_1 + E_2]^2 \\ &= E_{1m}^2 + E_{2m}^2 + 2E_{1m}E_{2m} \cos(\Delta\omega t + \Delta\phi) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 E_{1m}, E_{2m} 과 E_{1m}^2, E_{2m}^2 은 상수이고 $E_{1m} \sim E_{2m}$ 이므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I \sim I_0 [1 + \cos(\psi_0 + \Delta\phi)] \quad (7)$$

여기서 $\psi_0 = 2\pi\Delta\nu t$ 로서 맥놀이신호의 위상이다. 그러므로 간섭무늬의 위상변화율은 맥놀이신호 위상의 변화율로 나타낼 수 있고 식 (4)에 의하여 입력 가속도와와의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{\psi_0}{2\pi} = \Delta\nu = Scf \Omega \quad (8)$$

위 식에 의해서 두 빛간의 1사이클 차이에 의하여 맥놀이신호 위상 ψ 가 2π 변화됨을 알 수 있다. 그러므로 식 (7)에서 알 수 있는바와 같이 맥놀이신호 위상이 2π 변화하면 간섭무늬의 세기도 한 주기 변하므로 단위시간당 간섭무늬의 변화회수를 측정함으로써 입력되는 가속도를 알 수 있다.

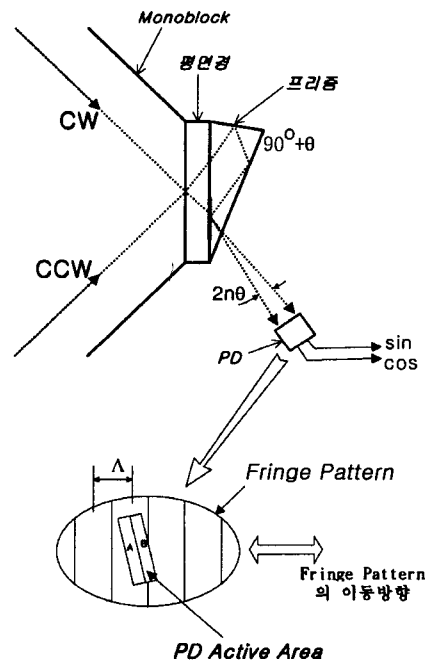


그림 2. 맥놀이파 검출부의 구조.

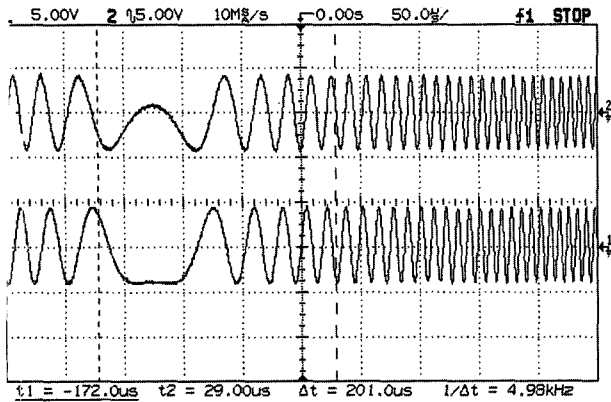


그림 3. 검출부에서 나타나는 맥놀이신호의 파형(몸체진동이 인가되고있는 경우).

그림 2는 간섭무늬의 개수를 측정하기 위한 검출부를 나타낸 것이다. 프리즘을 통하여 서로 반대방향으로 진행하는 빛을 같은 방향으로 유도하여 간섭무늬를 만든다. 여기서 두 빛의 진행방향을 만큼 다르게 하여 간섭무늬가 주기 Λ 의 공간 분포를 갖도록 하고 서로 $\Lambda/2$ 광 떨어진 두개의 다이오드 A와 B로 측정함으로써 회전 방향을 알 수 있도록 되어있다.

그러면 자이로 검출부에서 측정되는 간섭무늬는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I \rightarrow I_0[1 + \cos(2n_p \theta kx + \psi_0 + \xi)] \quad (9)$$

여기서 n_p 는 프리즘의 굴절율이고 k 는 파수로서 $k = 2\pi/\Lambda$ 이고 초기 ξ 는 두 빛의 경로차이에 의해서 발생하는 위상차이와 $\Delta\phi$ 의 합이다. 그림 3은 정현파 몸체진동이 인가되고 있는 상태에서 다이오드 A와 B에서 측정된 간섭무늬의 형태를 오실로스코프로 본 그림이다. 그림에서 몸체진동의 진폭에 따라 맥놀이 신호위상의 변화속도가 달라짐을 알 수 있다.

