

링레이저 자이로의 환산계수 비선형성과 공진기 각진동 잡음 형태의 관련성 연구

A Study on the Relation Between the Scale Factor Non-linearity
and Dither Noise form of Ring Laser Gyroscope

심 규 민* **이 윤 선***
Shim, Kyu-Min Lee, Youn-Seon

ABSTRACT

In this paper we confirm the disappearance of dynamic lock-in simply by increasing the dither noise magnitude of the ring laser gyroscope by numerical and experimental method.

After that, we numerically study the relation between the dither noise forms and scale factor non-linearities by comparing those of the two case outputs which are individually generated by operating with the two types of dither noise forms. The first one is the simple form composed of consecutive alternations of the random increasing and decreasing parts but maximum and minimum dither envelopes are scarcely changeable. And the second one is similar to the first one but maximum and minimum dither envelopes are randomly changable. As a result, we find that the scale factor non-linearity could be improved by the second one. And we confirm those results by experimental measurements.

주요기술용어(주제어) : Ring Laser Gyroscope(링레이저 자이로), Scale Factor Non-linearity(환산계수 비선형성),
Dither Noise(각진동 잡음)

1. 서론

관성항법장치는 자이로 및 가속도계 등 관성 센서를 이용하여 비행체의 정밀한 위치, 속도, 자세, 각속도, 가속도 정보를 실시간 제공하는 장치로서, 지상, 해상, 항공, 우주 분야 등 다양한 무기체계에 공통으로 소요되는 핵심부품이다. 관성항법장치는 GPS와

같은 전파항법장치에 비하여 외부환경의 영향을 받지 않는 장점이 있으므로 신뢰성 있는 항법정보가 요구되는 무기체계에서는 일반적으로 관성항법장치를 주 장비로 하고 GPS를 보조장비로 하여 보정항법을 구성하여 적용하고 있다.

자이로는 관성항법장치의 핵심부품으로서 각도를 측정하는 역할을 한다. 현재 자이로기술 발전방향은 기존 기계식 자이로로부터 온도제어가 필요 없고 가격이 저렴하며, 동작범위가 커서 스트랩다운 방식의 항법장치를 구성할 수 있는 광학식 자이로로의 전환이 이루어지고 있다. 대표적인 광학식 자이로는 링레

† 2006년 10월 2일 접수~2007년 1월 26일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

주저자 이메일 : kmsnim@add.re.kr

이저 자이로(Ring Laser Gyroscope)와 광섬유 자이로(Fiber Optic Gyroscope)이다. 광학식 자이로의 원리는 Sagnac 효과로서 고리형 공진기 또는 고리형 광섬유를 이용하여 빛을 서로 반대방향으로 회전시키면 고리가 회전하는 경우에 두 빛이 고리를 일주하는데 걸리는 시간이 달라지는 현상을 이용한 것이다^[1,2].

그런데 링레이저 자이로는 이 고리형 공진기의 주요 구성품인 반사경 등의 산란으로 인하여 입력각속도가 영부근에서 자이로 출력이 입력각속도와 관계없이 영을 나타내는 lock-in 현상이 발생한다^[2,3]. 보통 링레이저 자이로의 lock-in은 약 0.1deg/sec 정도이며 이 lock-in에 의한 오차를 제거하기 위하여 빛의 편광특성을 이용하는 방법과 공진기에 각진동(Dither) 형태의 바이어스를 인가하는 방법 등이 있다^[4,5]. 공진기 각진동 방법은 약 80~120deg/sec의 평균진폭과 약 300~500Hz의 주파수를 갖는 정현파 진동을 링레이저 공진기에 인가하여 자이로가 lock-in에서 동작하는 시간을 최소화하는 방법이다. 그런데 이 방법에 의하면 각진동 진폭이 일정할 경우 입력 각속도에 따라서 주기적으로 dynamic lock-in이 발생한다^[5]. 이 dynamic lock-in 현상을 제거할 목적으로 각진동 진폭을 불규칙적으로 변화시켜주는 각진동 잡음을 인가한다. 기존의 연구에서는 입력 각속도가 영인 부근에서의 dynamic lock-in의 크기를 측정 또는 추정하는 방법에 의하여 각진동 잡음의 크기가 dynamic lock-in을 제거하기에 충분한지 여부를 판단하였다^[5,6]. 그 결과로 부터 dynamic lock-in을 완전하게 제거하기 위한 각진동 잡음의 크기는 표준편차로 각진동 평균진폭의 약 3.3% 정도임을 알 수 있었다^[5].

본 논문에서는 먼저, 기본적인 형태의 각진동 잡음을 발생시켜서 각진동 잡음의 크기를 증가시킴에 의하여 dynamic lock-in이 제거될 수 있음을 실험적으로 확인하였다. 그리고 환산계수 비선형성 실험을 통하여 약 5ppm 정도의 환산계수 비선형 오차를 확인하였다.

