論文

관성항법장치 초기정렬시간 단축을 위한 링레이저 자이로 lock-in오차 보상방법의 수치해석적인 분석

심규민*, 장석원*, 백복수*, 정태호*, 문홍기*

Numerical Research on the Lock-in Compensation Method of a Ring Laser Gyroscope for Reducing INS Alignment Time

Kyu-Min Shim*, Suk-Won Jang*, Bok-Soo Paik*, Tae-Ho Chung* and Hong-Key Moon*

ABSTRACT

Generally, the sinusoidal cavity dither is adopted to ring laser gyroscope for eliminating the lock-in which is non-linear effect at the small rotation input. Despite this method, there are some remained errors which are generated at the dither turnaround, and those errors produce random walk which is a general character of a ring laser gyroscope. As one of the numerous research results for compensating these errors, there is a special lock-in compensation method which is the method of error estimation and compensation by comparing the beat signal periods of before and after the dither turnarounds.

In this paper, by ring laser gyroscope modeling and numerical analysis, we verified the theoretical validity and confirmed the effectiveness of this method in expectation of the possible beat signal measurement time resolution. As a result, we confirmed the random walk decreases from a-half to a-third by this lock-in compensation method. So, it is expected to be a remarkable method for reducing the INS alignment time.

초 록

링레이저 자이로에는 입력각속도가 작은 영역에서 비선형적인 출력현상인 lock-in이 발생하는데 이를 제거하기 위하여 레이저 공진기에 정현파 각진동을 인가하는 방법이 주로 적용된다. 그러나, 그 방법을 적용하는 경우에도 각진동 회귀점에서 lock-in에 의한 오차가 남아있게 되는데, 이들 오차에 의하여 링레이저 자이로의 일반적인 오차특성인 랜덤웍이 발생된다. 이 lock-in에 의한 오차를 제거하기 위한 많은 연구결과 중의 한 방법으로써 lock-in오차 보상방법은 공진기 각진동 회귀점을 통과하기 전과 후의 맥놀이신호 주기를 비교하여 오차를 추정하고 보상하는 방법이다.

본 연구에서는 자이로 모델링 및 수치해석적인 방법으로, 이 lock-in오차 보상방법의 이론적인 적용 가능성을 분석하고, 현재 가능 할 것으로 판단되는 맥놀이 신호주기 측정 분해능을 감안하여 이 방법의 적용 효과를 분석하였다. 그 결과 lock-in오차 보상방법에 의하여 랜덤웍이 약 1/2~1/3로 감소될 수 있음을 알 수 있었다. 그러므로 이 방법은 항법장치의 정렬시간을 획기적으로 단축시킬 수 있는 방법이 될 것으로 기대된다.

Key Words : Ring Laser Gyroscope(링레이저 자이로), Cavity Dither(공진기 각진동), Random walk(랜덤웍), Lock-in Compensation(Lock-in 보상)

† 2008년 6월 2일 접수 ~ 2009년 2월 11일 심사완료

* 정회원, 국방과학연구소
교신저자, E-mail : kmshim@add.re.kr
대전시 유성우체국 사서함 35-5호

I. 서 론

관성항법장치를 탑재한 비행체가 항해를 하기 위해서는 출발점에서 자신의 위치와 자세를 알아야 한다. 자신의 위치는 다양한 방법으로 미리 알 수 있으나, 자신의 자세를 알기 위해서는 수 분에서 수 십분 동안 정지 상태를 유지하는 초기정렬시간이 필요하다. 비행체가 출발전에 오랜 동안 정지 상태를 유지해야 한다는 것은 즉각적인 반응을 요구하는 대부분의 비행체 운용자에게 시간적인 손실을 발생시킨다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 평상시 미리 정렬을 해서 보존하다가 유사시 급히 출발할 수 있도록 하는 저장정렬(stored alignment)이나, 비행체가 출발한 후에 일정한 속도나 방향을 유지하여 진행하면서 위성신호를 이용하여 정렬하는 비행중 정렬(in-flight alignment) 등이 있다. 그러나 이러한 방법은 적용성이나 정밀도 면에서 여러 가지 한계가 있다.

초기정렬에 걸리는 시간은 주로 정렬 요구정밀도와 관성항법장치를 구성하는 자이로와 가속도계 등의 항법센서 성능에 관련되어 있다[1]. 특히 링레이저 자이로를 적용하는 관성항법장치의 경우에는 링레이저 자이로의 랜덤웍이 정렬시간을 좌우한다.