2.2 반사경 후방산란에 의한 맥놀이신호 위상

실제 자이로에서는 반사경을 포함한 공진기를 구성하고 있는 광학부품들의 후방산란이 자이로의 출력에 큰 영향을 미친다. 후방 산란된 빛은 그림 4와 같이 서로 반대쪽으로 진행하는 빛과 간섭을 일으켜서 다음과 같은 크기로 맥놀이신호의 위상을 이동시킨다.

$$\begin{aligned} \Delta\psi_s &= \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \\ \varepsilon_1 &\cong \frac{r_2 E_2}{E_1} \sin(\psi + \beta_2) \\ \varepsilon_2 &\cong \frac{r_1 E_1}{E_2} \sin(\psi + \beta_1) \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 r_1, r_2 과 β_1, β_2 는 공진기를 구성하고 있는 광학부품들의 산란계수 및 산란위상이고 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 는 산란된 빛에 의하여 서로 반대방향으로 진행하는 빛에 유발된 위상변화이다.

그러므로 빛이 공진기를 일주하는 시간 τ 동안에 후방산란된 빛에 의하여 발생되는 오차를 고려한 맥놀이신호 위상 ψ 의 미분방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[6]

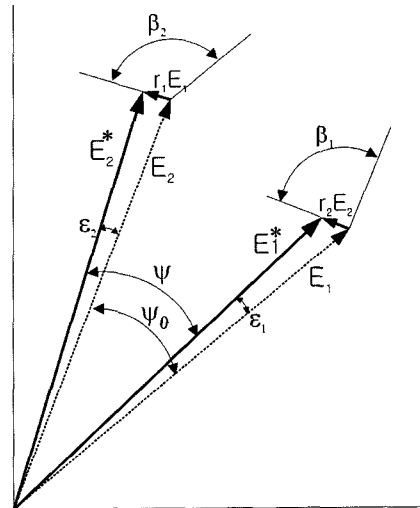


그림 4. 반사경 산란에 의한 맥놀이신호 위상 백터.

$$\begin{aligned} \frac{\dot{\psi}}{2\pi} &= \frac{\dot{\psi}_0}{2\pi} + \frac{\Delta\psi_s}{\tau} \\ &= Scf[\Omega - \Omega_L \sin(\psi + \beta)] \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 Ω_L 은 lock-in 각속도이고 β 는 후방산란에 의하여 발생하는 레이저 초기 위상으로서 다음과 같은 값을 갖는다.

$$\Omega_L = \frac{c}{4\pi ScfL} \left[\left(r_1 \frac{E_1}{E_2} \right)^2 + \left(r_2 \frac{E_2}{E_1} \right)^2 + 2r_1 r_2 \cos(\beta_1 + \beta_2) \right]^{1/2} \quad (12)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{E_2}{E_1} r_2 \sin \beta_2 - \frac{E_1}{E_2} r_1 \sin \beta_1}{\frac{E_2}{E_1} r_2 \sin \beta_2 + \frac{E_1}{E_2} r_1 \cos \beta_1} \right) \quad (13)$$

Lock-in이란 각속도가 입력되어도 자이로에 출력이 나오지 않는 현상으로서 그 크기는 위 식에서 알 수 있는바와 같이 $\beta_1 + \beta_2$ 에 따라서 달라질 수 있다. 서로 반대방향으로 진행하는 빛의 진폭과 산란계수가 같을 경우에 lock-in은 $\beta_1 + \beta_2$ 에 따라서 다음과 같은 값을 갖는다.

$$\begin{aligned} \Omega_L(\max) &\sim \frac{c}{2\pi ScfL} r \quad \text{for } \beta_1 + \beta_2 = 0 \\ \Omega_L(\min) &\sim 0 \quad \text{for } \beta_1 + \beta_2 = \pi \end{aligned}$$

이 lock-in의 크기는 반사경의 위치를 변화시켜서 β_1 과 β_2 를 조절하는 방법으로 최소값으로 제어가 가능하나 그 방법을 적용하면 자이로의 구동부가 복잡해지는 단점이 있다.^[6,7]

2.3 몸체진동에 의한 맥놀이신호 위상

일반적으로 정밀 관성항법장치에 적용 가능한 자이로의 lock-in은 약 0.2 deg/sec 이하로서 이 크기는 지구 자전각속도보다 매우 큰 값이므로 이 lock-in 현상을 제거하지 않으면 안된다. 그 방법으로서 가장 많이 쓰이는 것은 몸체진동방법으로서 lock-in 보다 약 1000배 정도의 최대 진폭을 갖는 정현파 진동을 링레이저 공진기에 인가하고 dither trapping 또는 dither stripping방법에 의하여 링레이저 출력에서 몸체진동에 의한 출

력을 제거하여 자이로 출력을 얻는 것이다.^[8,9]

몸체진동의 형태는 다음과 같이 자이로 케이스에 구속된 정현파 진동이다.

$$\Omega_d = 2\pi f_d \theta_{dm} \sin 2\pi f_d t \quad (14)$$

여기서 f_d 와 θ_{dm} 는 각각 몸체진동의 주파수와 진폭이다. 그러면 공진기에 입력되는 각속도는 $\Omega \rightarrow \Omega + \Omega_d$ 로 되어 식 (11)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\dot{\Psi}}{2\pi} = S_c f [\Omega + \Omega_d(t) - \Omega_L \sin(\Psi + \beta)] \quad (15)$$

