

링레이저 자이로의 바이어스 안정도 개선을 위한 몸체진동 잡음 연구

A Study on the Dither Random Noise for Improving the Bias Stability of Ring Laser Gyroscope

심 규 민*, 김 천 중
(Kyu-Min Shim and Cheon-Joong Kim)

Abstract : In this paper we confirm the relation between the phases and phase errors of the beat signal at the lock-in region of the amplitude modulation type ring laser gyroscope by numerical calculation. Based on this facts, we, numerically, study the envelopes and magnitudes of the dither noise for statistically summing out the beat signal phase error, and we, experimentally, confirm these numerical results.

As a result, we find that the dither noise requires the increase gradient and the decrease gradient of the dither amplitudes, and those gradients should be combined with white noise. The magnitude of the dither noise which is satisfied with these requirements should be more than 5 percents of the average dither amplitude.

Keywords : ring laser gyroscope, dither random noise

I. 서론

1990년대 이후에는 관성항법장치에서 회전을 검출하는 관성 센서로서 광학식 자이로가 기존의 기계식 자이로를 대체하여 널리 사용되고 있는 추세이다. 광학식 자이로를 대표하는 것은 광섬유 자이로(fiber optic gyro)와 링레이저 자이로(ring laser gyro)로서 그중에 링레이저 자이로는 고정밀 중장거리 비행체용 관성항법장치에 주로 적용되고 있다.

빛이 일주 할 수 있는 삼각형 또는 사각형의 폐경로 공진기로 이루어진 He-Ne 레이저에서 서로 반대방향으로 유도방출 되는 빛을 간섭시켜서 맥놀이 신호를 만들면 그 맥놀이 신호의 주파수는 레이저 공진기에 입력되는 회전 각속도와 비례한다. 이것은 한 공진기 내에서 서로 반대방향으로 유도방출 되는 빛의 공진주파수가 회전에 의하여 차이가 발생한다는 sagnac 효과 때문이며 링레이저 자이로는 이 현상을 이용한 회전 검출센서이다[1-3]. 그런데 이 폐경로 공진기의 주요 구성품인 반사경의 흡수와 산란 등으로 인하여 서로 반대방향으로 진행되는 빛간의 상호작용이 발생한다. 그러므로 서로 반대방향으로 진행되는 두 빛간의 주파수 차이가 어느 한정된 작은 값 이하에서는 두 빛간의 coupling에 의하여 자이로 출력이 입력각속도와 관계없이 영을 나타내는 lock-in 현상이 발생한다. 보통 공진기의 길이가 약 30cm이고 공진기를 구성하는 반사경의 산란이 약 50ppm이면 이 자이로의 lock-in은 약 0.1deg/sec로서 지구의 자전각속도 보다도 상당히 크다. 이 lock-in에 의한 오차를 제거하기 위하여 링레이저 자이로 개발 초기에 lock-in 보다 큰 바이어스를 인가하는 기계적 또는 광학적 방법이 연

구되었으나 인가한 바이어스를 정밀하게 보상해주는 데 어려움이 있어서 현재에는 이러한 문제를 피하기 위하여 링레이저 공진기에 각진동 바이어스를 인가하는 몸체진동(dither)방법이 주로 사용되고 있다[4,5]. 각진동 바이어스는 약 100deg/sec의 평균진폭으로 약 400Hz의 주파수를 갖는 진동을 링레이저 공진기에 인가하여 lock-in 영역에서 동작하는 시간을 최소화함으로써 lock-in에 의한 오차를 최소화하는 방법이다. 이 방법에 의하면 공진기 몸체의 각진동 운동이 구속된 운동이므로 각진동 한주기 동안의 출력을 적분하면 인가된 바이어스가 누적되지 않고 정밀하게 보정할 수 있다. 그러나 레이저 공진기에 입력된 각속도가 lock-in 영역을 주기적으로 통과하게 되므로 이 lock-in 영역을 통과하는 동안에 발생하는 오차는 피할 수 없다. 그러므로 lock-in을 통과하는 동안에 발생하는 오차가 누적되면 자이로의 바이어스 불안정으로 나타나며, 경우에 따라서는 바이어스 drift하는 현상을 발생시킬 수 있다.

몸체진동 방법이 있어서 각진동 운동에 의하여 링레이저 공진기에 입력되는 각속도가 lock-in 영역을 통과하는 짧은 시간동안에 발생하는 오차의 크기는 이론적으로 알려져 있다[6]. Lock-in 영역에서의 오차의 크기는 그때의 맥놀이 신호의 위상에 따라 다르며, lock-in에서의 맥놀이 신호의 위상을 변화시키기 위해서는 몸체진동의 진폭이나 진동수를 변화시켜야 한다. 자이로가 동작하는 동안에 입력 각속도가 1초당 lock-in 영역을 통과하는 회수는 몸체진동 공진주파수의 2배인 약 800회이며 그때마다 작은 오차들이 자이로 출력의 오차로 작용한다. 그런데 lock-in 영역을 통과 할 때마다 그 작은 오차를 추정하여 보상하는 것은 불가능하므로 lock-in을 통과하는 동안에 발생하는 오차가 어느 한쪽으로 누적되지 않고 통계적인 평균값이 영이 되도록 해야 한다. 이를 위해서는 lock-in 영역에서 맥놀이신호의 위상이

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2005. 8. 23., 채택확정 : 2006. 6. 29.

심규민, 김천중 : 국방과학연구소 기술연구본부

(kmsnim@add.re.kr/kcj3651@add.re.kr)

몸체진동의 매주기마다 다른 값을 갖도록 몸체진동을 불규칙적으로 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 이 몸체진동의 진폭을 어떤 형태로 어느 정도 변화시켜 주어야 lock-in을 통과하는 동안에 발생하는 오차의 통계적인 평균값이 영이 되는지 알아내는 것이 어려운 문제이다.

본 연구에서는 lock-in 영역에서 발생하는 오차의 크기가 맥놀이신호 위상에 의하여 변화된다는 이론적인 결과를 수치해석적인 계산을 통하여 분석함으로써 몸체진동 잡음의 필요성을 확인하였다. 그리고 진폭을 증가시키고 감소시키는 과정을 반복하는 진폭경사형 몸체진동 잡음, 백색잡음 형태로 몸체진동부를 구동하는 백색잡음형 몸체진동 잡음, 그리고 이 두 가지 형태를 조합한 조합형 몸체진동 잡음 등 세 종류의 몸체진동 잡음을 발생시켜서 이들에 의하여 자이로 오차가 누적되는 특성을 시뮬레이션을 통하여 분석하였다. 이 과정에서 몸체진동 잡음의 적절한 크기를 알기 위하여 몸체진동 잡음이 없을 때로부터 몸체진동 잡음을 점점 증가시키면서 자이로 오차가 누적되는 크기를 분석하였다. 그리고 이 세 가지 형태의 몸체진동 잡음을 비교하는 실험을 통하여 몸체진동 잡음과 바이어스 안정도와의 관계를 확인하였다.