그리고 이 비선형성의 원인을 각진동 잡음의 형태에 의한 것으로 판단하고 시뮬레이션을 통하여 각진동 잡음의 형태와 환산계수 비선형성의 관계를 비교했다. 이 방법으로 서로 다른 두 가지 형태의 각진동 잡음에 대하여 각진동 잡음의 크기를 변화시키면서

환산계수 비선형 오차의 변화를 분석함으로써 환산계수 비선형성과 각진동 잡음 형태와의 관계를 새로이 제시하였다.

2. 링레이저 자이로 이론

가. 링레이저 자이로의 동작원리

링레이저 자이로의 링레이저는 He-Ne 개스 레이저로서 레이저 공진기가 세 개 또는 네 개의 반사경에 의하여 폐광로를 이루도록 되어있으며 레이저 공진기 내에서 발진된 빛은 서로 반대의 두 방향으로 진행한다. 이 링레이저 공진기가 각속도 Ω 로 회전하는 경우에 공진기 내부에서 서로 반대방향으로 진행되는 빛이 공진기를 일주하는 동안에 시간차이 Δt 가 발생한다. 그러므로 서로 반대방향으로 진행되는 빛이 각각의 진행방향에 대한 공진조건을 만족하기 위한 주파수 차이 $\Delta\nu$ 가 발생하는데 이것은 공진기의 회전속도에 비례한다^[1~3].

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

여기서 Scf 는 자이로의 환산계수로서 다음과 같다.

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

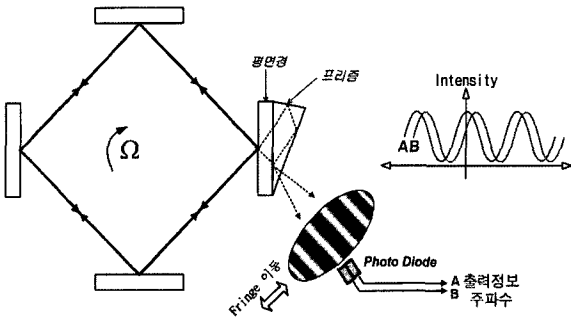
여기서 L 은 공진기의 길이, A 는 폐광로가 이루는 면적, λ 는 He-Ne 레이저의 파장이다.

He-Ne 레이저의 진동수는 $\nu \sim 10^{15} Hz$ 이므로 두 빛의 주파수 차이를 검출하기 위해서는 그림 1과 같이 두 빛을 간섭시켜서 맥놀이 주파수를 측정해야 한다.

맥놀이신호의 위상변화를 $\dot{\psi}$ 와 입력각속도의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{\dot{\psi}}{2\pi} = \Delta\nu = Scf\Omega \tag{3}$$

위 식 (3)에 의해서 두 빛 간의 한 사이클 차이에 의하여 맥놀이신호 위상 ψ 가 2π 변화됨을 알 수 있



[그림 1] 링레이저 자이로의 기본개념

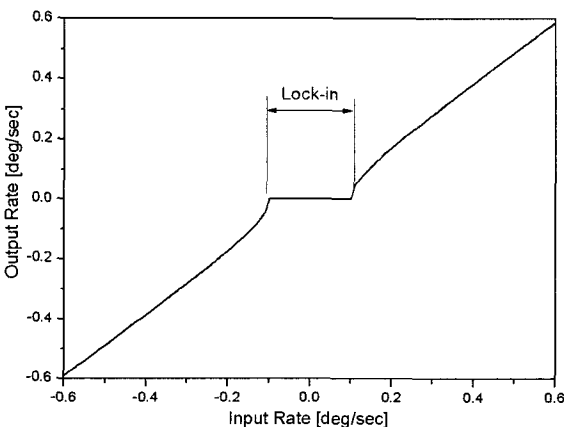
다. 그러므로 단위시간당 맥놀이 위상변화를 측정함으로써 입력되는 각속도를 알 수 있다.

나. 공진기 각진동에 의한 링레이저 자이로의 동작원리

그런데 실제 자이로에서는 반사경을 포함한 공진기를 구성하고 있는 광학부품들의 후방산란에 의하여 서로 반대쪽으로 진행되는 빛과 간섭을 일으키는 현상이 발생한다. 그 결과 각속도가 입력되어도 맥놀이 위상이 변화하지 않는 lock-in 현상이 발생된다^[2,3].

$$\frac{\dot{\psi}}{2\pi} = Scf[\Omega - \Omega_L \sin(\psi + \beta)] \quad (4)$$

여기서 Ω_L 은 그림 2에서 보는 바와 같이 자이로 출력이 나타나지 않는 lock-in 영역이고, β 는 빛의



[그림 2] 링레이저 자이로의 lock-in

후방산란에 의하여 유발되는 위상각이다.