식 (15)의 미분방정식을 이용하여 맥놀이신호 위상을 계산하고 다음과 같이 몸체진동의 한 주기 마다 맥놀이신호 위상의 변화량을 계산하면 자이로 출력을 얻을 수 있다.

$$\Omega_{output} = \frac{\Psi(\tau) - \Psi(0)}{2\pi\tau} [pulse] \quad (16)$$

III. 불규칙 몸체진동에 대한 연구

3.1 Lock-in에서의 맥놀이신호 위상과 오차의 관계에 대한 수치해석적인 분석

J. E. Kilpatrick은 식 (15)의 자이로 출력방정식을 이용하여 lock-in 영역에서의 맥놀이신호 위상의 초기값 β 에 따른 맥놀이신호 위상 오차(자이로 출력 오차)의 근사값을 해석적으로 계산하였다.

$$\Psi_{error}(\max) = \sqrt{\frac{2\pi S_c f}{\Omega_d f_d}} \Omega_L \quad \text{for } \beta = \frac{\pi}{2}$$

$$\Psi_{error}(\min) = -\sqrt{\frac{2\pi S_c f}{\Omega_d f_d}} \Omega_L \quad \text{for } \beta = \frac{3\pi}{2}$$

이 lock-in 영역에서 자이로의 출력 오차는 식 (15)의 미분방정식에 Runge-Kutta 방법을 적용하여 수치해석적인 방법으로 어렵지 않게 계산할 수 있다. 이를 위해서는 먼저 lock-in이 Ω_L 일 때의 맥놀이신호 위상을 계산하고 여기에서 lock-in이 0일 때의 맥놀이신호 위상을 계산하여 빼주면 맥놀이신호 위상의 오차가 된다.

$$\Psi_{error} = \Psi(\Omega_L = \Omega_L) - \Psi(\Omega_L = 0) \quad (2.17)$$

그림 5와 그림 6은 몸체진동의 진동수는 400 Hz이고 진폭은 100 deg/sec인 자이로에서 lock-in이 각각 0.5 deg/sec와 0.1 deg/sec인 경우의 맥놀이신호 위상오차를 계산한 결과이다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 100 deg/sec의 몸체진동에 의하여 lock-in 영역으로부터 다음 lock-in 영역에 도달되기까지 맥놀이신호 위상이 약 150주기 변화되며, lock-in 영역에서는 계단 형태의 오차가 발생한다. 그리고 그 오차의 크기는 lock-in에서의 맥놀이신호 위상과 lock-in의 크기에 따라서 달라짐을 알 수 있다. Lock-in 영역으로 들어갈 때와 lock-in 영역을 벗어난 후의 맥놀이신호 위상 오차를 비교하는 방법으로 lock-in에서의 맥놀이신호 위상 Ψ_L 에 대한 lock-in 영역에서의 맥놀이신호 위상 오차를 계산하면 그림 7과 같다. 여기서 lock-in의

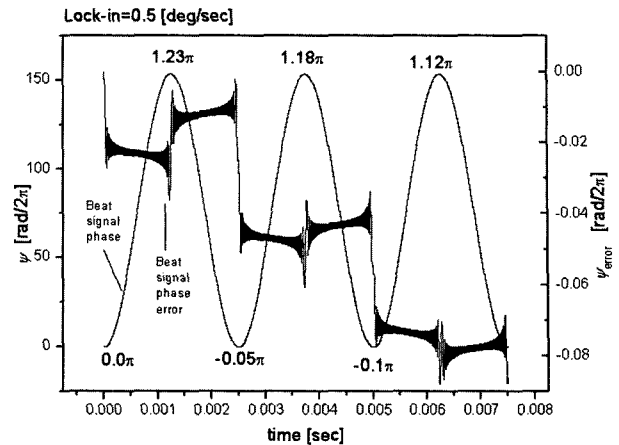


그림 5. 자이로 각도오차(Lock-in: 0.5 deg/sec, dither 진폭 100 deg/sec).

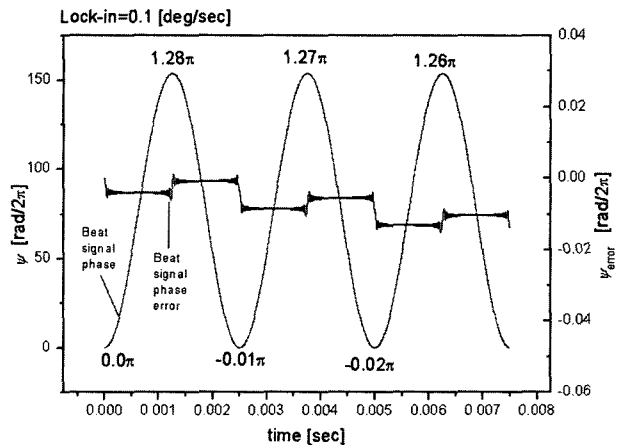


그림 6. 자이로 각도오차(Lock-in: 0.1 deg/sec, dither 진폭 100 deg/sec).