II. 링레이저 자이로의 맥놀이 주파수 이론

1. 링레이저 자이로의 동작원리

폐광로를 이루는 링레이저 공진기가 각속도 Ω로 회전하는 경우에 공진기 내부에서 서로 반대방향으로 진행되는 빛이 공진기를 일주하는 동안에 시간차이 Δt가 발생한다. 그러므로 서로 반대방향으로 진행되는 빛이 각각의 진행방향에 대한 공진조건을 만족하기 위해서는 빛의 공진주파수가 서로 달라야 한다. 그 공진주파수의 차이 Δν는 공진기의 회전각속도(Ω)에 비례하며 이것을 검출하면 공진기의 회전 각속도를 알 수 있다. 이를 환산계수 Scf를 이용하여 식으로 표현하면 (1)과 같다.

$$\Delta\nu = Scf\Omega \tag{1}$$

(1)에서 환산계수 Scf는 링레이저 자이로의 공진기 길이 L, 공진기 면적을 A, He-Ne 레이저의 파장을 λ라 하면 다음과 같이 계산된다.

$$Scf = \frac{4A}{\lambda L} \Omega \tag{2}$$

He-Ne 레이저의 진동수는 ν ~ 10¹⁵ Hz 이므로 두 빛의 주파수 차이를 검출하기 위해서는 두 빛을 간섭시켜서 맥놀이 주파수를 측정해야 한다.

공진기 내부에서 서로 반대방향으로 진행되는 빛의 진폭 E₁, E₂는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} E_1 &= E_{1m} \sin(\omega_1 t + \phi_1) \\ E_2 &= E_{2m} \sin(\omega_2 t + \phi_2) \end{aligned} \tag{3}$$

여기서 ω₁ = 2πν₁, ω₂ = 2πν₂이고 φ₁, φ₂는 초기 위상이다.

만일 두 빛의 진동수가 같으면 초기 위상차 Δφ = φ₂ - φ₁에 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 I는 다음과 같이 시간의 함수가 된다.

$$I = E_{1m}^2 + E_{2m}^2 + 2E_{1m}E_{2m} \cos(\Delta\omega t + \Delta\phi) \tag{4}$$

여기서 E_{1m}, E_{2m}과 E_{1m}², E_{2m}²은 상수이고, 서로 반대방향으로 진행되는 빛의 진폭을 유사하게 발전시키면 E_{1m} ~ E_{2m}이므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I \sim I_0 [1 + \cos(\psi_0 + \Delta\phi)] \tag{5}$$

여기서 ψ₀ = 2πΔνt로서 맥놀이신호의 위상이다. 그러므로 간섭무늬의 위상변화는 맥놀이신호의 위상변화로 나타낼 수 있고 (1)에 의하여 입력 각속도와 관계는 다음과 같다.

$$\frac{\dot{\psi}_0}{2\pi} = \Delta\nu = Scf\Omega \tag{6}$$

위 식에 의해서 두 빛 간의 한 사이클 차이에 의하여 맥놀이신호 위상 φ가 2π 변화됨을 알 수 있다. 그러므로 (5)에서 알 수 있는바와 같이 맥놀이신호 위상이 2π 변화하면 간섭무늬의 세기도 한 주기 변화하므로 단위시간당 간섭무늬의 변화 회수를 측정함으로써 입력되는 각속도를 알 수 있다.

2. Lock-in과 몸체진동에 의한 맥놀이신호

실제 자이로에서는 반사경을 포함한 공진기를 구성하고 있는 광학부품들의 후방산란이 자이로의 출력에 큰 영향을 미친다.

후방 산란된 빛은 그림 1과 같이 서로 반대쪽으로 진행되는 빛과 간섭을 일으켜서 다음과 같은 크기로 맥놀이신호의 위상을 이동시킨다[7].

$$\Delta\phi_s = \epsilon_2 - \epsilon_1 \tag{7}$$

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &\approx \frac{r_2 E_2}{E_1} \sin(\psi + \beta_2) \\ \epsilon_2 &\approx \frac{r_1 E_1}{E_2} \sin(\psi - \beta_1) \end{aligned}$$

여기서 r₁, r₂과 β₁, β₂는 공진기를 구성하고 있는 광학부품들의 산란계수 및 산란위상이고 ε₁, ε₂는 산란된 빛에 의하여 서로 반대방향으로 진행되는 빛에 유발된 위상변화이다.

그러므로 빛이 공진기를 일주하는 시간 τ 동안에 후방

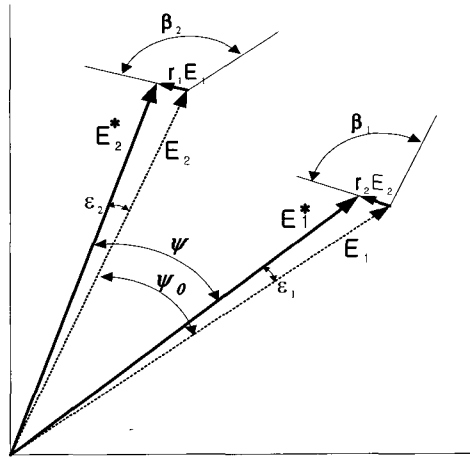


그림 1. 반사경 산란에 의한 맥놀이신호 위상 변화.
Fig. 1. Vector diagram of the beat signal phase change by back scattering of mirror.

산란 된 빛에 의하여 발생하는 오차를 고려한 맥놀이신호 위상 ψ 의 미분방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다[8].

$$\frac{\dot{\psi}}{2\pi} = \frac{\dot{\psi}_0}{2\pi} + \frac{\Delta\psi_s}{\tau} = Scf[\Omega - \Omega_L \sin(\psi + \beta)] \quad (8)$$

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

$$\Omega_L = \frac{c}{4\pi ScfL} \left[\left(r_1 \frac{E_1}{E_2} \right)^2 + \left(r_2 \frac{E_2}{E_1} \right)^2 + 2r_1 r_2 \cos(\beta_1 + \beta_2) \right]^{1/2} \quad (9)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{E_2}{E_1} r_2 \sin \beta_2 - \frac{E_1}{E_2} r_1 \sin \beta_1}{\frac{E_2}{E_1} r_2 \cos \beta_2 + \frac{E_1}{E_2} r_1 \cos \beta_1} \right) \quad (10)$$

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.

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

$$\Omega_L(\min) \sim 0 \quad \text{for } \beta_1 + \beta_2 = \pi$$

이 lock-in의 크기는 반사경의 위치를 변화시켜서 β_1 과 β_2 를 조절하는 방법으로 최소값으로 제어가 가능하나 그 방법을 적용하면 자이로의 구동 및 신호처리부가 복잡해지는 단점이 있다[7,9].