초기정렬시간에 가장 큰 영향을 주는 링레이저 자이로 랜덤웍의 주요 원인은 레이저 공진기를 구성하고 있는 반사경의 산란에 의하여 발생하는 lock-in이다. Lock-in은 입력 각속도가 작은 영역에서 발생하는 환산계수의 비선형적인 현상이며, 이 현상을 제거하기 위하여 레이저 공진기를 정현파 형태의 각속도로 각진동시키는 공진기 각진동(dither)방법이 일반적으로 적용되고 있다. 그런데, 이 방법을 적용하는 경우에 각진동에 의하여 입력되는 각속도 진폭이 주기적으로 영이 되는 각진동 회귀점이 발생하게 되는데, 이때마다 lock-in에 의한 오차가 남아있게 된다. 이러한 오차가 누적되어 다른 종류의 성능계수에 비하여 상대적으로 큰 랜덤웍이 발생된다[2]. 1980년대 후반부터 일부 전문 연구기관에서는 이러한 랜덤웍을 감소시키기 위하여 다양한 종류의 lock-in 최소화방법과 lock-in오차 보상방법을 제안하고 있으나 실제 적용 가능성이나 적용여부가 알려지지 않고 있다.

Lock-in 최소화 방법은 반사경 위치를 변화시켜서 후방산란 된 빛의 위상을 제어하여 전방으로 진행하는 빛과의 결합을 최소화함으로서 lock-in을 줄이는 방법이다[3-4]. 그런데 이 방법은 반사경의 위치를 변경시킴으로 인하여 광경로 전체가 왜곡될 가능성이 크므로 적용에 어려움이 예상 된다.

Lock-in오차 보상방법은 공진기 각진동 회귀점 전과 후의 자이로 출력신호 주기를 측정하여 공진기 각진동 회귀점을 통과하는 동안에 발생하는 오차를 추정하고 보상하는 방법이다[5-6]. 이 방법은 특허를 통하여 제안된 방법으로써 적용 가능성에 대한 이론적인 근거와 적용효과 등에 대한 분석이 없는 상태이다.

이 방법을 적용하기 위해서는 간섭무늬 신호를 정밀하게 처리하고 샘플링하기 위한 아날로그 및 디지털 전자부와 오차보상 알고리즘을 탑재하기 위한 고속의 디지털 프로세서가 요구된다. 1980년대 말이나 1990년대 초기에는 상기의 기술이 충분히 발달되지 못하여 이 방법을 적용하기에 어려움이 있었을 것으로 판단되므로 실제 적용이 되었는지는 알 수 없다.

본 연구에서는 자이로의 이론적인 모델링 및 수치해석적인 분석 방법으로, 현대의 발달된 고속 디지털 프로세서 등의 H/W 기술을 고려하여 기존에 제안되었던 lock-in오차 보상방법의 적용가능성과 적용효과를 분석하고자 한다.

II. 이론적 배경

2.1 항법장치의 정렬오차

항체가 출발전에 자신의 자세를 확인하기 위하여 수행하는 초기정렬의 정밀도는 항체의 항법오차에 중요한 역할을 한다. 이 초기정렬의 정밀도에 영향을 주는 중요한 요소는 자이로의 바이어스와 랜덤웍 등이다.

바이어스에 의한 정렬오차 $\delta\theta_{aB}$는 식(1)과 같이 정렬시간과 무관하게 일정한 크기의 정렬오차를 유발한다[1].

$$\delta\theta_{aB} = \frac{B}{\Omega_e \cos La} \tag{1}$$

여기서 B는 자이로 바이어스 안정도, Ω_e는 지구 자전각속도, 그리고 La는 위도이다.

랜덤웍에 의한 정렬오차 $\delta\theta_{aRW}$는 식(2)와 같이 정렬시간과 관계가 있으며, 정렬시간이 짧을수록 크게 증가하는 특성이 있다[1].

$$\delta\theta_{aRW} = \frac{RW}{\sqrt{T}\,\Omega_e \cos La} \tag{2}$$

여기서 $\delta\theta_{aRW}$은 자이로 랜덤웍에 의한 정렬오차, RW는 랜덤웍, 그리고 T는 정렬시간이다.

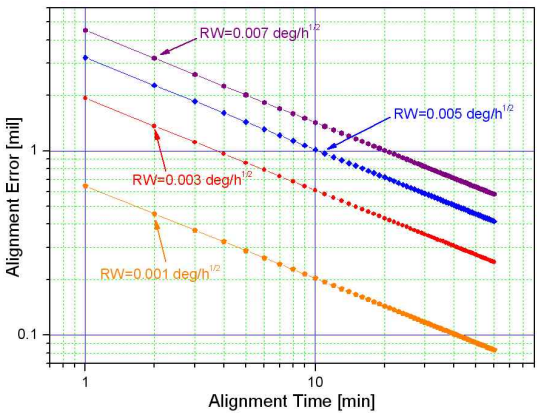


Fig. 1. Functional relation between alignment error and alignment time for several random walks

Fig. 1은 랜덤웍과 정렬시간에 의한 오차로서 그림에서 알 수 있는 바와 같이 0.005deg/h$^{1/2}$의 랜덤웍을 가진 자이로를 적용한 항법장치로 약 1[mil]의 정밀도를 가지는 정렬을 수행하기 위해서는 약 10분 동안 정렬을 수행해야 한다.