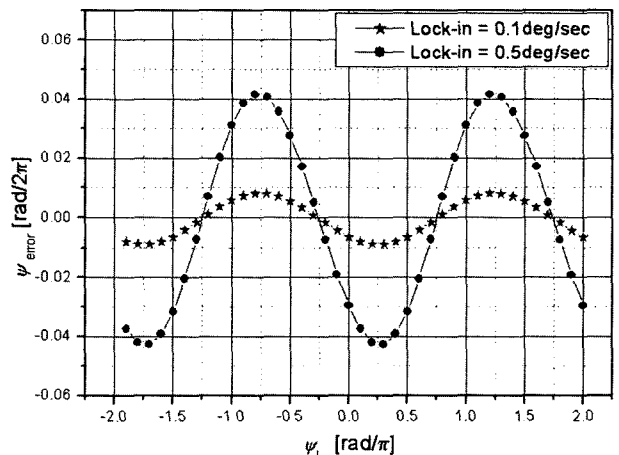


그림 7. Lock-in에서의 위상에 의한 자이로 각도오차(Lock-in: 0.5 deg/sec & 0.1 deg/sec, dither 진폭 100 deg/sec).

크기는 각각 0.5 deg/sec와 0.1 deg/sec에 대하여 계산하였다. 그림 7에서 보는 바와 같이 lock-in에서의 맥놀이신호 위상 Ψ_L 이 $-2\pi \sim +2\pi$ 변화될 때에 맥놀이신호의 위상오차가 주기적으로 변화됨을 알 수 있다.

그러므로 lock-in에서의 맥놀이신호 위상이 매 주기마다 일정하면 위상오차가 한 값을 가지고 계속 누적될 수 있음을 알 수 있다. Lock-in에서의 맥놀이신호 위상을 매 주기마다 정확히 측정하여 보상할 수 없으므로 lock-in에서의 맥놀이신호 위상을 $0 \sim 2\pi$ 사이의 균일한 분포를 갖도록 하여 오차가 통계적인 0이 되도록 해야한다.

3.2 몸체진동에 의한 lock-in에서의 맥놀이신호 위상 변화

이 절에서는 몸체진동의 진폭과 lock-in 영역에서의 맥놀이신호 위상의 관계를 검토하고자 한다. 입력 각속도가 없을 때에는 그림 8에서 보는 바와 같이 몸체진동의 첫주기에서 초기 위상이 β 이고 몸체진동에 의하여 몸체진동 반주기동안 ψ 의 변화 ψ' 가 $2\pi N + \alpha$ 이면 반주기 후 lock-in영역에 도달할 때는 $\psi_L = \alpha + \beta$ 가 되고 다시 반주기 후에는 $\psi_L = \beta$ 로 반복된다. 즉 lock-in에서의 맥놀이신호 위상이 β 와 $\alpha + \beta$ 가 반복되며, 만일 몸체진동 반주기동안 ψ 의 변화가 $2\pi N$ 이면 여러 주기를 거쳐도 lock-in영역에서의 맥놀이신호 위상은 $\psi_L = \beta$ 가 된다. 그러므로 lock-in 영역을 통과할 때 발생하는 오차가 계속 누적될 수 있음을 알 수 있다.

그림 9는 입력 각속도 $\Delta\psi_r$ 가 2δ 일 경우의 lock-in영역에서 맥놀이신호 위상을 나타낸 것이다. 몸체진동의 반주기동안 ψ 의 변화 ψ' 가 $2\pi N + \alpha + \delta$ 이면 이때의 위상은 $\psi_L = \alpha + \beta + \delta$ 이

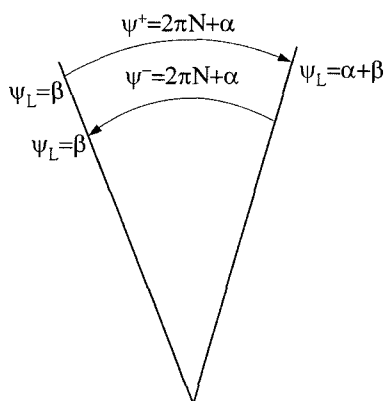


그림 8. 입력각속도가 없을 때 lock-in 영역에서의 맥놀이신호 위상.

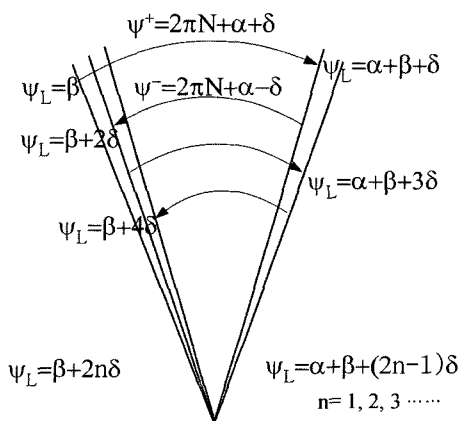


그림 9. 입력각속도가 있을 때 lock-in 영역에서의 맥놀이신호 위상.