일반적으로 정밀 관성항법장치에 적용 가능한 자이로의 lock-in은 약 0.1deg/sec 이하로서 이 크기는 지구 자전각속도보다 매우 큰 값이므로 이 lock-in 현상을 제거하지 않

면 안된다. 그 목적으로서 가장 많이 쓰이는 것은 몸체진동 방법으로서 lock-in 보다 약 1000배 정도의 최대 각속도를 갖는 정현파 진동을 링레이저 공진기에 인가하고 dither trapping 또는 dither stripping 방법에 의하여 링레이저 출력에서 몸체진동에 의한 출력을 제거하여 자이로 출력을 얻는 것이다[10-12].

몸체진동의 형태는 다음과 같이 자이로 케이스에 구속된 정현파 진동이다.

$$\Omega_d = 2\pi f_d \theta_{dm} \sin 2\pi f_d t \quad (11)$$

여기서 f_d 와 θ_{dm} 는 각각 몸체진동의 주파수와 진폭이다. 그러면 (8)에서 공진기에 입력되는 각속도는 $\Omega \rightarrow \Omega + \Omega_d$ 로 되어 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\dot{\psi}}{2\pi} = Scf[\Omega + \Omega_d(t) - \Omega_L \sin(\psi + \beta)] \quad (12)$$

(12)를 이용하여 J. E. Kilpatrick은 lock-in 영역에서의 맥놀이신호 위상의 초기값 β 에 따라서 맥놀이신호 위상 오차가 주기적으로 변화되는 것을 확인하고 그 오차의 rms 값을 해석적으로 계산하였다[6].

$$\psi_{error}(rms) = \sqrt{\frac{2\pi Scf}{\Omega_d f_d} \Omega_L} \quad (13)$$

이로 인한 자이로 출력 오차각은 각각의 오차의 rms값과 t 시간동안의 lock-in을 통과하는 회수의 제곱근 $\sqrt{2f_d t}$ 의 곱과 같으므로 다음과 같이 $t^{1/2}$ 에 관계된 불규칙 잡음 RW가 유발된다.

$$RW = \Omega_L \sqrt{\frac{1}{2\pi Scf \Omega_d}} \quad [\text{deg}/h^{1/2}] \quad (14)$$

그러므로 불규칙 잡음은 반사경의 후방산란에 의한 lock-in에 비례하는 크기로서 반사경의 산란에 의하여 비교적 예측이 가능하다.

3. Allan variance 방법에 의한 바이어스 및 불규칙 잡음 계산

원자시계의 불규칙 진동에 대한 PSD(Power Spectral Density)를 분석하기 위하여 Allan은 cluster variance와 잡음의 PSD와의 관계를 이용하여 오차의 크기를 구하는 방법인 CST(Cluster Sampling Technique)방법을 제시하였는데 M. Tehrani는 이것을 링레이저 자이로 특성분석에 적용하였다 [13].

CST를 이용하여 시험데이터를 분석하기 위해서는 다음과 같은 방법을 사용한다.

먼저 센서의 출력 각속도를 샘플링 시간 T_s 총 시험시간 T_{tot} 만큼 연속 측정하여 저장한다. 그리고 전체 데이터를 특정한 길이의 cluster time T_c 로 나누어 각각의 평균 $\bar{\Omega}_c$ 를 구하고, 이웃하는 값들 간의 차이에 대한 표준편차 $\sigma_A(T_c)$ 를 계산한다.

$$\sigma_A^2(T_c) = \frac{1}{2} \langle (\overline{\Omega_{k+1}}(T_c) - \overline{\Omega_k}(T_c))^2 \rangle \quad (15)$$

이 과정을 $T_c = T_i$ 로 부터 $T_c = T_{tot}/2$ 까지의 cluster에 대하여 반복하고, $\sigma_A(T_c)$ 를 시간에 대한 log함수 그래프로서 잡음을 분석한다.

불규칙잡음의 원인은 백색잡음(white noise)으로서 Allan variance와 PSD와의 관계에 의하여 $\sigma_{(T_c)A}^2$ 와 백색잡음의 진폭 Q와의 관계를 알 수 있다[13,14].

$$\sigma_A^2(T_c) = \frac{Q^2}{T_c} \quad (16)$$

위의 식의 양변에 log를 취하면 불규칙 잡음과의 관계를 쉽게 알 수 있다.

$$\log \sigma_A(T_c) = \log Q - \frac{1}{2} \log T_c \quad (17)$$

이 식으로 볼 때 불규칙 잡음에 의하여 $\sigma_A(T_c)$ 와 T_c 의 log-log 그래프는 $-1/2$ 의 기울기를 가지며, $T_c=1$ 일 때는 $\sigma_A(1)=Q$ 로서 σ_A 가 백색잡음에 의한 불규칙 잡음을 알 수 있다.

바이어스 안정도 B는 주로 자이로 출력이 저주파로 흔들림에 의하여 나타나는 오차로서 cluster time T_c 가 약 1시간 이상의 영역에서 Allan variance와 PSD와의 관계는 다음과 같다.

$$\sigma_A^2(T_c) = \frac{2B^2 \ln 2}{\pi} \quad (18)$$

그러므로 바이어스 안정도는 log-log 그래프에서 $\sigma_A(T_c)$ 가 T_c 의 변화와 무관하게 일정한 값을 갖는 지점에서 $\sigma_A(T_c)$ 의 1.505배이다[13,14].

Allan Variance에서 바이어스 안정도와 불규칙잡음은 독립적으로 산출될 수 있으나 두 인자 중에 하나가 비정상적으로 크면 다른 하나의 산출에도 영향을 주어 산출 오차를 크게 할 수 있다.

III. 몸체진동 잡음에 의한 자이로 출력특성 시뮬레이션

1. Lock-in에서의 맥놀이신호 위상과 오차의 관계

Lock-in 영역에서 자이로의 출력 오차는 (12)의 미분방정식에 Runge-Kutta 방법을 적용하여 수치해석적인 방법으로 계산할 수 있다. 그리고 다음과 같이 몸체진동의 한 주기 τ 마다 맥놀이신호 위상의 변화량을 계산하면 자이로 출력을 얻을 수 있다.

$$\Omega_{output} = \frac{\psi(\tau) - \psi(0)}{2\pi\tau} [pulse/\tau] \quad (19)$$

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.

$$\psi_{error} = \psi(\Omega_L = \Omega_L) - \psi(\Omega_L = 0) \quad (20)$$

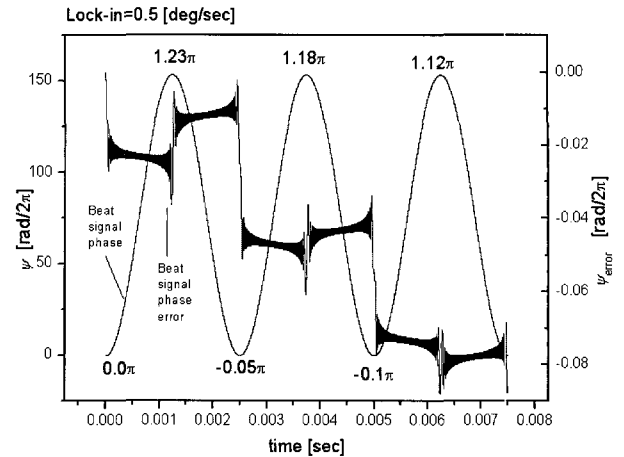


그림 2. 몸체진동과 lock-in에 의한 맥놀이 신호의 위상이동 (lock-in : 0.5deg/sec).