일반적으로 현재의 정밀 관성항법장치에 적용 가능한 크기의 공진기를 가진 자이로에 현재의 반사경 품질로서 도달할 수 있는 lock-in의 크기는 약 0.01~0.1deg/sec 수준이다. 공진기 각진동 방법에서는 lock-in 보다 약 1000배 정도의 최대 각속도를 갖는 정현파 진동을 링레이저 공진기에 인가하고 dither trapping 또는 dither stripping 방법에 의하여 링레이저 출력에서 공진기 각진동에 의한 출력을 제거하여 자이로 출력을 얻는다^[8].

공진기 각진동의 형태는 다음과 같이 자이로 케이스에 구속된 정현파 진동이다.

$$\Omega_d = 2\pi f_d \theta_{dm} \sin 2\pi f_d t \quad (5)$$

여기서 f_d 와 θ_{dm} 는 각각 공진기 각진동의 주파수와 진폭이다. 그러면 식 (4)에서 공진기에 입력되는 각속도는 $\Omega \rightarrow \Omega + \Omega_d$ 로 되어 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\dot{\psi}}{2\pi} = Scf[\Omega + \Omega_d(t) - \Omega_L \sin(\psi + \beta)] \quad (6)$$

공진기 각진동 진폭이 일정하면 식 (6)의 자이로 출력 방정식의 해는 Bessel 함수의 형태로 나타나며, 그 결과에 의하면 $\Omega = n f_d (n = 0, 1, 2, 3, \dots)$ 지점에서 주기적으로 자이로 출력의 특이점이 발생하는데 이 현상을 dynamic lock-in이라고 한다. 이러한 현상을 제거하기 위하여 각진동 진폭을 불규칙적으로 변화시키는 불규칙 잡음을 인가한다^[5~8]. 여기서 dynamic lock-in을 충분히 제거하기 위해서는 불규칙적으로 변화되는 각진동 진폭의 peak-to-peak가 각진동 평균 진폭의 약 10% 이상이 되어야 한다고 알려져 있다^[5].

3. 공진기 각진동 잡음과 dynamic lock-in 관계

가. Dynamic lock-in의 이론적 근거

Lock-in 영역을 통과하는 동안에 발생하는 오차의 크기가 lock-in 영역에서의 맥놀이 위상과 관계있다

는 사실은 알려져 있다^[7]. 본 절에서는 시뮬레이션을 통하여 이를 확인하고 dynamic lock-in이 발생하는 원인 설명하고자 한다.

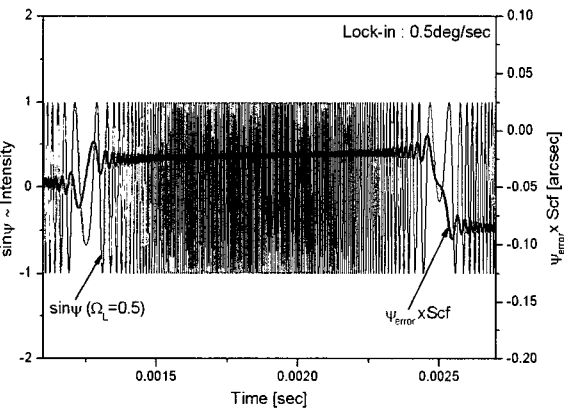
Lock-in 영역에서 자이로의 출력은 식 (6)의 미분 방정식의 해에 의하여 이론적으로 계산할 수 있다. 식 (6)에 Runge-Kutta 방법을 적용하여 수치해석적인 방법으로 식 (7)과 같이 공진기 각진동의 주기 τ 마다 맥놀이신호 위상의 변화량을 계산하여 자이로 출력을 얻을 수 있었다.

$$\Omega_{output} = \frac{\psi(\tau) - \psi(0)}{2\pi\tau} [pulse/sec] \quad (7)$$

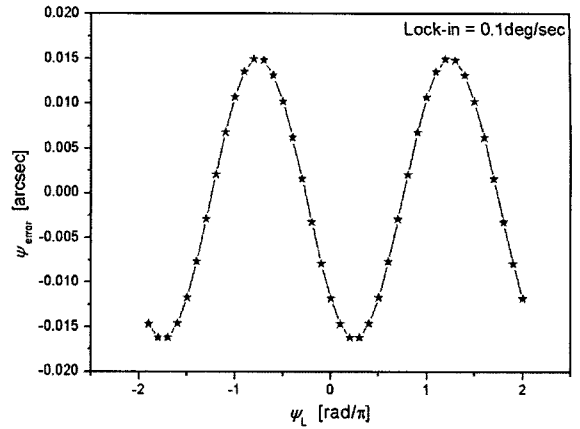
맥놀이신호 위상의 오차를 계산하기 위해서는 식 (6)으로부터 먼저 lock-in이 x 일 때의 맥놀이신호 위상을 계산하고 여기에서 lock-in이 없을 때의 맥놀이신호 위상을 계산하여 빼주면 된다.