이를 보완하기 위하여 위성항법을 이용한 운항중 정렬이나, 정렬시간이 없을 경우를 대비하여 정렬을 미리해서 저장했다가 사용하는 저장정렬 등의 정렬방법이 있으나 이들은 정밀도 및 신뢰성이 작다. 그러므로 짧은 시간에 정렬을 마치고 임무에 착수하기 위해서는 자이로의 랜덤웍을 줄이는 것이 필수적이다.

2.2 링레이저 자이로의 랜덤웍

항법장치의 정렬 정밀도에 큰 영향을 미치는 링레이저 자이로 랜덤웍은 레이저의 양자잡음(quantum noise)과 lock-in을 보상하기 위한 공진기 각진동에 의하여 유발된다. 양자잡음에 의한 랜덤웍은 링레이저 공진기 내에서의 자발방출(spontaneous emission)에 의하여 발생하며, 다음 식(3)과 같은 관계를 갖는다[7].

$$RW_s = \frac{1}{8\pi A}\sqrt{\frac{h\lambda c^3}{P_{out}} T_r \cdot loss} \sim \frac{1}{L^2} \qquad (3)$$

여기서 RW_s는 레이저 잡음에 의한 랜덤웍, h는 플랑크 상수, λ는 레이저 파장, c는 광속, P_{out}는 레이저 출력, T_r은 공진기를 구성하는 반사경의 투과율, $loss$는 공진기의 손실율, A는 링레이저 폐광경로가 이루는 면적, 그리고 L은 폐광로의 길이이다.

이론적인 계산에 의하면 양자잡음에 의한 랜덤웍은 길이가 약 30cm인 레이저 공진기를 가진 링레이저 자이로에서 약 10^{-4}deg/h$^{1/2}$ 정도이다.

한편, 공진기 각진동에 의한 랜덤웍은 자이로에 입력되는 각속도가 임계값 이하로 작을 때 입력 각속도를 측정하지 못하는 lock-in 현상을 제거하기 위하여 공진기에 비교적 큰 정현파 각진동을 인가함으로써 발생된다. Lock-in은 식(4)와 같이 주로 링레이저 공진기를 구성하는 반사경의 산란에 의하여 유발되는데 공진기의 길이가 길어지면 그 크기가 감소된다.

$$\Omega_L = \frac{c\lambda^2\sqrt{r_{sc}}}{32\sqrt{2}\,\pi d_s A} \sim \frac{1}{L^2} \qquad (4)$$

여기서 Ω_L는 lock-in, r_{sc}는 반사경의 산란, 그리고, d_s는 공진기 내부에서 빔의 직경이다.

이 lock-in을 제거하기 위하여 인가하는 정현파 각진동은 자이로 케이스에 구속된 진동으로써 바이어스 오차를 유발하지는 않으나 각속도가 lock-in 임계값보다 작은 각진동 회귀점을 주기적으로 통과하게 만든다. 이 각진동 회귀점에서 유발되는 오차는 식(5)와 같이 최댓값 $\psi_{error\max}$를 갖는 주기함수이다[2].

$$\psi_{error\max} = \pm\sqrt{\frac{8\pi A}{\lambda L\Omega_d f_d}}\,\Omega_L \qquad (5)$$

여기서 Ω_d는 각진동 진폭이고, f_d는 각진동 주파수이다.

공진기 각진동에 의한 랜덤웍 RW_d은 각진동 회귀점에서 발생하는 오차들의 통계적인 값으로서 식(6)과 같이 표현 된다.

$$RW_d = \Omega_L\sqrt{\frac{\lambda L}{8\pi A\Omega_d}} \sim \frac{1}{L^{5/2}} \qquad (6)$$

그리고 공진기 각진동에 의한 랜덤웍은 식(6)에서 알 수 있는 바와 같이 lock-in에 비례하므로 반사경의 산란율에 따라 달라지는데, Fig. 2에서 보는바와 같이 공진기의 길이가 30cm인 링레이저 자이로에서 반사경의 산란율이 약 10ppm인 경우에 약 0.001deg/h$^{1/2}$ 까지 도달 할 수 있다. 이것은 레이저 잡음에 의한 랜덤웍에 비하여 상당히 큰 값이므로 링레이저 자이로 및 항법장치 설계에 있어서 중요하게 고려해야 할 성능계수이다. 특히 관성항법장치의 크기를 줄이기 위하여 링레이저 자이로의 크기를 감소시키면 그에 따라서 랜덤웍이 증가하게 된다. 예를 들어서 링레이저 공진기의 광경로 길이를 약 1/2배로 감

