

레이저 관성항법장치에서 링레이저 자이로 디더 운동에 의한 가속도계 공진이 자체 정렬/항법 성능에 미치는 영향 분석

김천중^{*,1)} · 임경아¹⁾ · 김선아¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 미사일연구원 6부

Self-Alignment/Navigation Performance Analysis in the Accelerometer Resonance State Generated by Dither Motion of Ring Laser Gyroscope in Laser Inertial Navigation System

Cheonjoong Kim^{*,1)} · Kyungah Lim¹⁾ · Seonah Kim¹⁾

¹⁾ *The Missile Research Institute, Agency for Defense Development, Korea*

(Received 5 May 2021 / Revised 23 June 2021 / Accepted 8 October 2021)

Abstract

In this paper, we theoretically analyzed the self-alignment/navigation performance in the accelerometer resonance state generated by dither motion of ring laser gyroscope in LINS and verified it through simulation. As a result of analysis, it is confirmed that the amplitude of the accelerometer measurement amplified in the accelerometer resonance state is decreased in the process of sampling per the navigation calculation period and that frequency is changed by the aliasing effect too. It was also analysed that the attitude error in self-alignment is determined by the amplitude/frequency of the accelerometer measurement, the gain of the self-alignment loop, and the velocity and position error in the navigation is determined by the amplitude/frequency/phase error of the accelerometer measurement. This analysis and simulation results show that the self-alignment and navigation performance is not degraded only when the amplification factor of the accelerometer measurement in the accelerometer resonance state is 3 or less

Key Words : Accelerometer Resonance(가속도계 공진), Laser Inertial Navigation(레이저 관성항법장치), Dither Motion(디더 운동), Ring Laser Gyroscope(링레이저 자이로스코프), Self-Alignment/Navigation(자체 정렬/항법)

1. 서론

관성항법장치는 관성 좌표계 기준으로 비행체에서 정의된 동체 좌표계에서 비행체의 3축 회전 운동을 감지하여 각속도를 측정하는 자이로와 비행체의 3축 병진 운동을 감지하여 가속도를 측정하는 가속도계로

* Corresponding author, E-mail: kcj3651@add.re.kr

Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

구성되어 있다^[3,4]. 광학식 자이로의 일종인 링레이저 자이로(Ring Laser Gyroscope : 이하 RLG)를 탑재한 관성항법장치를 일반적으로 레이저 관성항법장치(Laser Inertial Navigation System : 이하 LINS)라 한다^[4]. RLG는 공진기에 장착된 반사경의 흡수/산란 등의 특성으로 인하여 어느 한정된 작은 값 이하의 회전운동을 측정하지 못하는 영역이 존재하며 이를 lock-in 이라 한다^[3,4]. RLG에서 lock-in을 제거하는 다양한 방법이 제시되었으나 일반적으로 RLG 공진기에 lock-in 크기의 약 천배 이상의 진폭을 가지는 정현파 회전운동을 공진기에 연속적으로 인가하는 방법이 널리 사용되며 이 때 인가된 정현파 회전운동을 디더 운동(Dither Motion)이라 한다^[3,4]. 이와 같이 RLG 내부에서 디더 운동을 공진기에 인가하게 되면 RLG는 외부에서 인가되는 회전운동이 없어도 lock-in 영역에서 머무르는 시간이 최소화 된다. 따라서 lock-in 영역 이하의 작은 각운동이 외부에서 인가되면 디더 운동과 더해져서 큰 각운동이 공진기에 항상 인가되며 공진기에서 출력된 각 운동에서 디더 운동을 제거하게 되면 lock-in 영역 이하의 작은 각운동의 측정이 가능하게 된다^[3,4].

앞에서 언급한 바와 같이 디더 운동은 정현파 회전운동이므로 일정한 주파수를 가지게 된다. 일반적으로 공진기의 크기에 따라 주파수가 다르며 공진기 내부의 광경로 길이가 약 30 cm인 RLG의 경우, 약 100 deg/sec의 평균진폭과 약 350~450 Hz의 주파수를 갖는 디더 운동을 RLG 공진기에 인가하여 lock-in 영역에서 동작하는 시간을 최소화함으로써 lock-in에 의한 오차를 최소화한다^[4]. RLG의 공진기 크기가 작아지는 경우에는 공진기 내부에서 발생한 레이저의 전과 길이가 짧아져 반사경에서 반사되는 레이저의 양이 증가하게 되므로 반사경 산란에 대한 영향 또한 증가하게 되므로 lock-in 영역이 더 커지게 된다. 이러한 경우 lock-in 영역에 머무는 시간을 최소화하기 위해 디더 운동 주파수를 증가시켜야 한다. 공진기 내부의 광경로 길이가 16 cm인 RLG의 경우 디더 운동의 진폭은 광경로 길이 30 cm RLG 보다 증가시켜 설정하고 디더 운동 주파수도 약 500 Hz 이상으로 증가시켜 사용한다. 광경로 약 6 cm인 RLG의 경우 문헌상에 기술된 내용에 의하면 약 1000 Hz 부근에서 설정되는 것으로 알려져 있다^[5]. RLG의 각 축의 디더 운동 주파수는 축 간 간섭의 최소화를 위해 약 30~50 Hz 정도 이격시켜 선정한다^[4,6].