고, 다음의 반주기를 거쳐서 다시 처음의 lock-in영역에 도달할 때까지 ψ 의 변화 ψ' 가 $2\pi N + \alpha - \delta$ 이므로 ($\Delta\psi = 2\delta$) 이때의 위상은 $\psi_L = \beta + 2\delta$ 가 된다. 그리고 다음의 반주기 및 한 주기 후에는 다시 $\psi_L = \alpha + \beta + 3\delta$ 와 $\psi_L = \beta + 4\delta$ 가 된다. 즉 양 쪽 lock-in 영역에서의 맥놀이신호 위상은 $\psi_L = \beta + n\delta$ 와 $\psi_L = \alpha + \beta + (n-1)\delta$ 가 된다. 만일 몸체진동 한주기 동안 약 4π 에 해당하는 입력 각속도가 있을 때에는 $\psi_L = \beta$ 와 $\psi_L = \alpha + \beta$ 가 반복된다. 이로부터 몸체진동의 진폭이 고정되어 있으면 lock-in에서의 맥놀이신호 위상이 규칙성을 가지게 되므로 오차의 평균이 0이 되지 않고 누적될 수 있음을 알 수 있다.

그림 10은 몸체진동의 진폭이 일정할 경우에 맥놀이신호 위상과 간섭무늬의 변화를 계산하여 lock-in에서의 맥놀이신호 위상을 나타낸 것이다. 그림에서 보는바와 같이 맥놀이신호의 회귀점인 lock-in 영역에서의 간섭무늬 모양(맥놀이신호 위상)이 몸체진동의 주기마다 같은 형태로 반복됨을 알 수 있다.

그리고 그림 11은 몸체진동의 진폭이 그림 10과 비교하여 0.1deg/sec 다른 경우로서 lock-in에서의 간섭무늬의 모양이 그림 10과 다를 수 있음을 알 수 있다. 여기서 알 수 있는바와 같이 몸체진동의 진폭을 변화시켜서 lock-in에서의 맥놀이신호 위상을

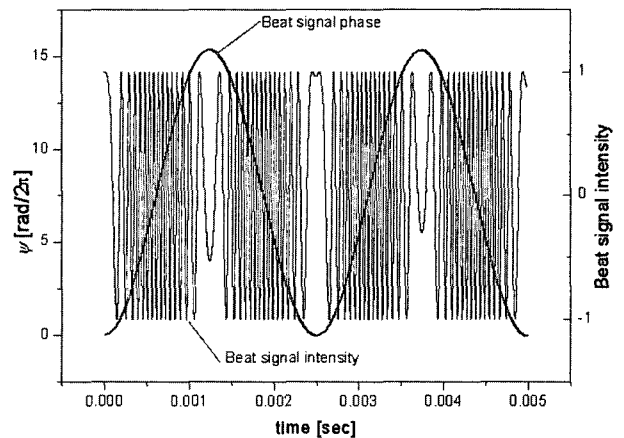


그림 10. $\beta = 0$, dither 진폭이 10 deg/sec에서의 맥놀이신호 위상과 맥놀이파.

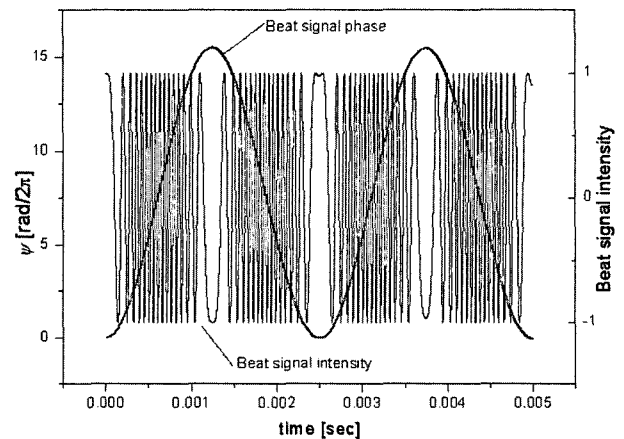


그림 11. $\beta = 0$, dither 진폭이 10.1 deg/sec에서의 맥놀이신호 위상과 맥놀이파.

변화시킬 수 있다.

그러므로 몸체진동의 진폭을 매주기마다 적절하게 조절하면 lock-in에서의 맥놀이신호 위상이 $0\sim 2\pi$ 의 고른 분포를 갖도록 하여 오차의 평균이 0이 되도록 할 수 있다.

3.3 몸체진동잡음의 요구조건

이 절에서는 lock-in에서의 맥놀이신호 위상을 불규칙적으로 변화시키기 위하여 몸체진동의 진폭을 매 주기마다 변화시키는 몸체진동잡음을 발생시킬 때 고려해야 할 사항에 대하여 논하였다.