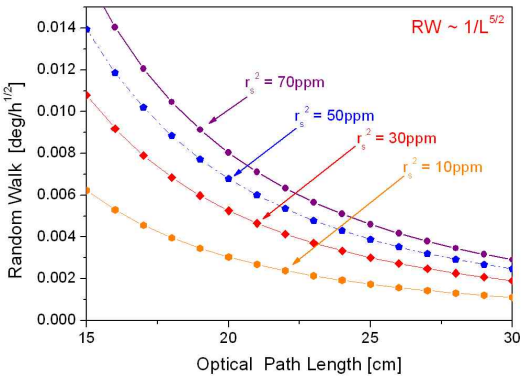


Fig. 2. Functional relation between the random walk and optical path length for several mirror scattering

소시키는 경우에 공진기 각진동에 의한 랜덤웍은 약 5.7배로 증가하게 된다. 그러므로 이 랜덤웍에 의하여 적용체계의 운항을 위한 초기정렬에 보다 긴 시간을 요하는 문제가 발생한다.

III. Lock-in오차 보상 개념

링레이저 공진기에 외부 각속도 또는 공진기 각진동에 의한 각속도가 입력되면 공진기를 서로 반대방향으로 진행하는 빛의 주파수가 달라지므로, 두 빛을 서로 간섭시키면 맥놀이 현상이 발생한다. 사냑위상은 이 맥놀이 신호의 누적위상으로서, 링레이저 공진기에 인가된 각속도가 영인 공진기 각진동 회귀점을 통과하는 동안에 Fig. 3과 같은 오차가 발생한다. 그 오차는 매우 작으나 1초에 약 800회(각진동 주파수:약 400Hz)이므로 그 오차가 누적되면 무시할 수 없는 오차로 작용한다.

1980년대 후반과 1990년대에 걸쳐서 링레이저 자이로 전문 연구기관에서는 lock-in을 제거하기 위한 방법과 lock-in에 의한 오차를 찾아내어 보상하는 방법 등을 제시한바가 있다. Lock-in에 의한 오차를 찾아내어 보상하는 lock-in오차 보상방법은 각진동 회귀점에서의 맥놀이 신호 위상과 주기를 정밀하게 측정함으로서 오차를 계산하여 보상하는 방법이다[5-6].

공진기 각진동 회귀점에서 사냑위상의 오차가 발생하면 Fig. 4와 같이 자이로 출력인 맥놀이신호($\sin\psi$)의 위상에 영향을 미친다. 그러므로 Fig. 5와 같이 각진동 회귀점 전후에서 맥놀이신호가 영점을 통과하는 시각을 측정하여 비교함으로서 오차를 예측한다.

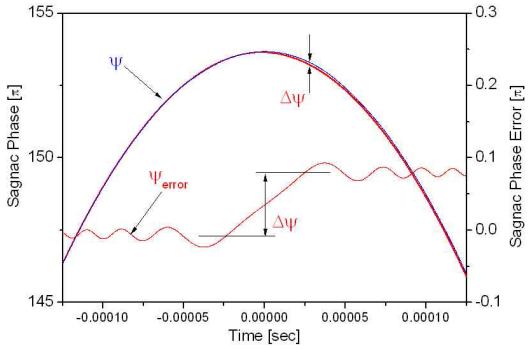


Fig. 3. Sagnac phase ψ and Sagnac phase error ψ_{error} at a dither turnaround

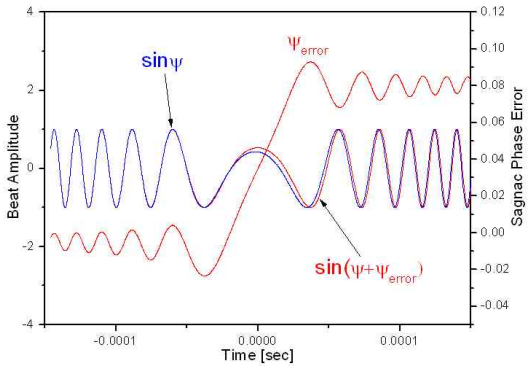


Fig. 4. Sagnac phase error ψ_{error} and beat signal $\sin(\psi)$ change at a dither turnaround

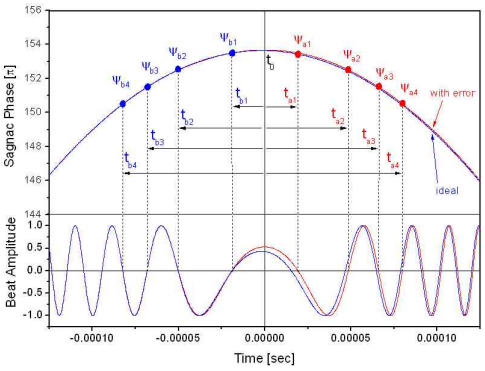


Fig. 5. Relation between Sagnac phase and beat signal zero crossing time at a dither turnaround