앞서 기술한 바와 같이 LINS에 탑재되는 RLG의 디더 운동 주파수의 경우 광경로 길이에 의해 350~1000 Hz의 넓은 분포를 가진다. 이와 같이 높은 운동 주파수는 일반적으로 400 Hz 이상의 고유진동 주파수를 가지도록 설계되는 가속도계 주파수와 중첩되며 이러한 경우 가속도계에 공진이 발생하여 가속도계 출력이 증폭되는 현상이 발생하게 된다. 본 논문에서는 디더 운동에 의한 가속도계 공진으로 인해 증폭된 가속도 측정값이 LINS 정렬/항법 성능에 미치는 영향을 이론적으로 분석하고 실험을 통하여 검증한 내용을 기술하였다.

2. 디더 운동에 의한 가속도계 출력 모델링

LINS 관성센서 조립체에 탑재되는 3축의 RLG 디더 주파수는 광경로 길이가 약 30 cm RLG의 경우 400 Hz를 기준으로 축간 상호 간섭을 최소화하기 위하여 약 30~50 Hz 정도 차이를 두고 축 선정을 한다. 선정된 3축 RLG의 디더 주파수는 대략 370, 400, 430 Hz가 되며 3개 모두 3축 방향으로 관성센서 조립체에 조립된다. 가속도계도 RLG와 마찬가지로 3축 방향으로 관성센서 조립체에 장착되므로 3축의 RLG 디더 운동에 의한 정현파 진동은 RLG 및 가속도계에 영향을 미치게 된다.

이론적으로 3축 가속도계의 관성센서 조립체의 좌표계 원점과 3축 RLG의 회전 운동 좌표계의 원점이 일치한다고 가정하면 RLG 디더 운동은 회전운동이므로 가속도계에선 가속도가 측정되지 않게 된다. 그러나 관성센서 조립체에 RLG 및 가속도계 조립시에 가속도계 측정 중심점과 관성센서 조립체의 좌표계 원점을 일치시키는 것은 현실적으로 불가능하다. 그러므로 가속도계 측정 중심점은 좌표계 원점과 일정한 거리로 이격되게 되며 이격된 거리와 디더 운동에 의해 발생하는 회전 운동에 의한 영향이 가속도계 측정치에 포함되게 된다. 이를 증명하기 위하여 LINS에서 출력되는 실제 측정치를 분석해보면 장착축에 대한 디더 운동이 다른 두 축에 비하여 진폭이 작게나마 측정된다. 이와 같은 사실을 근거로 하여 디더 운동에 대한 가속도계 측정치를 모델링하면 식 (1)과 같다^[6]. 식 (1)에서 f_x, f_y, f_z 는 x, y, z축 RLG의 디더 주파수, θ_{ij} 는 디더 운동의 위상 오차, A_{ij} 는 i 축 가속도계가 j 축 RLG 디더 운동에 의해 영향 받는 가속도 진

폭을 의미한다. A_{ij} 의 크기는 관성센서 조립체의 좌표계 중심점에서부터 이격된 가속도계 측정 중심점까지의 거리의 제곱에 비례하고 디더 운동에 의해 발생하는 각속도의 크기에 비례한다. 디더 운동의 위상 오차는 정렬 및 항법 모드드 진입시 디더 운동과 동기가 맞지 않아 발생하는 것으로 관성항법장치 매 운용마다 다르게 나타난다.

$$\begin{aligned}
 A_x &= A_{x_x} \sin(2\pi f_x t + \theta_{x_x}) + A_{x_y} \sin(2\pi f_y t + \theta_{x_y}) \\
 &\quad + A_{x_z} \sin(2\pi f_z t + \theta_{x_z}) \\
 A_y &= A_{y_x} \sin(2\pi f_x t + \theta_{y_x}) + A_{y_y} \sin(2\pi f_y t + \theta_{y_y}) \\
 &\quad + A_{y_z} \sin(2\pi f_z t + \theta_{y_z}) \\
 A_z &= A_{z_x} \sin(2\pi f_x t + \theta_{z_x}) + A_{z_y} \sin(2\pi f_y t + \theta_{z_y}) \\
 &\quad + A_{z_z} \sin(2\pi f_z t + \theta_{z_z})
 \end{aligned} \tag{1}$$

식 (1)과 같이 이론적/실험적으로 분석된 디더 운동에 의한 가속도계 측정치 모델은 LINS의 고유 특성이며 LINS가 정상동작하는 경우에는 항상 가속도계 측정치에 식 (1)의 가속도 측정치가 항상 포함됨을 의미한다.