1) 유사 백색잡음을 인가하는 경우

몸체진동잡음의 형태로서 먼저 몸체진동의 진폭을 매주기마다 완전히 불규칙적으로 변화시켜서 백색잡음의 형태로 만들어주는 방법이 있다. 그런데 실제 자이로의 공진기와 몸체진동 스프링이 이루는 구조상으로 몸체진동의 진폭을 변화시킬 수 있는 한도가 몸체진동의 한 주기에 수 arcsec로 한정되어 있으므로 백색잡음의 진폭 또한 수 arcsec이하로 제한된 유사 백색잡음이 된다.

이 경우에는 유사 백색잡음의 진폭이 $0\sim 2\pi$ 가 아니면 그림 12에서 보는바와 같이 $0\sim 2\pi$ 이외에 빗금으로 된 부분에 의하여 오차가 한쪽으로 누적될 수 있다. 유사백색잡음의 진폭을 $0\sim 2\pi$ 로 유지하기 위해서는 공진기의 길이가 28 cm인 자이로의 경우에 몸체진동이 1.86arcsec 범위에서 모든 진폭을 고루 가질 수 있도록 제어해야 한다. 그러나 실제 자이로가 환경이 다양하게 변화되는 조건에서 그러한 정밀제어가 불가능하므로 더 넓은 범위에서 몸체진동 진폭을 불규칙적으로 변화시켜야 한다.

2) 진폭경사(Amplitude Gradient)를 인가하는 경우

몸체진동잡음의 형태로서 몸체진동의 진폭을 설정된 최대값까지 계속 증가시켰다가 다시 설정된 최소값으로 감소시키는 반복적인 제어를 하는 방법을 고려 할 수 있다. 그러면 그림 13에서 보는 바와 같이 lock-in에서의 맥놀이신호 위상이 수십 2π 범위의 값을 가질 수 있으므로 오차가 누적될 확률이 감소할 수 있다. 그러나 몸체진동의 주기마다 증가되는 몸체진동 진폭이 2π 의 정수배가 근처가 되는 경우에는 오차가 어느 한

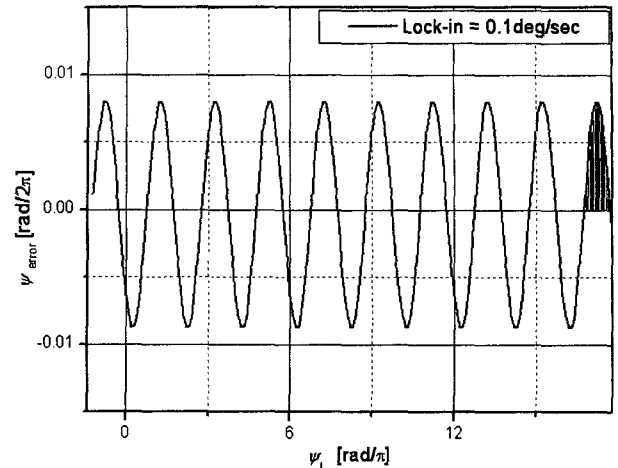


그림 13. 진폭경사에 의한 진폭변화의 범위가 약 20π 인 경우에 오차가 누적되는 부분이 발생할 확률.

쪽으로 누적될 수 있고, 몸체진동의 최대값과 최소값의 차이가 항상 2π 의 정수배를 유지할 수 없으므로 그림에서 보는 바와 같이 누적된 오차의 평균이 0이 되지 않을 수 있다.

그러므로 위와 같은 사항을 고려하면, 진폭의 최대값과 최소값, 그리고 경사도를 변화시켜서 진폭경사에 의하여 sweeping 되는 진폭변화의 범위와 폭을 변화시켜야 하고, 유사 백색잡음을 첨가하여 몸체진동 주기마다 증가하는 진폭의 크기를 불규칙적으로 변화시켜야 한다. 결과적으로 lock-in 영역에서 발생할 수 있는 맥놀이신호 위상오차의 평균값이 0이 되도록 하는 불규칙 몸체진동잡음에는 다음과 같은 사항이 요구된다.

- 1) 몸체진동의 진폭이 증감하는 진폭경사를 가져야 한다.
- 2) 진폭경사에 의한 몸체진동의 최대값과 최소값, 그리고 진폭경사의 기울기가 불규칙적으로 변화되어야 한다.
- 3) 유사 백색잡음을 첨가해야 한다.

IV. 몸체진동잡음에 의한 자이로 출력특성 실험

본 절에서는 몸체진동 잡음의 형태에 따라서 자이로 출력이

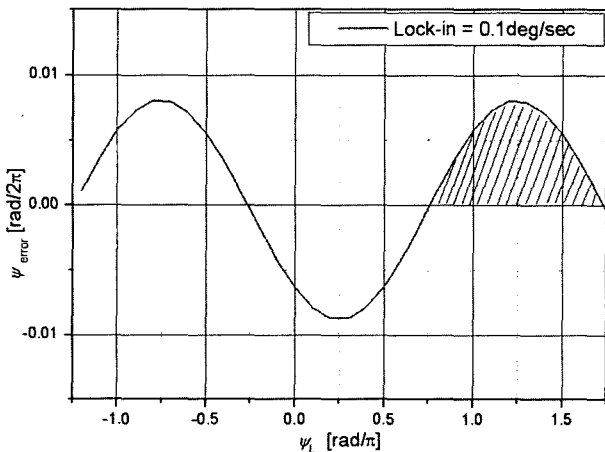


그림 12. White noise의 범위가 $0\sim 3\pi$ 인 경우에 오차가 누적될 수 있는 확률.