Fig. 2. Beat signal phase shift by lock-in with body dithering (lock-in : 0.5deg/sec).

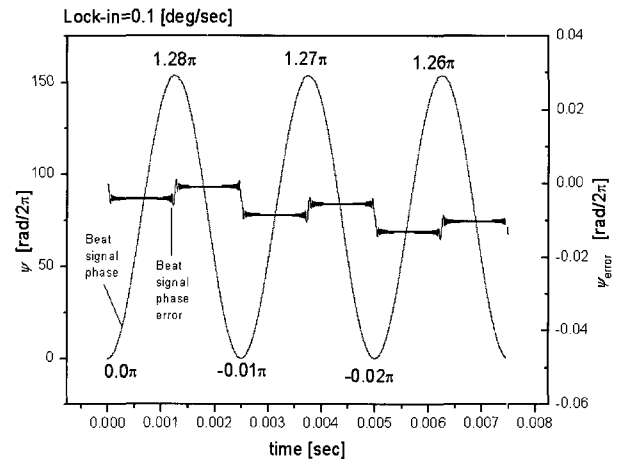


그림 3. 몸체진동과 lock-in에 의한 맥놀이 신호의 위상이동 (lock-in : 0.1deg/sec).

Fig. 3. Beat signal phase shift by lock-in with body dithering (lock-in : 0.1deg/sec).

그림 2와 그림 3은 몸체진동의 진동수는 400Hz이고 진폭은 100deg/sec인 자이로에서 lock-in이 각각 0.5deg/sec와 0.1deg/sec인 경우의 맥놀이신호 위상오차를 계산한 결과이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 100deg/sec의 몸체진동에 의하여 lock-in 영역으로부터 다음 lock-in 영역에 도달되기까지 맥놀이신호 위상이 약 150주기 변화되며, lock-in 영역을 통과하는 동안에 계단 형태의 오차가 발생한다. 그리고 그 오차의 크기는 lock-in의 크기에 비례하고 lock-in에서의 맥놀이신호 위상 ψ_L 에 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 lock-in의 크기는 각각 0.5deg/sec와 0.1deg

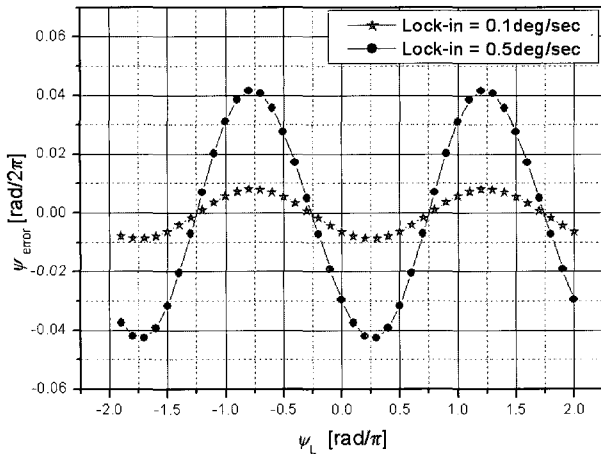


그림 4. Lock-in 영역에서의 맥놀이신호 위상과 위상오차의 관계 (lock-in :0.5deg/sec & 0.1deg/sec).

Fig. 4. Beat signal phase errors as the function of the beat signal phase at lock-in region (lock-in:0.5deg/sec & 0.1deg/sec).

/sec에 대하여 계산하면 그림 4와 같다. 여기서 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-in 영역에서의 맥놀이신호 위상이 매 주기마다 일정하면 위상오차가 한 값을 가지고 계속 누적될 수 있음을 알 수 있다. 그런데 1초에 800회 lock-in을 통과할 때마다 맥놀이신호 위상을 정확히 측정하여 보상할 수 없으므로 오차가 통계적인 0이 되도록 해야 한다. 그 방법으로서 몸체진동의 진폭을 불규칙하게 변화시켜서 lock-in에서의 맥놀이신호 위상을 $0 \sim 2\pi$ 사이의 균일한 분포를 갖도록 한다.

2. 몸체진동 잡음의 형태 및 크기 시뮬레이션

본 절에서는 몸체진동 잡음의 형태 및 크기를 선정하기 위한 시뮬레이션에 대하여 기술 하였다.

(11), (12) 및 (19)를 lock-in의 크기가 0.1deg/sec, 공진기 길이 28cm, 그리고 공진기 면적이 49cm²인 링레이저 자이로에 적용하여 평균진폭이 약 100deg/sec인 몸체진동의 매 주기마다 진폭을 변화시켜 가면서 자이로 출력 및 오차를 계산하였다.

몸체진동의 진폭을 일정하게 하면 그림 5와 같이 몸체진동의 진폭이 lock-in 영역을 통과하면서 발생하는 오차의 크기가 거의 일정하게 반복되므로 오차가 시간에 따라서 그림 6과 같이 누적된다.

같은 조건에서 몸체진동 잡음을 첨가하면 그림 7과 같이 몸체진동의 각속도가 lock-in 영역을 통과하면서 발생하는 오차의 크기가 불규칙적으로 변화되므로 오차가 한쪽으로 누적되지 않고 그림 8과 같이 불규칙적으로 변화 된다는 것을 확인할 수 있다. 그리고 이때의 불규칙잡음은 (14)에서 예측한바와 같이 약 0.005deg/h^{1/2}가 된다.

이 결과로부터 몸체진동 잡음이 충분하지 않은 경우에는 누적되는 오차로 인하여 바이어스가 불안정해지는 현상이

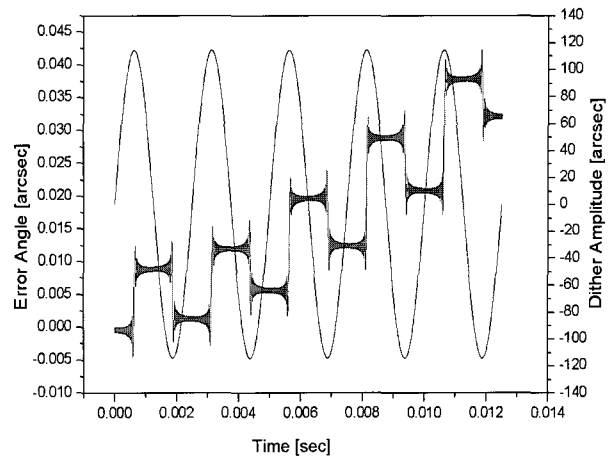


그림 5. 몸체진동 잡음이 없는 경우의 lock-in 영역에서 발생하는 오차.

Fig. 5. The errors at lock-in region in the absence of dither noise.