3. 가속도계 공진 주파수 분석

일반적으로 가속도계의 공진 주파수 분석은 이론적인 분석 외에 실험적으로 분석하는 방법이 있다. 이론적인 방법은 기구적인 해석을 통하여 수행되나 궁극적으로 실험적으로 증명하는 과정이 필요하기 때문에 본 논문에서는 실험적인 방법을 통하여 가속도계 공진 주파수 분석결과를 제시한다.

실험적 방법으로 가속도계 공진 주파수를 찾는 방법은 일정한 진폭을 가지는 정현파 가속도의 주파수를 변경하면서 가속도계에 인가한 후 가속도계에서 출력되는 가속도 측정치의 진폭을 확인하여 가장 큰 진폭이 계속되는 주파수를 가속도계 공진 주파수로 설정하는 방법이다. 이러한 실험적 방법을 통하여 가속도계 공진 주파수를 탐색한 결과를 그림으로 나타내면 Fig. 1과 같다.

Fig. 1에서 x축은 가속도계에 가해지는 주파수 변화 시간으로 1초마다 약 2.2 Hz 주파수가 상승됨을 의미하고 y축은 가속도계에서 출력되는 가속도 측정치를 의미한다. Fig. 1에서 나타난 바와 같이 시간에 따라 주파수를 증가하며 1 g 정현파 진동을 인가한 경우

약 500 Hz 부근에서 가장 크게 가속도계 출력이 증폭되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 Fig. 1의 가속도계는 500 Hz의 공진 주파수를 가지는 것으로 확인되었다. LINS에 Fig. 1의 특성을 가지는 가속도계를 탑재하는 경우 RLG의 디더 주파수인 350~1000 Hz 대역에 가속도계 공진 주파수가 존재하게 된다. 그러므로 광경로 길이가 16 cm RLG를 적용하는 LINS에 Fig. 1의 특성을 가지는 가속도계를 탑재하는 경우 디더 운동에 의해 식 (1)의 가속도 측정치가 Fig. 1과 같이 500 Hz 부근에서 2.5배 이상 증폭될 가능성이 존재함을 의미한다.

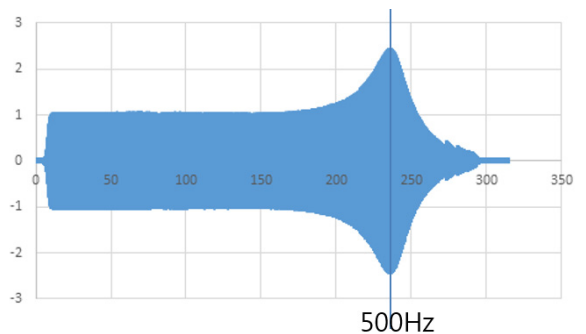


Fig. 1. Analysis result of accelerometer resonance frequency

4. 시스템 레벨에서의 가속도계 공진 영향성 분석

본 절에서는 LINS 시스템 레벨에서의 가속도계 공진 영향성 분석결과를 제시한다. 시스템 레벨 분석이란 3축의 RLG/가속도계가 관성센서 조립체에 장착된 후 항법컴퓨터를 통하여 3축의 관성센서 측정치를 획득하여 분석한다는 의미이다.

시스템 레벨에서의 가속도계 공진 영향성 분석을 위하여 Fig. 1의 공진 주파수에서 2.5배 증폭률 특성을 가지는 가속도계와 564(x축), 526(y축), 485(z축) Hz의 디더 운동 주파수를 가지는 RLG를 관성항법장치에 장착하고 정지 상태에서 x, z축 진폭 변화를 확인한 결과를 그림으로 나타내면 Fig. 2, 4와 같다. 가속도계 출력은 디더 운동을 손실 없이 획득하기 위하여 2400 Hz로 측정하였다. Fig. 2, 4에서 붉은 색으로 나타난 가속도 측정치는 가속도계 공진 주파수가 디더 운동 주파수 영역을 벗어나는 제품을 사용한 경우

이고 검정색은 Fig. 1에서 보여준 바와 같이 500 Hz 부근의 공진 주파수를 가지는 가속도계를 장착하여 시험한 결과를 나타낸다. Fig. 1에서 단폭레벨 공진 주파수 분석 시험을 통하여 구한 결과와 동일하게 디더 운동 주파수가 가속도계 공진 주파수 영역 부근에 존재하는 경우 가속도계 출력이 증폭되는 현상이 발생하는 것을 Fig. 2, 4에서 볼 수 있다. Fig. 1과 같이 정확하게 가속도계 공진 주파수와 디더 운동 주파수가 겹치는 경우 2.5배 가까이 출력이 증폭될 것으로 판단된다. 그러나 Fig. 2, 4에서 1.5, 1.25의 증폭률을 보이는 것은 디더 운동 주파수와 가속도계 공진 주파수가 정확하게 일치하지 않아서 발생한 문제이다.