$$\psi_{error} = \psi(\Omega_L = x) - \psi(\Omega_L = 0) \quad (8)$$

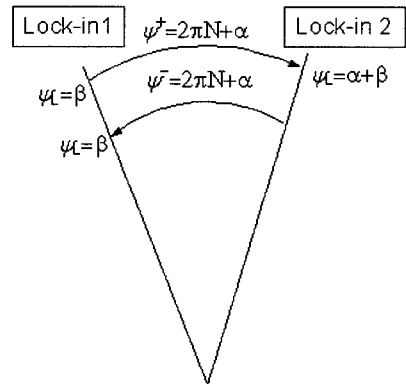
그림 3은 lock-in이 0.5deg/sec인 경우의 맥놀이신호 위상과 오차를 계산한 결과이다. 그림에서 보는바와 같이 맥놀이 신호의 오차는 lock-in 영역을 통과하는 동안에 계단 형태로 발생한다. 그림 4는 lock-in 영역을 통과하는 동안에 발생하는 오차의 크기와 lock-in 영역에서의 맥놀이 위상과의 관계를 나타내



[그림 3] 공진기 각진동에 의한 맥놀이 신호와 맥놀이 신호 오차



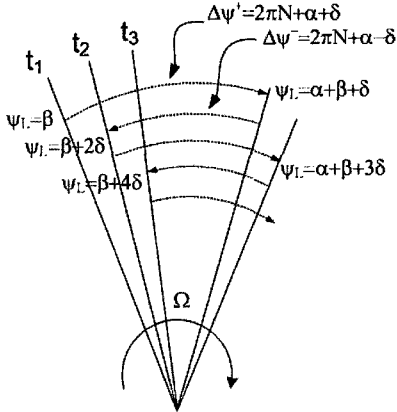
[그림 4] Lock-in 영역을 통과하는 동안에 발생하는 오차의 크기와 lock-in 영역에서의 맥놀이 위상과의 관계



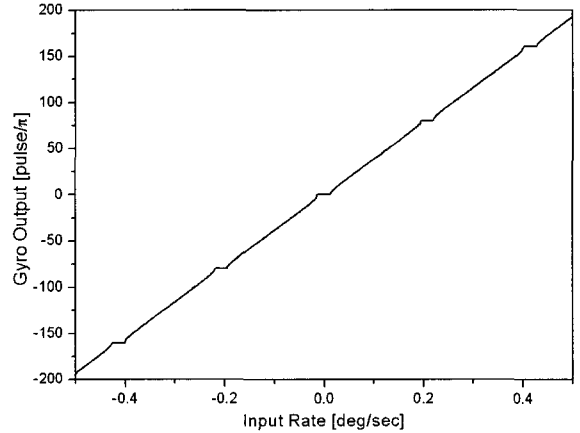
[그림 5] 각진동 진폭이 일정하고 입력 각속도가 없는 경우에 lock-in 영역에서의 맥놀이 신호의 위상이 일정하게 반복되는 현상

그림으로서, 그림에서 보는바와 같이 오차의 크기는 lock-in에서의 맥놀이신호 위상 ψ_L 에 따라서 달라진다는 것을 알 수 있다.

그림 5와 그림 6은 각진동 진폭이 일정한 경우에 lock-in 영역에서 맥놀이 신호의 위상을 나타낸 그림이다. 그림 5는 입력 각속도가 없는 경우에 lock-in 영역에서의 맥놀이 신호의 위상이 일정하게 반복되는 현상을 나타낸 그림이고, 그림 6은 입력 각속도에 의하여 각진동 매 주기 마다 맥놀이 신호의 위상이 2δ 만큼 달라지는 경우를 나타낸 그림이다. 이 경우에



[그림 6] 일정한 각진동 진폭과 입력 각속도에 의하여 각진동 매 주기마다 lock-in에서의 맥놀이 신호의 위상이 2δ 만큼 달라지는 경우



[그림 7] Lock-in이 0.5deg/sec인 공진기 일정한 크기의 각진동 진폭을 인가한 경우 자이로 입력에 대한 출력 그래프

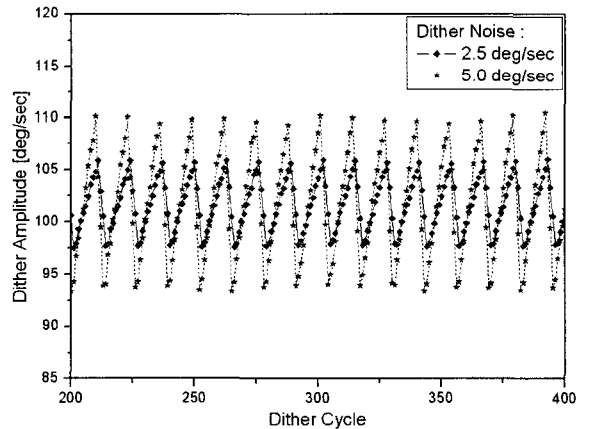
$2\delta = 2n\pi$ 의 조건이 만족되면 각진동 주기마다 같은 크기의 오차가 누적될 수 있다. 이러한 현상에 의하여 각진동을 증가하더라도 그 진폭이 일정하면, lock-in 영역에서의 맥놀이 신호 위상이 2π 의 정수배 크기로 변화되는 각속도가 입력되는 경우에는 오차가 크게 누적되는 현상이 발생할 수 있다. 즉 입력 각속도에 의한 맥놀이 신호의 위상이 $0, 2\pi, 4\pi, 6\pi \dots$ 인 곳에서 오차가 크게 발생하는데 이 현상이 dynamic lock-in 이다.