이를 위해서는 먼저 공진기 각진동의 회귀점 전후에서의 맥놀이 신호가 영점을 통과하는 시간을 정확히 측정해야 하며, 이를 이용하여 각진동

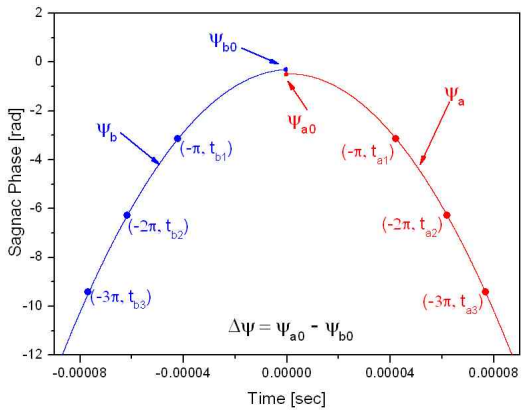


Fig. 6. Sagnac phase error calculated by curve fitting at a dither turnaround

회귀점 전후의 차이를 비교할 수 있어야 한다. Fig. 6은 그중 한 방법으로서 각진동 회귀점 전후의 사냑함수를 곡선접합하여 비교하는 lock-in 오차 보상방법을 표현한 것이며, 그 과정은 다음과 같다.

먼저 각진동 회귀점을 통과하기 전에 사냑위상이 π의 정수배가 되는 시점 3~4개를 측정한다. 그 시점을 t_{b1}, t_{b2}, t_{b3}라고 하고 다음과 같은 함수를 가정한 곡선접합으로 각진동 회귀점을 통과하기 직전의 위상 ψ_b를 계산한다.

$$\psi_b(t) = \psi_{b0} + c_{b1}\psi + c_{b2}\psi^2 \qquad (7)$$

그리고 이 곡선접합에 의하여 각진동 회귀점에서의 위상 ψ_{b0}를 계산한다.

같은 방법으로 각진동 회귀점을 통과한 직후의 위상 ψ_a를 계산하기 위하여 각진동 회귀점을 통과한 후의 사냑위상이 π의 정수배가 되는 시점 3~4개를 측정한다. 그 시점을 t_{a1}, t_{a2}, t_{a3}라고 하고 다음과 같은 함수를 가정하여 곡선을 접합한다.

$$\psi_a(t) = \psi_{a0} + c_{a1}\psi + c_{a2}\psi^2 \qquad (8)$$

그리고 이 곡선접합에 의하여 각진동 회귀점에서의 위상 ψ_{a0}를 계산한다.

이 방법에 의하여 다음 식(9)와 같이 각진동 회귀점에서 발생하는 오차를 산출할 수 있다.

$$\Delta\psi = \psi_{a0} - \psi_{b0} \qquad (9)$$

Lock-in오차 보상방법은 각진동 회귀점을 통과할 때마다 자이로 출력에서 이 오차를 보정해 줌으로써 랜덤웍을 줄일 수 있다는 것이다. 여기서 lock-in오차 보상정확도는 t_{b1}, t_{b2}, t_{b3}와 t_{a1}, t_{a2}, t_{a3}의 측정 정확도와 관계있음을 알 수 있다.

IV. 적용 가능성 및 적용효과 분석

4.1 적용 가능성에 대한 이론적인 분석

본 절에서는 lock-in오차 보상방법에 대한 이론적인 적용 가능성을 분석하고자 링레이저 자이로 모델링을 이용한 시뮬레이션을 하였다.

먼저 식(10)과 같이 링레이저 자이로 모델 방정식으로부터 사냑위상을 계산하였다[2].

$$\frac{\dot{\psi}}{2\pi} = Scf[\Omega + \Omega_d(\xi) - \Omega_L \sin(\psi + \beta)] \qquad (10)$$

여기서 Scf는 환산계수, Ω는 입력각속도, $\Omega_d(\xi)$는 불규칙적으로 변화하는 각진동 진폭, 그리고 β는 레이저 초기 위상이다.

여기서 공진기 각진동 진폭은 평균진폭이 약 100deg/sec이고 진동수가 약 400Hz인 정현파 진동을 가정하고 각진동 매 주기마다 진폭을 불규칙으로 변화시키는 각진동 잡음을 인가하였다.

자이로의 출력은 맥놀이파 형태로 출력되며, 수십 MHz의 분해능으로 이 맥놀이파의 영점 통과시점 t_{b1}, t_{b2}, t_{b3}와 t_{a1}, t_{a2}, t_{a3}을 산출하도록 하였다.