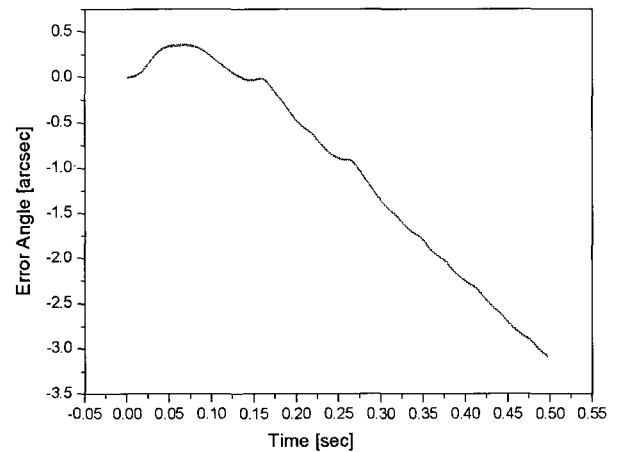


그림 6. 몸체진동 잡음이 없는 경우의 오차가 누적되는 현상.

Fig. 6. Effect of the error accumulation in the absence of dither noise.

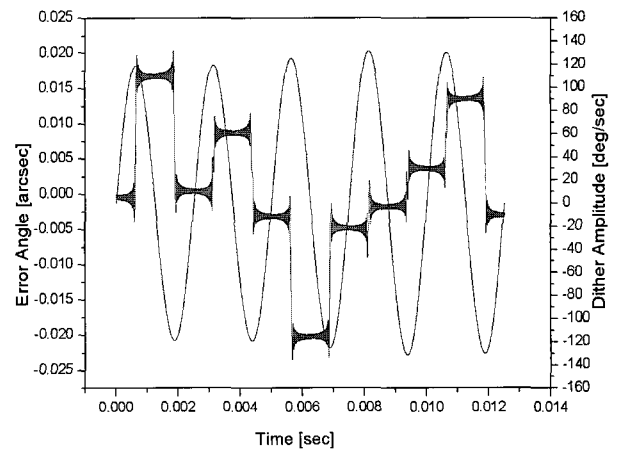


그림 7. 몸체진동 잡음이 있는 경우에 lock-in 영역에서 발생하는 오차.

Fig. 7. The errors at lock-in region with dither noise.

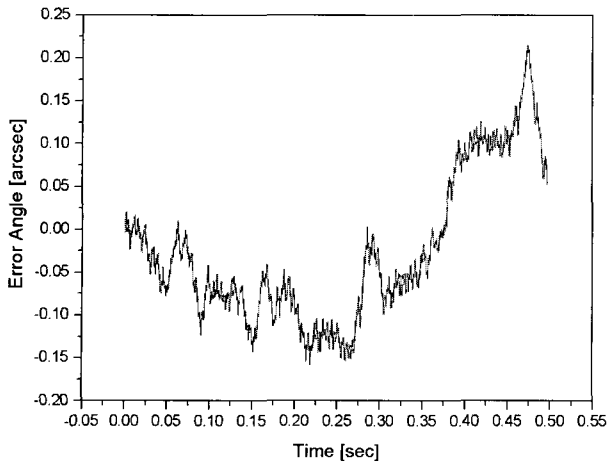


그림 8. 몸체진동 잡음이 있는 경우에 오차가 누적되는 현상.
Fig. 8. The error accumulation in the case of dither work with dither noise.

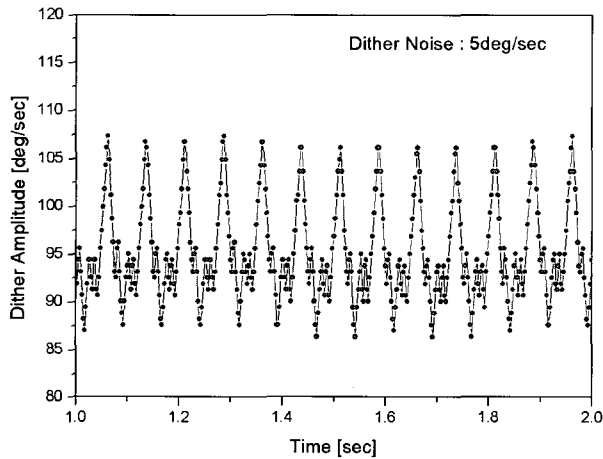


그림 9. 진폭경사형 몸체진동 잡음의 몸체진동 진폭변화.
Fig. 9. Dither envelope of the amplitude stop type dither noise.

발생할 수 있다는 것을 확인하였다.

lock-in에 의하여 발생하는 자이로 오차가 누적되지 않고 통계적으로 0이 되도록 하기위한 최적의 잡음 형태 및 크기를 찾기 위한 목적으로 세 가지 형태의 몸체진동 잡음을 발생시켜서 잡음의 크기에 따라서 자이로 오차가 어떻게 변화되는지를 조사하였다.

첫 번째는 몸체진동의 진폭을 일정한 기울기로 주기적인 증가와 감소를 반복하도록 하면서 진폭의 최대점과 최소점만을 불규칙적으로 제어하는 진폭경사형 몸체진동 방식이고, 두 번째는 몸체진동기 구동부에 백색잡음 형태의 입력을 인가하는 백색잡음형 몸체진동 방식이다. 그리고 세 번째는 위의 두 가지 방식을 조합한 방식으로서 몸체진동의 진폭을 증가시키거나 감소시키는 과정에 백색잡음을 첨가하여 진폭의 최대점과 최소점 뿐만 아니라 기울기도 불규칙적으로 변화시키는 조합형 몸체진동 방식이다.

위의 세 가지 방식을 실제 자이로에 적용하여 몸체진동의 매 주기마다 진폭을 기록하여 시뮬레이션에서 몸체진동

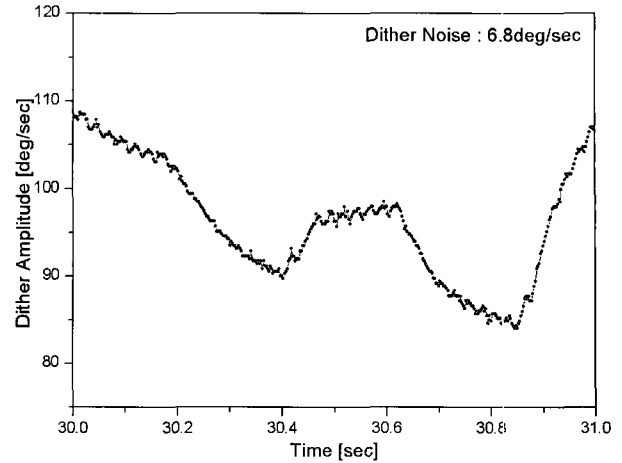


그림 10. 백색잡음형 몸체진동 잡음의 몸체진동 진폭변화.
Fig. 10. Dither envelope of the white noise type dither noise.