나. 공진기 각진동 잡음과 dynamic lock-in 관계 실험 분석

앞의 절에서 설명된바와 같이 각진동 진폭이 일정하면 dynamic lock-in이 발생한다.

그림 7은 lock-in이 0.5deg/sec이고 공진기 길이가 28cm인 사각형 자이로에 각진동 진폭을 항상 일정한 크기로 인가한 경우의 자이로 입력에 대한 출력의 그래프를 나타낸 것으로서 주기적으로 dynamic lock-in이 발생함을 알 수 있다.

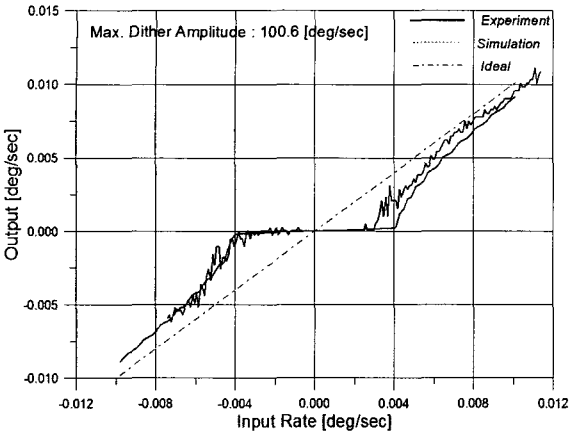
우리는 각진동 진폭을 약 10~11주기 동안 불규칙적인 크기로 증가시키다가 약 3~4주기 동안 감소시키는 진폭경사형 각진동 잡음을 발생시켰다. 그림 8은 실제 자이로에 적용하여 각진동 주기마다 측정된 공진기 각진동 최대진폭으로서 각진동 잡음의 크기가 서로 다른 두 경우를 나타낸 것이다. 그림에서



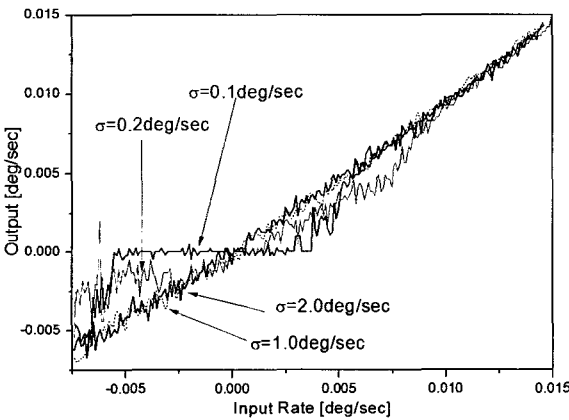
[그림 8] 진폭경사형 각진동 잡음

보는 바와 같이 각진동 주기마다의 진폭은 불규칙하지만 각진동 진폭이 증가하는 주기의 수 및 감소하는 주기의 수가 거의 변함이 없으므로 각진동 잡음 envelop의 최대값과 최소값은 비교적 작은 변화를 가지고 있다.

이 각진동 잡음의 크기와 dynamic lock-in의 관계를 확인하기 위하여 각진동의 평균진폭이 일정한 상태에서 잡음의 크기를 증가시키면서 dynamic lock-in의 크기를 측정하는 실험을 하였다. 실험에 사용된 자이로의 lock-in은 약 0.1deg/sec이고 환산계수는 약 2arcsec/pulse, 그리고 각진동 주파수는 약 400Hz



[그림 9] 공진기 각진동 진폭이 일정할 때 발생하는 dynamic lock-in 현상

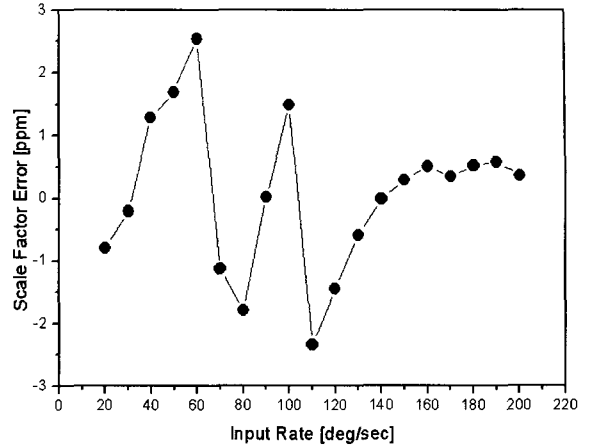


[그림 10] 각진동 잡음을 증가시키므로써 dynamic lock-in이 감소되는 현상

이다.