Fig. 7은 자이로 모델링에 의한 맥놀파 출력과 이 파동의 영점 통과시점을 계산하는 과정을 그림으로 나타내었다. 실제 자이로의 출력인 맥놀이파의 영점 통과시점을 H/W에서 측정하기 위해서는 영점 통과 시점을 확인하는 샘플링 주파수가 요구되는데, 그림에서 보는 바와 같이 샘플링 주파수에 따라서 실제 영점 통과 시간과 측정된 영점 통과시간이 달라질 수 있다.

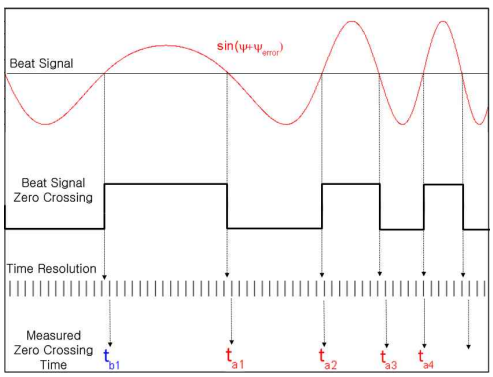


Fig. 7. Picture for understanding the beat signal zero crossing time measuring process

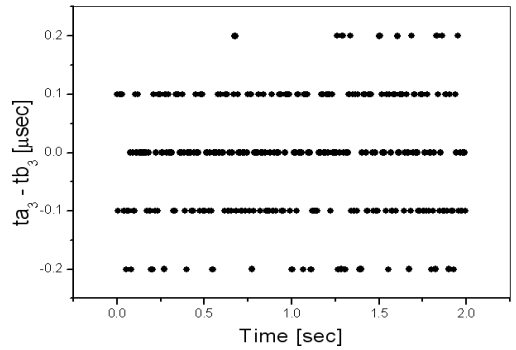
Fig. 8은 샘플링 주파수에 의한 분해능의 예로써, 샘플링 주파수가 10MHz인 경우와 100MHz인 경우의 분해능을 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 각진동 회귀점 전후의 맥놀이파 주기 측정오차는 샘플링 주파수와 관계된다.

Lock-in에 의하여 발생하는 이론적인 오차는 식(11)과 같이 계산하였다.

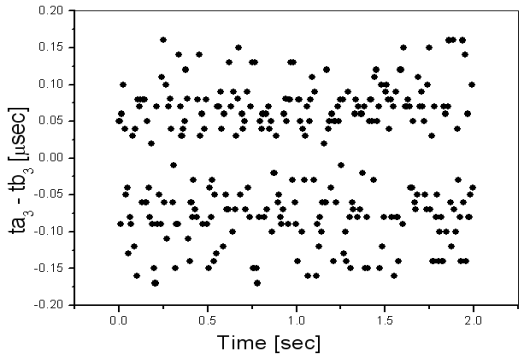
$$\psi_{error} = \psi_L(t) - \psi(t) \tag{11}$$

여기서 $\psi(t)$는 lock-in이 없는 이상적인 경우의 사냑위상이고, $\psi_L(t)$는 lock-in이 Ω_L일 때의 사냑위상이다.

그리고 lock-in오차 보상방법을 위하여 공진기 각진동 회귀점에서 발생하는 lock-in에 의한 오차를 산출하고, 그 크기를 이론적인 크기와 비교하였다. 이때 맥놀이파의 영점통과 시간 샘플링 주파수는 H/W 구현이 가능할 것으로 판단되는 약 100MHz와, 맥놀이 신호의 잡음 등에 의하여 분해능이 감소될 것을 고려하여 약 20MHz를 적용하였다.



a) with 10MHz sampling resolution



b) with 100MHz sampling resolution

Fig. 8. Example of estimated beat signal period differences between those of before and after dither turnarounds

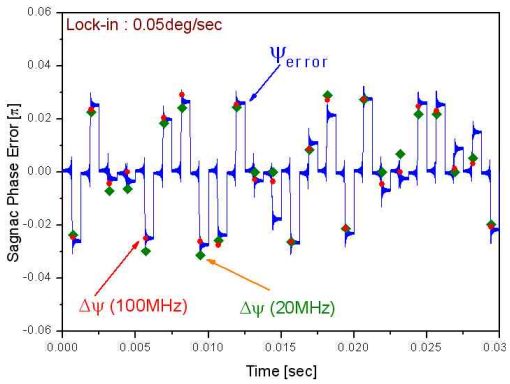


Fig. 9. Comparison between the estimated error by lock-in error estimation at the dither turnaround(point) and theoretical error (line) (circular point: 100MHz, squire point : 20MHz)