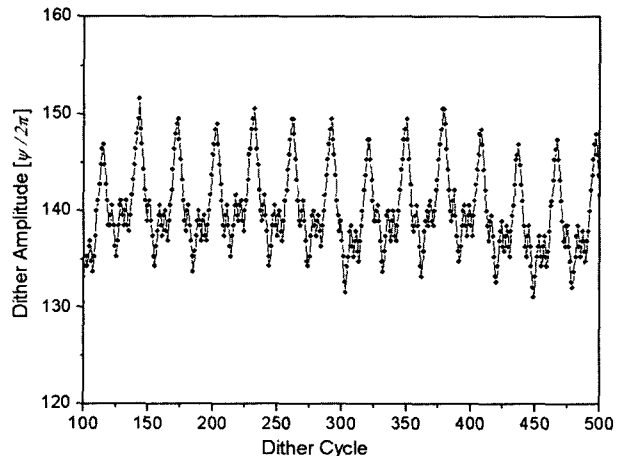


그림 14. 최대값과 최소값이 변화되는 진폭경사를 갖는 몸체진동잡음에 의한 몸체진동 envelope(1sec).

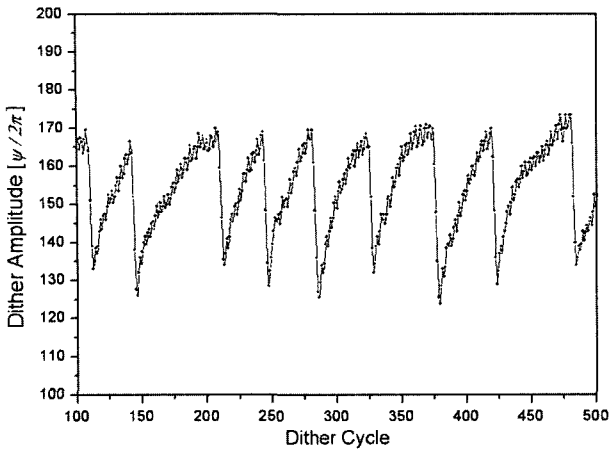


그림 15. 불규칙 가까운 몸체진동 잡음 envelope (1sec).

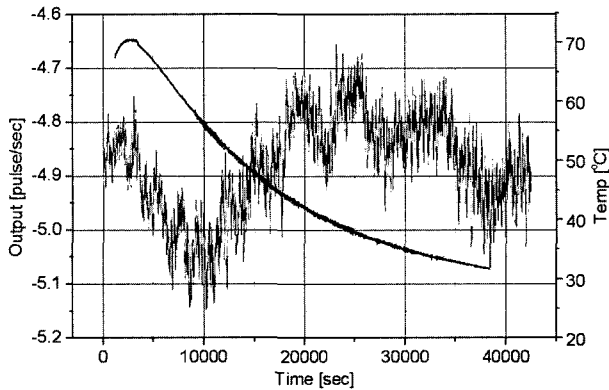


그림 16. 온도가 30~70°C 변화되는 환경에서 최대값과 최소값이 변화되는 진폭경사를 갖는 몸체진동잡음에 의한 자이로 출력.

어떻게 변화되는지 확인하기 위한 실험에 대하여 기술하였다. 우리는 몸체진동의 진폭을 제어하여 그림 14와 같이 진폭의 최대값과 최소값이 변화되는 진폭경사를 갖는 몸체진동잡음과 그림 15와 같이 유사 백색잡음을 첨가하여 앞장에서 제시한 세가지 조건을 모두 만족시킨 몸체진동잡음을 이용하여 자이로를 동작시켰다. 그리고 자이로를 수평으로 고정시키고 외부 온도를 변화시킴으로서 몸체진동의 평균진폭이 미세하게 변화되는 환경에서 자이로 출력오차가 누적되는 경향을 조사하였다. 시험에 적용한 자이로의 환산계수는 1.86 [arcsec/pulse] 이고 몸체진동 주파수는 약 400[Hz]이다.

그림 16에서 알 수 있는 바와 같이 주로 진폭경사만을 인가한 몸체진동잡음에 의해서는 자이로 출력에 최대 0.3 pulse/sec 정도 drift가 발생하지만 그림 17에서 보는바와 같이 앞장에서 지시한 요구조건을 거의 만족시킨 몸체진동잡음에 의해서는 drift가 거의 발생하지 않는다. 이 결과를 통하여 불규칙 몸체진동잡음에 의해서는 lock-in에서의 맥놀이신호 위상오차가 누적되지 않고 평균값이 0이 되어 없어짐을 알 수 있다.