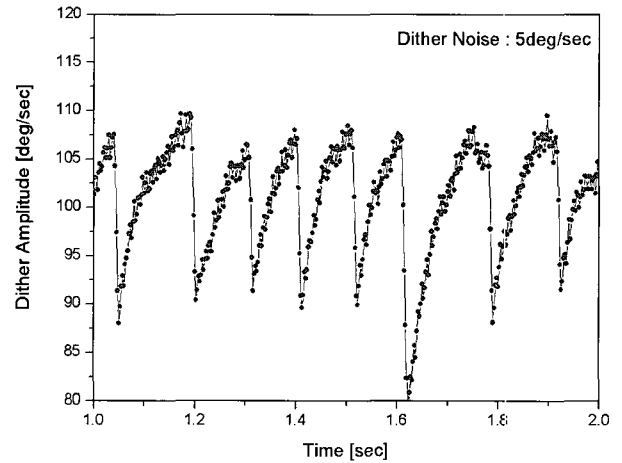


그림 11. 조합형 몸체진동 잡음의 몸체진동 진폭 변화.
Fig. 11. Dither envelope of the combination type dither noise.

잡음으로 사용하였다. 실제 측정된 몸체진동 잡음의 형태는 그림 9~11이다. 그림 9는 진폭경사형 몸체진동 잡음의 몸체진동 진폭변화 형태를 보여주는 것으로서, 몸체진동의 구동입력을 일정하게 인가하여 몸체진동의 진폭을 계속 증가시켰다가 다시 구동입력을 제거하여 진폭이 자연 감소되도록 하였다. 그림 10은 백색잡음형 몸체진동 잡음의 몸체진동 진폭변화 형태를 보여주는 것으로서 진동기의 Q-factor가 커서 백색잡음 형태의 몸체진동기 구동입력 변화에 의한 몸체진동 진폭의 순간적인 변화는 크지 않다. 그림 11은 조합형 몸체진동 잡음의 몸체진동 진폭변화 형태를 보여주는 것으로 몸체진동의 진폭을 증가시킬 때에는 구동입력에 백색잡음을 인가하여 불규칙적으로 증가하도록 하고, 진폭을 감소시킬 때에는 구동기 입력을 역으로 인가하여 급격히 감소하도록 하였다.

(11), (12) 및 (19)를 이용하여 lock-in이 0.1deg/sec인 자이로에 그림 9~11과 같은 형태의 몸체진동 잡음을 적용하여 1시간 동안 누적되는 자이로 오차를 계산하였다. 몸체진동 잡음의 크기에 따라서 자이로 오차가 변화되는 특성을 분

석하기 위하여 몸체진동의 형태는 그대로 유지시키고 잡음의 크기(분산)를 0deg/sec에서 10deg/sec까지 변화시키고, 외부 환경에 의하여 몸체진동의 평균 진폭이 변화될 수 있음을 고려하여 몸체진동의 평균 진폭을 약 90deg/sec에서 110deg/sec까지 변화시켰다.

그림 12는 백색잡음형 몸체진동 잡음의 크기를 증가시키면서 1시간 동안의 자이로 오차를 계산한 그림이다. 그림에서 보는바와 같이 몸체진동의 잡음의 크기가 증가함에 따라서 누적되는 자이로 오차의 크기가 점점 감소함을 알 수 있다.

그림 13은 진폭경사형 몸체진동 잡음의 크기에 따라서 누적되는 자이로 오차를 나타낸 그래프이다. 이 경우에는 자이로 오차의 크기가 그림에서 보는바와 같이 몸체진동 잡음의 분산이 약 1deg/sec 이상이면 포화점에 이르나 포화점 이상에서의 누적 오차의 분산은 약 95arcsec/h(0.026deg/h)이다.

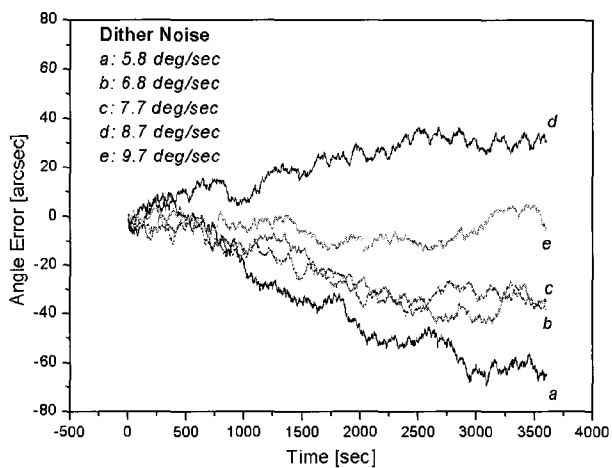


그림 12. 몸체진동 잡음의 크기에 따른 자이로 누적오차의 변화.
Fig. 12. The differences of the accumulated errors by the differences of the dither noise amplitudes.

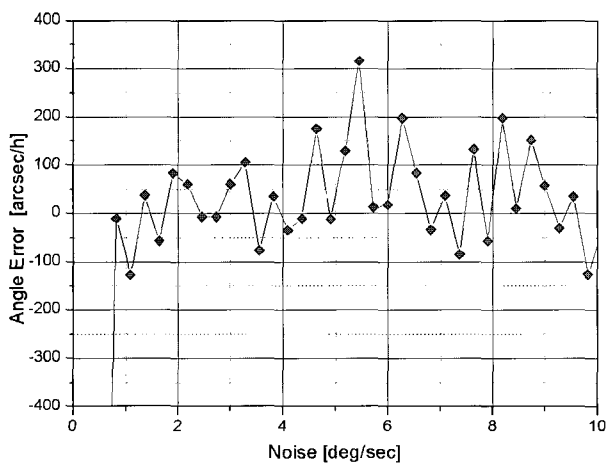


그림 13. 진폭경사형 몸체진동 잡음 크기와 자이로 오차의 관계.
Fig. 13. The dependance of the errors and dither noise amplitudes of the amplitude slope type dither noise.

그림 14는 백색잡음형 몸체진동 잡음의 크기에 따라서 누적되는 자이로 오차를 나타낸 그래프로써 그림에서 보는바와 자이로 오차의 크기가 몸체진동 잡음의 분산이 증가함에 따라서 수렴하다가 약 6deg/sec 이상이면 더 이상 감소하지 않고 포화됨을 알 수 있다. 그리고 자이로 누적오차의 포화점 이상에서는 누적 오차의 분산은 약 44arcsec/h(0.012deg/h)이다. 이 결과는 진폭경사형 몸체진동 잡음에 의한 결과에 비하여 자이로 출력의 불안정도가 약 1/2 수준임을 알 수 있다.