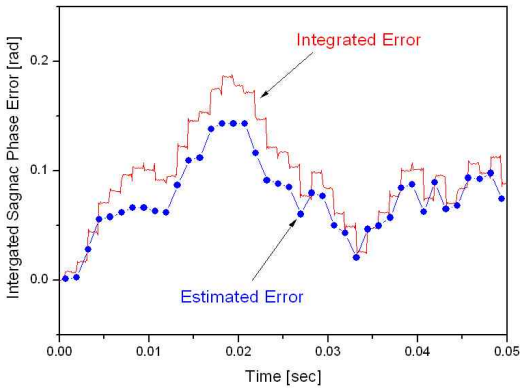


Fig. 10. Comparison between the integrated error by lock-in error estimation at the dither turnaround(point) and integrated error by theory(line)

Fig. 9는 lock-in이 0.05deg/sec인 자이로를 가정하여 식(11)을 이용하여 계산된 이론적인 오차의 크기와 20MHz및 100MHz의 샘플링 주파수로 맥놀이파의 영점통과 시점을 검출하고 식(9)를 이용하여 예측한 오차의 크기를 비교한 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 맥놀이파의 영점통과 시점을 약 20MHz 이상으로 검출하고 곡선접합에 의하여 오차를 계산하면 자이로의 실제오차를 예측할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 자이로 동작중에 누적되는 오차를 이론적으로 계산한 결과와 lock-in오차보상방법에 의하여 추정한 값을 비교한 그림이다. 그림에서 보는바와 같이 공진기 각진동 회귀점에서 발생하는 오차가 누적되면 출력이 불규칙적으로 변

화되는 랜덤웍이 발생함을 알 수 있다. 그리고 이 오차는 lock-in오차 보상방법에 의하여 예측될 수 있음을 알 수 있다.

이상에서 보는 바와 같이 실제 자이로에서 측정 가능한 변수인 맥놀이파의 영점통과 시점을 검출하고 곡선 접합에 의하여 오차를 계산하면 자이로의 각진동 회귀점에서 발생하는 오차를 추정할 수 있으므로 lock-in오차 보상방법은 적용 가능성이 있음을 알 수 있다.

4.2 적용 효과 분석

본 절에서는 앞 절에서 연구한 lock-in오차 보상방법을 적용하지 않는 경우와 적용하는 경우의 자이로 출력에서의 랜덤웍을 비교함으로써 이 방법의 적용효과를 확인하고자 한다. 이를 위하여 lock-in오차 계산방법을 공진기 각진동 주기마다 연속적으로 적용하여 오차를 실시간으로 보상한 자이로 데이터와 보상하지 않은 자이로 데이터를 비교 분석하였다.

Fig. 11은 각진동 회귀점에서 산출된 오차를 실시간으로 보상해주기 전과 후의 자이로 오차 누적 특성을 비교한 그림이다. 그림에서 보는바와 같이 lock-in오차 보상방법에 의하여 자이로 출력의 불규칙성이 감소됨을 알 수 있다.

실제 자이로에서 lock-in오차 보상방법의 적용효과를 분석하기 위하여, 광경로 길이가 15cm, 28cm, 그리고 34cm 자이로에 대하여, 시뮬레이션을 통하여 발생시킨 자이로 출력의 랜덤웍과 여기에 lock-in오차 보상방법을 적용했을 때의 랜덤웍을 비교하였다. 각각의 경우에 대하여 맥놀이 신호의 영점통과 시점을 20MHz와 100MHz의 정밀도로 검출하는 두 가지 경우를 가정하여 비교하였다.

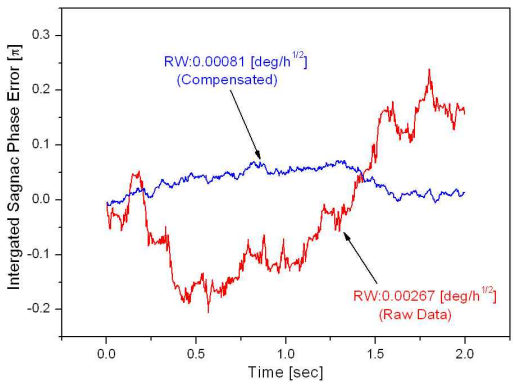
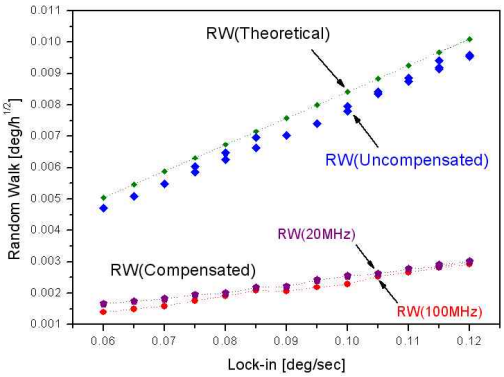
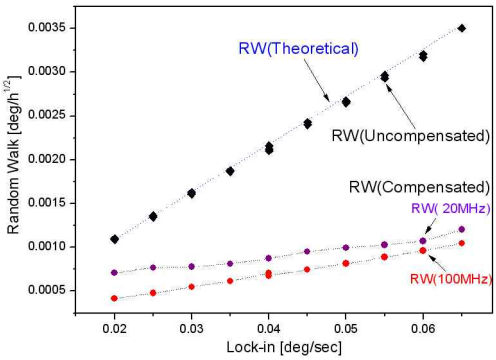