각진동 잡음을 증가시키면서 dynamic lock-in을 측정된 결과 그림 9와 그림 10에서 보는 바와 같이 각진동 잡음의 표준편차가 약 2deg/sec 이상이면 시각적으로 볼 때 dynamic lock-in 현상이 없어짐을 알 수 있었다.

그리고 충분한 크기라고 판단되는 약 6deg/sec의 각진동 잡음을 인가한 상태에서 환산계수 비선형성을 측정하였다^[9,10]. 그 결과 그림 11에서 보는 바와 같이 환산계수 비선형 오차의 크기가 약 5ppm이 되는 것을 알 수 있었다.



[그림 11] 진폭경사형 각진동 잡음(6deg/sec)에 의한 환산계수 오차(~5ppm)

4. 공진기 각진동 잡음과 환산계수 비선형성 관계

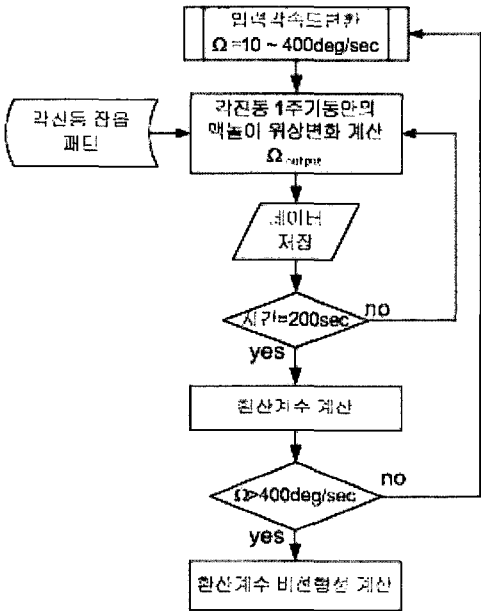
가. 각진동 잡음과 환산계수 비선형성 관계의 수치해석적인 분석

앞 절에서 알 수 있는 바와 같이 비교적 단순한 진폭경사형 공진기 각진동 잡음에 의해서도 약 2deg/sec의 잡음에 의하여 dynamic lock-in 없어진다. 즉 dynamic lock-in으로 볼 때 각진동 잡음의 임계점은 약 2deg/sec이다. 그러므로 약 6deg/sec의 각진동 잡음에 의해서는 dynamic lock-in이 완전히 없어질 수 있다고 예측된다. 그러나 환산계수 비선형성은 약 6 deg/sec의 각진동 잡음에 의해서도 아직 남아있다. 이 절에서는 임계점보다 충분히 큰 진폭의 각진동 잡음에 의해서도 환산계수 비선형성이 존재하는 원인을 분석하기 위하여 각진동 잡음 형태와의 연관성을 분석하고자 한다.

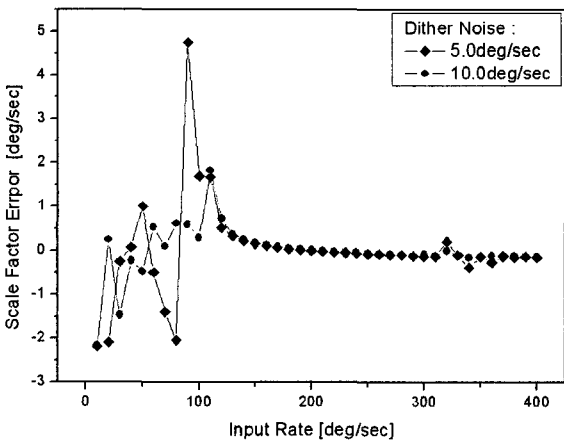
우리는 각진동 잡음의 크기 및 형태의 적절성을 판단하기 위하여 두 가지 형태의 각진동 잡음을 발생시키고 약 400deg/sec 동작 구간에서 환산계수 비선형성을 비교하는 방법에 의하여 각진동 잡음의 크기 및 형태를 판단하는 방법을 고안하였다. 우리는 먼저 입력각속도가 변할 때의 자이로 출력을 식 (6)과 식 (7)을 이용하여 수치해석적인 방법으로 발생시키고 10~400deg/sec 구간에서의 환산계수 비선형성을 계산하

였다. 이때 식 (6)의 $\Omega_d(t)$ 는 자이로의 각진동 주기마다 진폭을 측정하는 실험을 통하여 얻어진 각진 패턴을 사용하였으며, 각진동 평균진폭은 100deg/sec이고, 각진동 잡음의 크기는 표준편차로 정의하였다.

그림 12는 환산계수 비선형성의 수치해석적인 분석 과정을 나타낸 흐름도이다.