그림 15는 몸체진동의 진폭경사와 백색잡음을 동시에 인가한 조합형 몸체진동 잡음에 의하여 누적되는 자이로 오차를 나타낸 그래프이다. 이 경우에는 자이로 오차의 크기가 그림에서 보는바와 같이 몸체진동 잡음의 분산이 약 5deg/sec(몸체진동 평균진폭의 약 5%) 이상이면 포화점에 이르며, 포화점 이상에서의 누적 오차의 분산은 약 17arcsec/h(0.0046deg/h)이다. 이 결과는 진폭경사형 몸체진동 잡음에

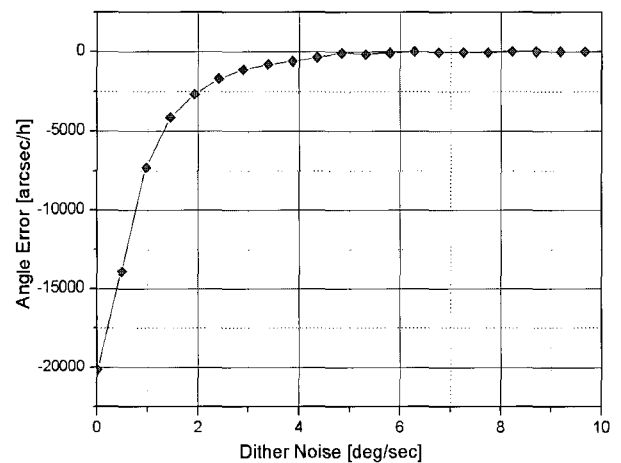


그림 14. 백색잡음형 몸체진동 잡음 크기와 자이로 오차의 관계.
Fig. 14. The dependance of the errors and dither noise amplitudes of the white noise type dither noise.

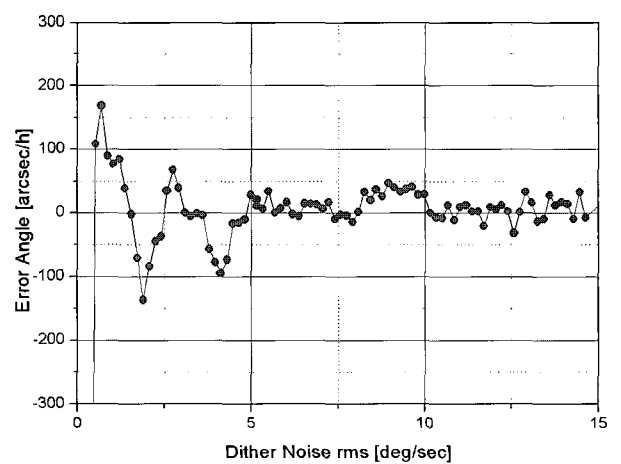


그림 15. 조합형 몸체진동 잡음 크기와 자이로 오차의 관계.
Fig. 15. The dependance of the errors and dither noise amplitudes of the combination type dither noise.

의한 결과에 비하여 자이로 출력의 불안정도가 약 1/6 수준임을 알 수 있다.

IV. 몸체진동잡음에 의한 자이로 출력특성 실험

본 절에서는 시뮬레이션에 의하여 세 종류의 몸체진동 잡음에 의한 자이로 출력 불안정도 비교 결과를 실험에 의하여 확인하고자 그림 16과 같이 실험 장비를 설치하였다. 그림 16에서 세 종류의 몸체진동 잡음신호는 FPGA 소자에 구현되는 VHDL을 이용하여 생성 하였으며 몸체진동에 따른 자이로 출력신호를 인터페이스 보드를 이용하여 실시간으로 저장하여 몸체진동 잡음에 따른 자이로 성능을 확인하였다.

lock-in이 약 0.15deg/sec인 자이로에 그림 9~11과 같은 세 종류의 몸체진동 잡음을 평균진폭이 100deg/sec이고 잡음의 크기가 약 7deg/sec로 링레이저 공진기에 인가하여 자이로의 바이어스 안정도와 불규칙 잡음을 측정하였다. 이 경우에 lock-in이 0.15deg/sec이므로 이론적인 불규칙잡음은 (14)에 의하여 약 0.008 deg/h^{1/2}이다. 바이어스 안정도와 불

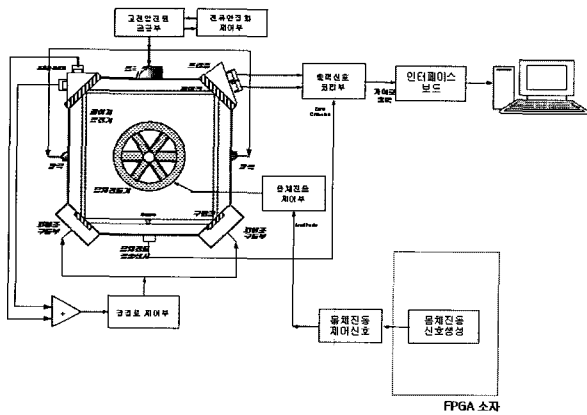


그림 16. 실험 구성도.
Fig. 16. Equipment Installation for an experiment.

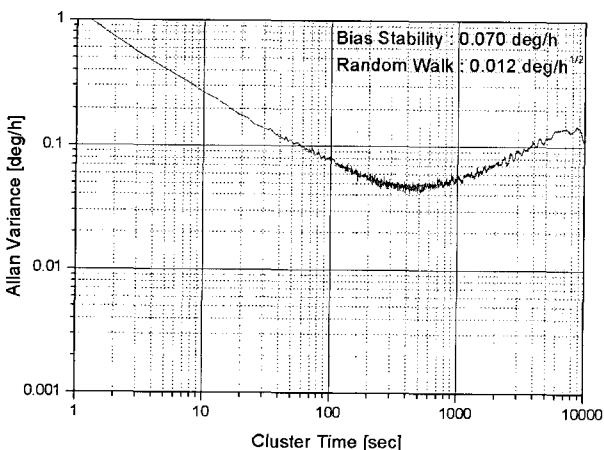


그림 17. 진폭경사형 몸체진동 잡음에 의한 자이로 출력의 allan variance.
Fig. 17. Allan variance of the gyro output with the amplitude slope type dither noise.

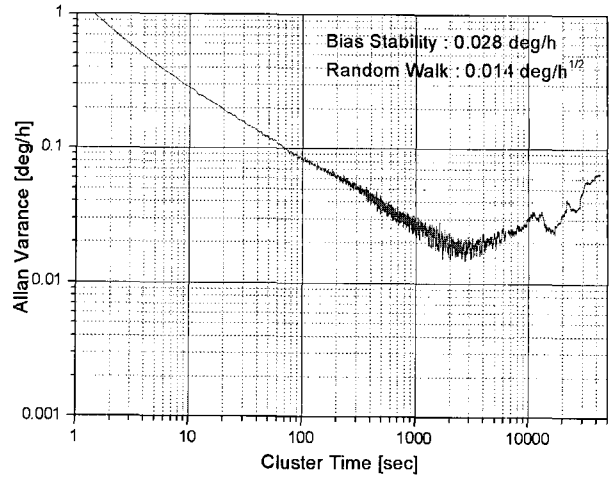


그림 18. 백색잡음형 몸체진동 잡음에 의한 자이로 출력의 Allan variance.
Fig. 18. Allan variance of the gyro output with the white noise type dither noise.

규칙 잡음을 정확히 시험하기 위하여 약 20,000초 이상 측정하고 Allan Variance 방법으로 계산하였다.