Fig. 2, 4에 대한 주파수 특성 분석을 위하여 FFT (Fast Fourier Transform) 수행결과를 그림으로 나타내면 Fig. 3, 5과 같다. Fig. 3, 5은 x, z축의 RLG 디더 운동 주파수가 2400 Hz로 획득된 x, z축의 가속도계 측정치를 FFT하면 식별될 수 있음을 보여주는 결과이며 또한 3축의 디더 운동이 모든 축의 가속도계에서 측정됨을 의미하는 것으로 식 (1)이 타당함을 증명하는 결과이다. Fig. 3, 5에서 주목해야 할 또 다른 사실은 가속도계 축별 측정치에서 디더 운동 주파수에 해당하는 가속도 측정치의 진폭이 모두 다르다는 점이다. Fig. 3의 x축 가속도계의 경우 485(z축), 526 Hz(y축) 성분의 진폭이, Fig. 5의 z축 가속도계의 경우 564(x축), 526 Hz(y축) 성분의 진폭이 크게 나온 것으로 확인된다. 이러한 사실은 가속도계 축과 동일한 RLG 축의 디더 운동은 가속도계에게 회전운동만을 인가하기 때문에 가속도계 측정치에 RLG 디더 운동 주파수 성분이 작게 측정되는 것으로 확인되었다.

x축의 가속도계 출력의 FFT 결과인 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 x축 가속도계 출력은 500 Hz 부근에서 15~25 Hz 이격된 주파수 성분인 485(z축), 526 Hz(y축) 디더 운동 주파수 출력이 주요 성분이므로 약 1.5배의 증폭률을 가지나 가속도계 공진 주파수와 64 Hz 이격된 564 Hz(x축) 디더 운동 주파수 출력이 주요 성분인 Fig. 4의 z축 가속도계 출력은 약 1.25배의 증폭률을 가지는 것으로 확인되었다. 이러한 사실은 공진 주파수와 이격 주파수가 커질수록 증폭률이 감소하는 것을 보여주는 것으로 Fig. 1의 가속도계 공진 주파수 분석 결과와 동일한 결과를 나타내고 있으므로 이러한 사실은 Fig. 1의 가속도계 공진 주파수 분석 결과가 정확함을 증명하는 결과이다.