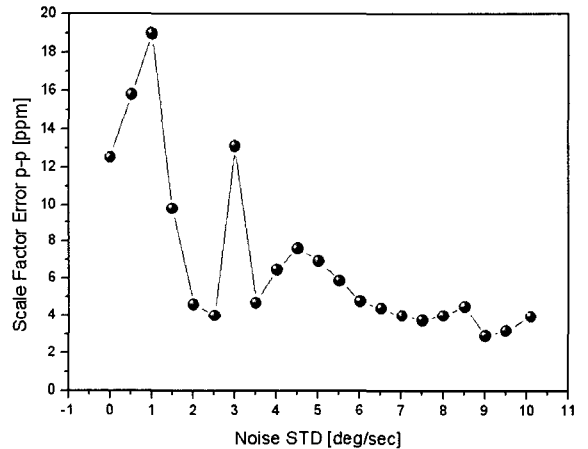
[그림 12] 환산계수 비선형성의 수치해석적인 분석 과정



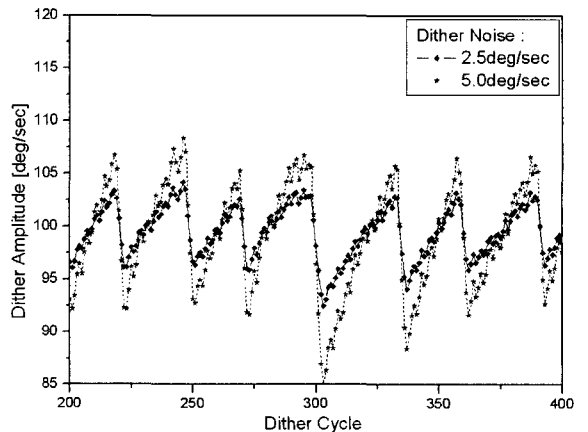
[그림 13] 진폭경사형 각진동 잡음에 의한 환산계수 오차 추이

이 수치해석 프로그램에 그림 8과 같은 진폭경사형 각진동 잡음을 적용하는 경우에 각진동 잡음의 크기가 각각 5deg/sec와 10deg/sec일 때의 10deg/sec ~ 400deg/sec의 입력 각속도에 대한 환산계수 비선형성은 그림 13과 같다.

그림 14는 진폭경사형 각진동 잡음의 크기를 증가시키면서 환산계수 비선형성 최대오차의 추이를 그래프로 나타낸 것이다. 여기서 보는 바와 같이 각진동 잡음의 크기가 공진기 각진동 평균진폭의 약 6% 이상이면 환산계수 비선형 오차는 약 5ppm으로 수렴함을 알 수 있다.



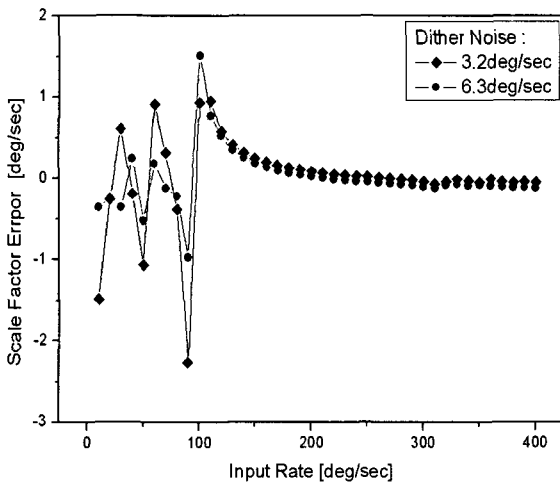
[그림 14] 진폭경사형 각진동 잡음의 크기와 환산계수 오차의 관계



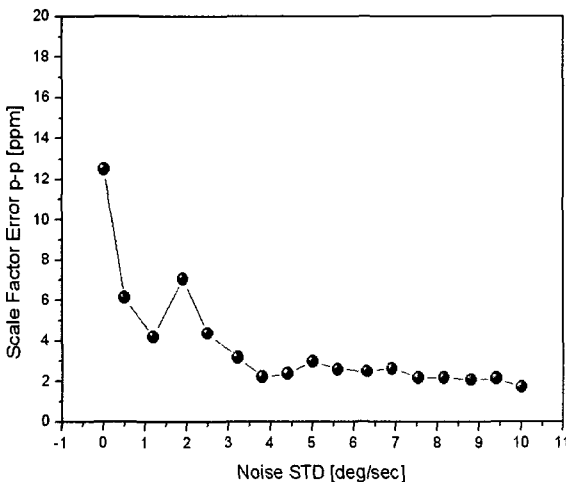
[그림 15] 조합형 각진동 잡음

우리는 각진동 잡음의 형태를 변형시켜서 그림 15와 같은 조합형 각진동 잡음을 발생시켰다. 그림에서 보는바와 같이 진폭경사형에 비하여 각진동 주기마다 각진동 진폭의 불규칙성을 비교적 크게 인가하였고, 여기에 각진동 잡음 envelop의 최대값과 최소값에 변화를 주었다.

그림 16은 이 경우에 각진동 잡음의 크기가 각각 5deg/sec와 10deg/sec일 때의 환산계수 비선형성이다.