그림 17~19에서 알 수 있는 바와 같이 백색잡음형 몸체진동 잡음을 인가한 경우에는 바이어스 안정도가 약 0.028deg/h로서 진폭경사형 몸체진동 잡음을 인가한 경우에 비하여 약 1/2.5배 안정된 결과를 나타냄을 알 수 있다. 그리고 조합형 몸체진동 잡음을 인가하는 경우에는 자이로 바이어스 안정도가 약 0.0045deg/h 이하로서 진폭경사형 몸체진동 잡음을 인가한 경우에 비하여 약 1/15배 안정된 결과를 나타내고 불규칙잡음은 lock-in에 의하여 예측되었던 값과 일치함을 알 수 있다.

이 실험으로 부터 시뮬레이션에서 예측했던 것과 같이 진폭경사형이나 백색잡음형에 비하여 조합형이 매우 효과적이라는 것을 알 수 있다.

V. 결론

몸체진동형 링레이저 자이로에서 lock-in을 통과하는 동안에 발생하는 맥놀이 신호 오차의 크기는 lock-in 영역에서의 맥놀이신호 위상과 관계가 있음을 수치해석적으로 확인할 수 있었다. 이 결과로부터 몸체진동형 링레이저 자이로의 lock-in과 몸체진동이 결합되어 발생하는 오차가 누적되지 않도록 하기 위해서는 lock-in 영역에서의 맥놀이 신호 위상을 불규칙적으로 변화시키는 몸체진동에 잡음에 의하여 오차가 통계적으로 영이 되도록 해야 함을 알 수 있었다.

몸체진동의 진폭을 일정한 비율기로 증가시키거나 감소시키는 과정을 반복하는 진폭경사형 몸체진동 잡음, 백색잡음으로 몸체진동기를 구동하는 백색잡음형 몸체진동 잡음, 그리고 위의 두 종류를 합성한 조합형 몸체진동 잡음 등 세 종류의 몸체진동 잡음에 대하여 시뮬레이션과 실험을 통하여 바이어스 안정도를 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

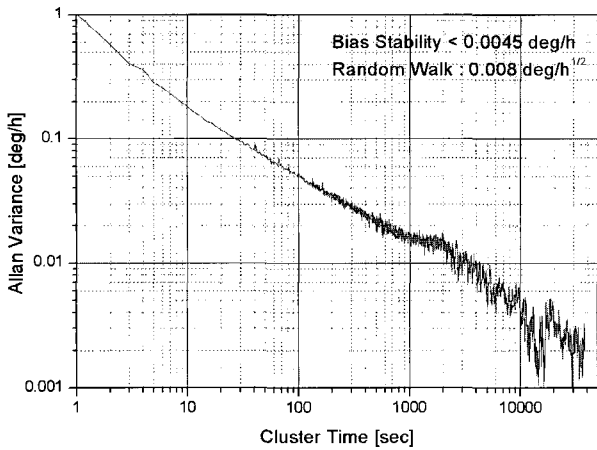


그림 19. 조합형 몸체진동 잡음에 의한 자이로 출력의 allan variance.

Fig. 19. Allan variance of the gyro output with combination type dither noise.

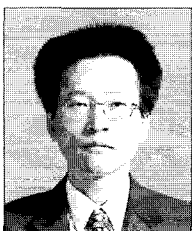
1) 백색잡음형 몸체진동 잡음은 진폭경사형 몸체진동 잡음에 비하여 약 1/2 수준의 안정된 바이어스 특성을 나타내고, 조합형 몸체진동 잡음은 진폭경사형 몸체진동 잡음에 비하여 약 1/6배 이상의 바이어스 안정성을 가진다. 그러므로 안정된 바이어스 특성을 유지하기 위해서는 조합형 몸체진동 잡음을 적용해야 한다.

2) Lock-in을 통과할 때 발생하는 자이로 오차의 통계값을 최소화 하기 위한 조합형 몸체진동 잡음의 크기는 몸체진동 평균진폭의 약 5% 이상이 되어야 한다.

참고문헌

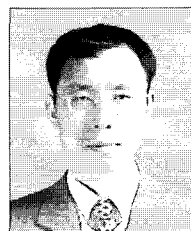
[1] J. E. Killpartrick, "The laser gyro," *IEEE Spect.* vol. 4, pp. 44-55, 1967.
 [2] F. Aronowitz, "The laser gyro," *Laser Application* vol. 1. Academic, New York, pp. 133-200, 1971.

[3] E. J. Post, "Sagnac effect," *Review of Modern Physics*, vol. 39, no. 2, pp. 475-493, April 1967.
 [4] C. V. Heer, "History of the laser gyro," *SPIE*, vol. 487, Physics of Ring Laser Gyros, pp. 2-12, 1984.
 [5] W. W. Chow, "Theory of Multioscillator laser gyro," *SPIE*, vol. 487, Physics of Ring Laser Gyros, pp. 30-32, 1984.
 [6] J. E. Killpatrick, "Laser gyro dither random noise," *SPIE* vol. 487, Physics of Ring Laser Gyros, pp. 85-93, 1984.
 [7] R. Rodloff, "A laser gyro with optimized resonator geometry," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. QE-23, no. 4, pp. 438-445, Apr, 1987.
 [8] F. Aronowitz and R. J. Collins, "Lock-in and intensity-phase interaction in the ring laser," *Journal of Applied Physics*, pp. 130-141, January 1970.
 [9] 심규민 외, "링레이저 자이로의 lock-in과 결합함수의 관계 연구," 한국항공우주학회, 제27권 제8호, pp. 116-125, 1999.
 [10] H. G. Ljung, "Ring laser gyro dither eliminator," *United State Patent* no. 4,344,706, Aug. 17, 1982.
 [11] K. R. Fritze, "Ring laser gyro dither stripper," *United State Patent* no. 5,249,031, Sep. 28, 1993.
 [12] 심규민 외, "링레이저 자이로의 몸체진동 검출센서를 이용한 dither-stripping 연구," 한국항공우주학회, 제31권 제5호, pp. 63-71, 2003.
 [13] M. M. Tehrani, "Ring laser gyro data analysis with cluster sampling technique," *Proceedings of SPIE*, vol. 412, pp. 207-220, 1983.
 [14] Gyro and Accelerometer Panel of the IEEE Aerospace and Electronics Systems Society, "IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Laser Gyros," *IEEE Standard Board*, Sep. 21, 1995.



심 규 민

1963년 1월 18일생. 1986년 충남대학교 물리학과 졸업. 1988년 동 대학원 석사. 2000년 동 대학원 박사(이학박사). 1992년~현재 국방과학연구소 선임연구원. 관심분야는 광학소자, 레이저 자이로 및 제어 알고리즘 등.



김 천 중

1969년 1월 30일생. 1991년 충남대학교 공대 전자공학과 졸업. 1993년 동 대학원 석사. 1993년~2000년 국방과학연구소 연구원. 2000년~2002년 한국항공우주연구원 선임연구원. 2003년~현재 국방과학연구소 선임연구원. 관심분야는 관성항법, 위성항법 및 필터이론 등.