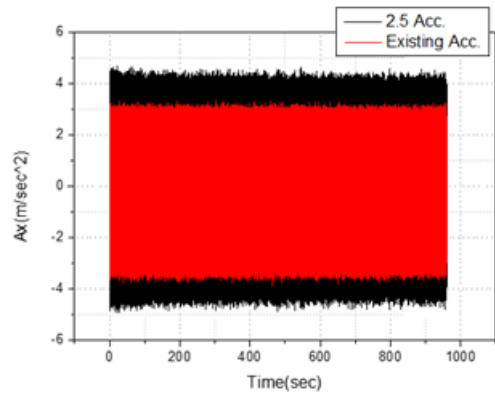


Fig. 2. Comparison of x-axis accelerometer outputs in LINS

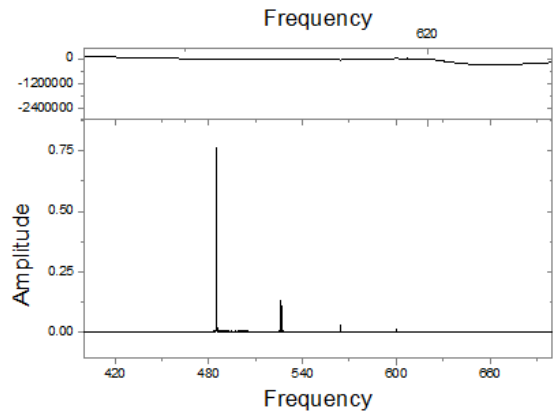


Fig. 3. FFT Result of x-axis accelerometer outputs in LINS

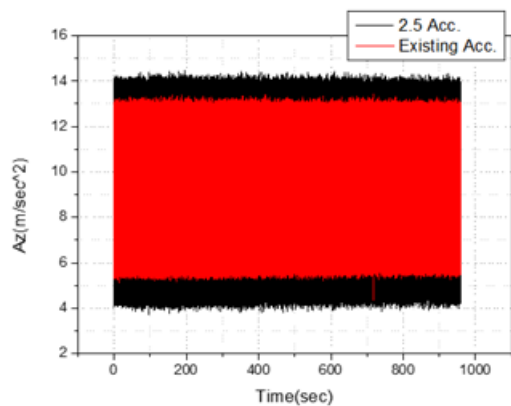


Fig. 4. Comparison of z-axis accelerometer outputs in LINS

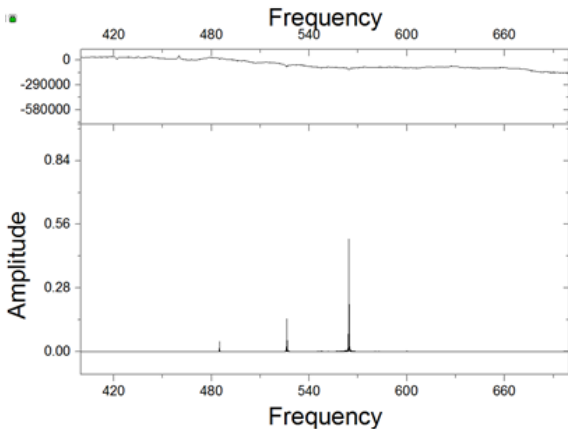


Fig. 5. FFT result of z-axis accelerometer outputs in LINS

디더 운동에 의해 발생한 가속도계 공진이 LINS 항법 성능에 미치는 영향을 확인하기 위해서 실제 항법 계산 주기에 해당하는 데이터로의 변환이 필요하다. 일반적으로 2400 Hz와 같은 고속의 데이터 샘플링은 디더 운동 주파수의 왜곡을 피하거나 동적오차를 보상하기 위해 필요한 것으로 실제 항법 계산을 위해서는 그보다 낮은 샘플링 주파수가 필요하다²⁾. 본 논문에서는 항법 계산 주기를 200 Hz로 가정하여 분석을 수행하였다. 2400 Hz 데이터의 200 Hz로의 변환은 2400 Hz로 샘플링된 12개 데이터를 더하여 200 Hz로 변환하여 항법 계산에 사용한다고 가정하여 이를 식으로 유도하면 식 (2)와 같다. 식 (2)에서 δT 는 고속의 데이터 샘플링 주기인 $\frac{1}{2400}$ 초를, ΔT 는 항법 계산 주기로 0.005 초를, w_i 및 A_{ij} 는 식 (1)에 나타난 바와 같이 i 축의 디더 운동 주파수 및 i, j 축의 진폭을 의미한다. 해석의 편의성을 위해 식 (2)에서는 식 (1)의 각 축별 디더 운동의 위상오차인 θ_{ij} 는 없다고 가정하였다.

$$\begin{aligned}
 A_{200\text{Hz}}(t) &= \frac{1}{\Delta T} \int_t^{t+\Delta T} A_{ij} \sin(w_i t) dt \\
 &= \frac{A_{ij}}{\Delta T w_i} [(1 - \cos(w_i \Delta T)) \cos(w_i t) \\
 &\quad + \sin(w_i \Delta T) \sin(w_i t)] \quad (2)
 \end{aligned}$$

식 (2)에서 디더 운동 주파수 및 진폭, 항법 계산 주기는 상수이므로 2400 Hz 데이터를 200 Hz 항법 계

산 주기로 변환하는 과정에서의 진폭 감쇄율을 결정하는 성분인 코사인 성분은 식 (3), 사인 성분은 식 (4)와 같다.

$$\frac{1 - \cos(w_i \Delta T)}{\Delta T w_i} \quad (3)$$

$$\frac{\sin(w_i \Delta T)}{\Delta T w_i} \quad (4)$$

식 (3), (4)의 특성을 상세하게 분석하기 위하여 디더 운동 주파수인 w_i 를 350 Hz에서 700 Hz까지 가변하면서 계산하여 그림으로 나타내면 Fig. 6, 7와 같다. Fig. 6, 7은 항법 계산 주기를 200 Hz로 가정했을 때의 진폭 감쇄율이 디더 운동 주파수에 따라 달라지는 것을 보여주고 있다.