V. 결 론

Lock-in에 의한 오차를 최소화하기 위하여 몸체진동방법을

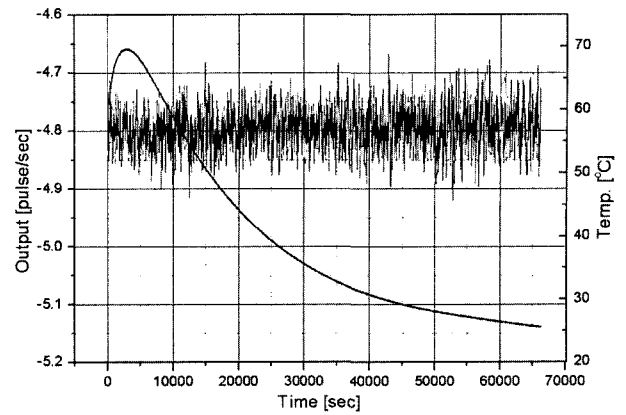


그림 17. 온도가 30~70°C 변화되는 환경에서 불규칙 몸체진동에 유사한 몸체진동 잡음에 의한 자이로 출력.

적용하는 링레이저 자이로에서 lock-in을 통과하는 동안에 발생하는 오차에 대하여 수치해석적인 검토를 하였다. 그 결과 lock-in 영역을 통과하는 시간은 짧지만 그 동안 맥놀이신호 위상에 오차가 발생하며 그 오차의 크기는 lock-in 영역에서의 맥놀이신호 위상과 관계가 있다는 Killpartrick의 해석적인 결과를 확인할 수 있었다. 이 결과로부터 누적되는 오차가 통계적으로 0이 되도록 하기 위하여 몸체진동에 잡음이 필요하다 는 것을 알 수 있었다.

우리는 lock-in에서 맥놀이신호의 오차와 위상간의 관계를 고려하여 누적되는 오차가 통계적으로 0이 되도록 하기 위한 몸체진동잡음의 요구조건을 연구하였다. 그 결과 몸체진동 잡음은 진폭을 증감시키는 진폭경사에 유사 백색잡음을 첨가하고 진폭경사의 기울기 및 몸체진동의 최대값과 최소값에 변화를 주는 형태이어야 함을 알 수 있었다. 우리는 이러한 요구조건을 거의 만족하는 몸체진동잡음을 이용하여 자이로를 동작시킴으로서 온도가 변화되는 환경에서도 맥놀이신호 위상오차가 누적되지 않는 자이로 출력을 얻을 수 있었다.

참고문헌

- [1] J. E. Killpartrick, "The laser gyro," *IEEE Spect.* Vol. 4, pp. 44-55, 1967.
- [2] F. Aronowitz, "The laser gyro," *Laser Application* Vol. 1, Academic, New York, pp. 133-200, 1971.
- [3] E. J. Post, "Sagnac effect," *Review of Modern Physics*, Vol. 39, No. 2, April pp. 475-493, 1967.
- [4] J. E. Killpartrick, "Laser gyro dither random noise," *SPIE* Vol. 487 *Physics of Ring Laser Gyros*, pp. 85-93, 1984.
- [5] F. Aronowitz, and R. J. Collins, "Lock-in and intensity-phase interaction in the ring laser," *Journal of Applied Physics*, January 1970, pp. 130-141.
- [6] R. Rodloff, "A laser gyro with optimized resonator geometry," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. QE-23, No. 4, pp. 438-445, 1987.
- [7] 심규민 외, "링레이저 자이로의 lock-in과 결합함수의 관계 연구," 한국항공우주학회, 제27권 제8호, pp. 116-125, 1999.

- [8] W. Hansli, "Einrichtung zum messen einer drehbewegung," European Patent No.:0133609 BI, 28.09.1983.
[9] 심규민 외, "링레이저 자이로의 몸체진동 검출센서를 이용

한 dither-stripping 연구," 한국항공우주학회, 제31권 제5호, pp. 63-71, 2003.

A study on the dither random noise to minimize the output error of ring laser gyroscope

Kyu-Min Shim[†]

Technology Research Center, Agency for Defense Development, Taejon 305-600, KOREA

[†]*E-mail: kmshim@add.re.kr*

Seong-Hyun Son

Opto-electronics Team, Institute for Advanced Engineering, Kyungki-Do 449-020, KOREA

(Received August 2, 2003, Revised manuscript received October 22, 2003)

In this paper we confirm the relation between the phase and phase error of the beat signal at the lock-in region of the dither type ring laser gyroscope by numerical calculation. We also study the requirement of the dither noise of an amplitude modulation type for statistical zero averaging of the beat signal phase error, without accumulation. As a result, we find that the dither noise requires the increase and decrease gradients of the dither amplitude, and those gradients should be combined with similar white noise. The slope of the gradient and maximum/minimum amplitude must be changed randomly. We confirm the error accumulation characteristic related to the dither noise by comparison of the two outputs during temperature change, by operating the two kinds of dither noise, one is satisfied with the requirement and the other is not.

OCIC Codes : 120.5790, 120.4640, 140.3560.