[그림 16] 조합형 각진동 잡음에 의한 환산계수 오차 추이



[그림 17] 조합형 각진동 잡음의 크기와 환산계수 오차의 관계

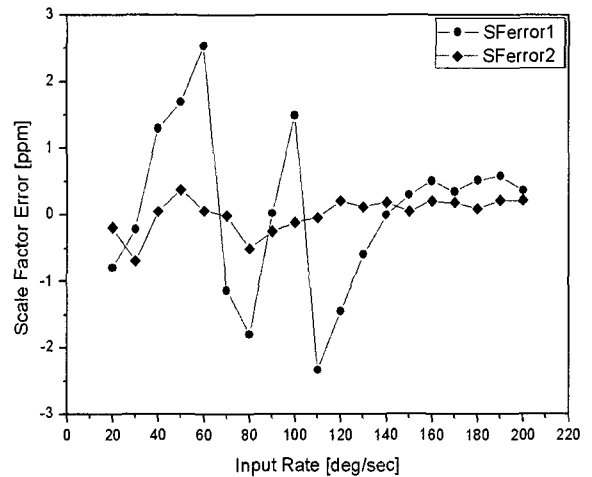
그리고 그림 17은 조합형 각진동 잡음의 크기를 증가시키면서 환산계수 비선형성의 추이를 그래프로 나타낸 것이다. 여기서 보는 바와 같이 각진동 잡음의 크기가 공진기 각진동 평균진폭의 약 4% 이상이면 환산계수 비선형 오차는 약 2.5ppm으로 수렴함을 알 수 있다.

이상과 같은 결과에 의하여 우리는 공진기 각진동 잡음의 형태에 의하여 자이로 환산계수 오차가 영향을 받음을 알 수 있었고 조합형 각진동 잡음은 진폭경사형 각진동 잡음에 비하여 개선된 환산계수 비선형성을 얻을 수 있음을 예측할 수 있었다.

나. 각진동 잡음과 환산계수 비선형성 관계 실험

이 절에서는 두 가지 형태의 각진동 잡음에 의하여 나타나는 환산계수 비선형성을 실험을 통하여 비교하였다.

그림 18은 lock-in이 약 0.1deg/sec인 동일 자이로에 약 6deg/sec의 진폭경사형 각진동 잡음과 조합형 각진동 잡음을 인가하여 환산계수 오차를 측정된 실험 결과이다. 그림에서 보는바와 같이 조합형 각진동 잡음에 의한 환산계수 오차가 진폭경사형에 의한 경우에 비하여 약 1/4로 감소됨을 알 수 있다.



[그림 18] 진폭경사형 각진동 잡음(6deg/sec)에 의한 환산계수 오차(SFError1: ~5ppm)와 조합형 각진동 잡음(6deg/sec)에 의한 환산계수 오차(SFError2~1.2ppm) 비교

5. 결론

공진기 각진동 잡음의 형태 및 크기에 의한 환산 계수 비선형성을 평가할 수 있는 시뮬레이션 기법 개발을 통하여 링레이저 자이로의 환산계수 비선형성은 공진기 각진동 잡음의 크기뿐만 아니라 형태에 의하여 영향을 받는다는 사실을 새로이 증명하였다. 그 결과 각진동 잡음의 형태는 조합형이어야 하고, 각진동 잡음의 크기가 각진동 평균진폭의 약 5% 이상이면 약 2ppm 이하의 환산계수 비선형오차를 얻을 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] Post E. J., "Sagnac Effect", *Review of Modern Physics*, Vol. 39, Number 2, pp.475~493, April 1967.
- [2] Sargent M., "Basic Ring Laser Gyro Theory", *SPIE*, Vol. 487 Physics of Ring Laser Gyros, pp.22~29, 1984.
- [3] Aronowitz F., Collins R. J., "Lock-in and Intensity-Phase Interaction in the Ring Laser", *Journal of Applied Physics*, January, pp.130~141, 1970.
- [4] Weng W., "Theory of Multioscillator Laser Gyro", *SPIE*, Vol. 487 Physics of Ring Laser Gyros, pp.30~32, 1984.
- [5] Hutchings T. J., Stjern D. C., "Scale Factor Non-linearity of a Body Dither Laser Gyro", *Proc. IEEE Nat'l Aerospace and Electronic Conf.*, pp.549~555, 1978.
- [6] Wang Kedong, Yan Lei, Gu Qatai, "The Influence of noise on output of Ring Laser Gyroscope", *Sensor and Actuators*, pp.75~83, 2005.
- [7] Killpatrick J. E., "Laser Gyro Dither Random Noise", *SPIE* Vol. 487 Physics of Ring Laser Gyros, pp.85~93, 1984.
- [8] Ljung H. G., "Ring Laser Gyro Dither Eliminator", *United State Patent* No. 4,344,706, Aug. 17, 1982.
- [9] Coccoli J. D., Helfrant S. B., "The Intrinsic Stability of Laser Gyro Scale Factor", *IEEE*, pp.575~582, 1978.
- [10] 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.