식 (3), (4) 및 Fig. 6, 7이 정확하게 유도되었는지를 검증하기 위하여 LINS에서 출력된 3축의 2400 Hz 가속도계 측정치를 후처리하여 200 Hz 데이터로 변환한 결과를 상호 비교하여 그림으로 나타내면 Fig. 8~10와 같다. Fig. 8~10는 2400 Hz 데이터를 200 Hz로 변환하면 진폭이 감소함을 보여주고 있다. Fig. 8~10의 진폭 감쇄율이 식 (3), (4)에서 계산된 진폭 감쇄율과 동일한지 검증하기 위하여 Fig. 3에 나타난 바와 같이 x축 가속도계 측정치의 주요 디더 운동 주파수인 485 Hz를 식 (3), (4)에 대입하여 진폭 감쇄율을 계산하였다. 계산 결과 코사인 성분은 0.12, 사인 성분은 0.03이 이론적으로 감쇄하는 것으로 나타났으며 이러한 경우 최소 진폭 감쇄율을 계산하면 x축의 이론적인 진폭 감쇄율은 약 0.128이 된다. Fig. 8의 시험을 통하여 측정된 x축 가속도계 출력의 진폭 감쇄율을 계산하면 가속도계 측정치 진폭이 4.3에서 0.5로 감쇄되어 약 0.12 배의 감쇄율을 보이는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 이론적으로 계산한 결과와 거의 동일한 결과로 이론적으로 분석한 결과가 타당함을 증명하는 것이다. 감쇄율에서 약간의 차이가 발생하는 것은 x축의 경우 Fig. 3에 나타난 바와 같이 485 Hz(z축) 성분의 디더 운동이 주요하게 영향을 미치나 526 Hz(y축) 성분의 디더 운동도 존재한다. 그러나 이론적으로 계산한 감쇄율은 485 Hz(z축) 성분만이 존재한다고 가정하여 계산했기 때문에 발생한 것으로 해석되었다.

Fig. 8의 x축과 마찬가지로 Fig. 9, 10의 y, z축에 대하여 동일하게 분석을 한 결과 y축의 경우 약 0.11배

z축의 경우 중력 가속도 성분을 제외한 진폭 감쇄율은 약 0.08배의 감쇄율을 보이는 것으로 나타났다. 식 (3), (4)를 이용하여 526, 564 Hz에 대한 이론적인 진폭 감쇄율을 구하면 코사인 성분은 각각 0.1, 0.03 사인 성분은 각각 -0.044, -0.05로 계산되며 이러한 경우 최소 진폭 감쇄율을 계산하면 각각 약 0.11, 0.06이 된다. Fig. 9의 y축의 경우 485, 564 Hz 성분이 동시에 존재하나 485 Hz 성분이 주요 성분이므로 이론적인 진폭 감쇄율인 0.128에 근접할 것으로 판단되었으며 Fig. 9는 이와 같은 결과를 보여주고 있다.

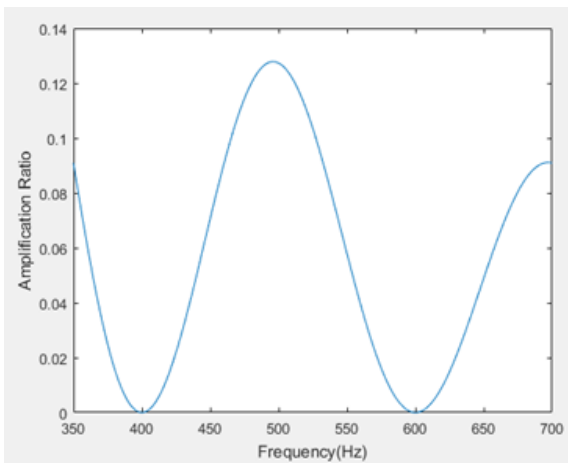


Fig. 6. Amplitude amplification factor of cosine components Eq. (3) for frequency change

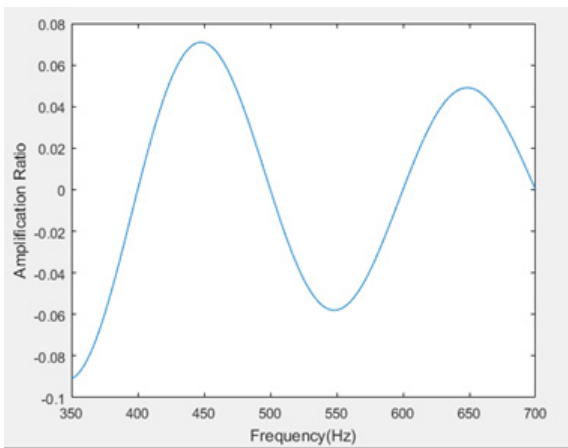


Fig. 7. Amplitude amplification factor of sine components Eq. (4) for frequency change