Fig. 11. Comparison between the integrated angle behavior of the un-compensated output and the compensated output

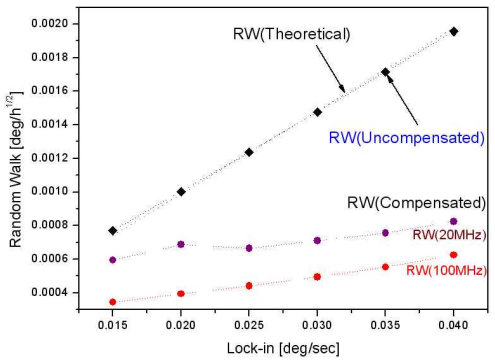
시뮬레이션 결과는 Fig. 12에 표현하였으며, 그 결과에서 알 수 있는바와 같이 lock-in오차 보상방법을 적용함으로서 적용하기 전보다 랜덤웍이 약 1/2~1/3로 감소될 수 있음을 알 수 있다. 이 효과는 항법장치의 운항을 위한 초기정렬 시간을 1/4~1/9로 감소시킬 수 있음을 의미한다.



a) optical path length : 15cm



b) optical path length : 28cm



c) optical path length : 34cm

Fig. 12. Comparison of random walk of compensated output with that of un-compensated output for various optical path lengths

V. 결 론

기존에 제안된 lock-in오차 보상방법의 이론적인 가능성을 검증하기 위하여 링레이저 자이로의 모델링을 통하여 맥놀이 출력을 발생시키고, 공진기 각진동 회귀점 전후에서 맥놀이 신호주기를 산출한 후에 곡선접합에 의하여 각진동 회귀점에서 발생하는 오차를 추산하는 시뮬레이션 방법을 구현하였다. 맥놀이 주기를 산출하는데 있어서 샘플링 분해능은 H/W 구현이 가능할 것으로 판단되는 약 100MHz와 맥놀이 신호의 잡음 등에 의하여 분해능이 감소될 것을 고려하여 약 20MHz를 적용하였다. 각진동 회귀점에서 발생하는 오차를 추산하여 이론적인 값과 비교한 결과 샘플링 분해능이 약 20MHz 이상이면 추정된 오차값이 이론적인 값과 유사함을 알 수 있었다.

또한 lock-in오차 보상방법의 적용효과를 분석하기 위하여, 이 오차계산 방법을 공진기 각진동 주기마다 연속적으로 적용하고, 그 계산된 오차값을 실시간으로 보상하도록 구현하여 출력되는 자이로 데이터를 분석하였다. 그 결과 약 20MHz 이상의 샘플링 주파수로 맥놀이 주기를 검출하고 lock-in오차를 추정하여 보상하는 방법에 의하여 랜덤웍이 약 1/2~1/3로 감소될 수 있음을 알 수 있었다.

그러므로 이 lock-in오차 보상방법을 적용할 경우에 항법장치의 초기정렬 시간을 1/4~1/9로 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1) M. M. Kuritsky, M.S. Goldstein "Inertial Navigation", *Proceedings of the IEEE*, vol.71, No.10, October 1983, pp. 1156-1176.

2) J. E. Killpatrick, "Laser Gyro Dither Random Noise", *SPIE* voll.487 Physics of Ring Laser Gyros, 1984, pp. 85-93.

3) R.A. Patterson, B. Ljung and D.A. Smith, "Reduction of Beam Coupling in a Ring Laser Gyro by Doppler Shifting of Scattered Light", SPIE vol.487 Physics of Ring Laser Gyros, 1984. pp. 78-84.

4) R. Rodloff, "A Laser Gyro with Optimized Resonator Geometry", *IEEE Journal of Quantum Eletronics,* Vol. QE-23, No.4 Apr, 1987, pp. 438-445.

5) D. A. Tazates, J. G. Mark, A. M. Calabassas, "Apparatus and Method for Correcting Ring Laser Gyroscope Phase Error at Turn Around", US Patent, No 5004344, Apr. 1991.

6) W. L. Lim, "Apparatus for Laser Gyro", US Patent, No 4605307, Aug. 1986.

7) Terry A. Dorschner, "Laser gyro at quantum limit", *IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. QE-16, No12, Dec* 1980, pp. 1376-1379.