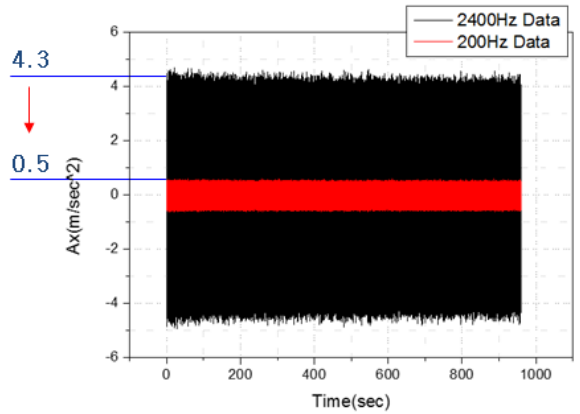


Fig. 8. Amplitude comparison of 2400/200 Hz x-axis accelerometer outputs

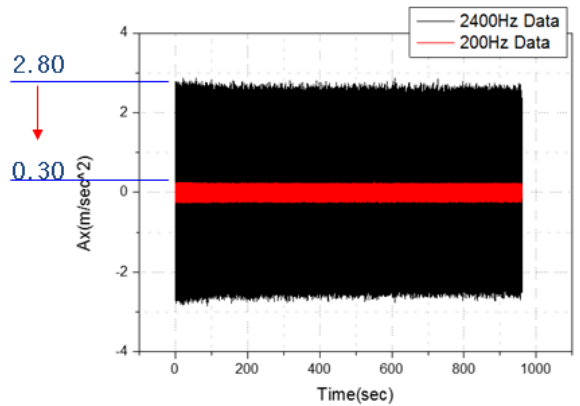


Fig. 9. Amplitude comparison of 2400/200 Hz y-axis accelerometer outputs

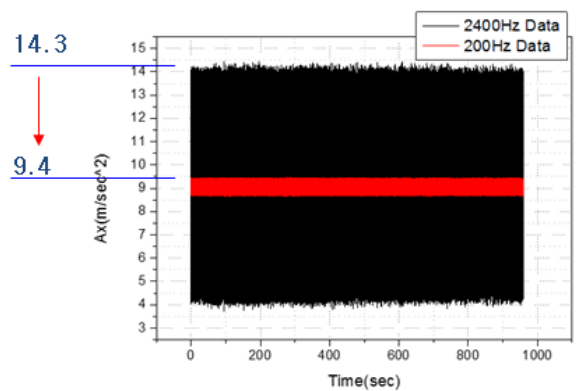


Fig. 10. Amplitude comparison of 2400/200 Hz z-axis accelerometer outputs

Fig. 10의 z축의 경우 Fig. 5에 나타난 바와 같이 526, 564 Hz 성분이 동시에 존재하나 564 Hz 성분이 주요 성분이므로 이론적인 진폭 감쇄율인 0.06에 근접할 것으로 판단되었으며 Fig. 10에서 중력가속도 성분을 제외하고 순수한 진폭 변화만을 가정한 진폭 감쇄율을 계산하면 이론적인 수치와 유사함을 보여주고 있다. 이와 같이 이론적으로 계산한 진폭 감쇄율 계산 결과와 시험적으로 측정된 결과가 유사하게 나온 것으로 판단할 때 본 논문의 해석결과는 정확하다고 할 수 있다. 이러한 결과를 근거로 판단할 때 디더 운동에 의한 가속도계 공진이 가속도계 출력을 증폭시키더라도 항법 계산 주기로 데이터를 변환하는 과정에서 진폭 감쇄율이 크기 때문에 항법성능에는 미치는 영향은 크게 감소할 것으로 확인되었다.

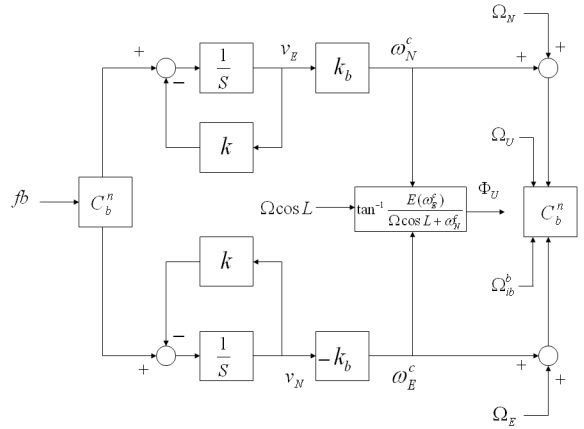


Fig. 11. Alignment loop using the 2nd order controller

5. 가속도계 공진에 의한 정렬/항법 성능 분석

본 절에서는 디더 운동에 의한 가속도계 공진으로 증폭된 가속도 측정치가 관성항법장치의 자체 정렬 및 항법에 미치는 영향을 이론적으로 분석한 내용을 기술한다.

5.1 가속도계 공진에 의한 자체 정렬 성능 분석

디더 운동에 의해 발생하는 정현파 가속도 측정치에 대한 2차 고정이득 방식의 자체 정렬에 대한 성능분석 결과는 참고문헌 [6]에서 자세히 기술되어 있어 본 논문에서는 가속도계 공진과 관련된 내용만을 참고문헌 [6]의 해석 결과를 기반으로 추가 기술한다.

일반적으로 2차 제어기를 이용한 고정이득 방식의 정렬루프는 Fig. 11과 같이 나타낼 수 있다^[6,8,9]. 그림에서 나타난 바와 같이 항법좌표계에서 수평축 가속도계 측정치 f^b 가 영이 되도록 2차 제어기를 이용하여 제어신호(ω_E^c, ω_N^c)를 생성하고 이를 이용하여 동체 좌표계(b-frame)와 항법좌표계(n-frame) 사이의 좌표 변환 행렬 C_b^n 을 계산하여 수평축 정렬을 수행하며 수직축 자세는 생성된 제어신호를 이용하여 계산한다. Fig. 11에서 k, k_b 는 정렬루프 계수이며 v_E, v_N 는 항법좌표계에서의 속도, Ω 는 지구회전 각속도, L 는 위도, $\Omega_E, \Omega_N, \Omega_U$ 는 항법좌표계에서의 각속도, Ω_{ib}^b 는 RLG에서 출력되는 각속도를 의미한다.

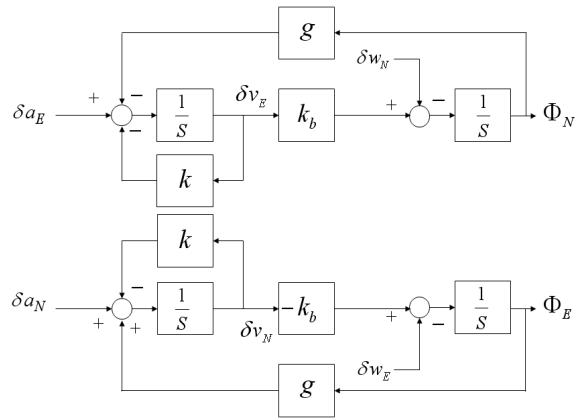


Fig. 12. Error propagation characteristic of alignment loop using the 2nd order controller

정렬루프 해석을 위해서는 정렬루프에 대한 오차방정식이 요구되며 이를 그림으로 나타내면 Fig. 12와 같고 이를 식으로 나타내면 식 (5), (6)와 같다^[6]. 식 (5), (6)에서 g 는 중력 가속도, $\delta a_E, \delta a_N$ 은 가속도 오차, $\delta \omega_E, \delta \omega_N$ 은 RLG 오차, $\delta v_E, \delta v_N$ 은 속도오차, Φ_E, Φ_N 은 자세오차를 의미한다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\Phi}_E \\ \dot{\delta v}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -k_b \\ g & -k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_E \\ \delta v_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\delta \omega_E(t) \\ \delta a_N(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\Phi}_N \\ \dot{\delta v}_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & k_b \\ -g & -k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_N \\ \delta v_E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\delta \omega_N(t) \\ \delta a_E(t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

식 (5), (6)에서 디더 운동에 의한 정현파 가속도 측정치에 의한 자체 정렬 성능 분석만을 본 논문에서는 수행하기 때문에 RLG 오차는 없다고 가정하고 식 (5), (6)를 라플라스 변환을 통하여 정리하면 식 (7) ~ (10)과 같다⁶⁾. 식 (7) ~ (10)에서 $\delta a_E(s)$, $\delta a_N(s)$ 는 라플라스 변환된 E, N축 정현파 가속도 측정치를 의미한다.

$$\delta v_E(s) = \frac{s\delta a_E(s)}{s^2 + ks + k_b g} \quad (7)$$

$$\delta v_N(s) = \frac{s\delta a_N(s)}{s^2 + ks + k_b g} \quad (8)$$

$$\Phi_E(s) = \frac{-k_b \delta a_N(s)}{s^2 + ks + k_b g} \quad (9)$$

$$\Phi_N(s) = \frac{k_b \delta a_E(s)}{s^2 + ks + k_b g} \quad (10)$$

위 수식에서 나타난 바와 같이 정렬을 위한 2차 제어기는 가속도계 오차에 대한 속도 및 자세오차의 관계식이 2차 저역통과 필터의 구조를 나타내는 것을 확인할 수 있으며 절점 주파수(corner frequency) $w_c = \sqrt{k_b g}$ 가 되며 이는 정렬루프 설계시 설정되는 k_b 의 값에 따라 결정된다. 따라서 정렬루프 설계시 가속도계 측정치에 포함되어 있는 정현파 성분이 적절히 제거되도록 w_c 를 결정하여야 한다⁶⁾.

동체 좌표계에서 모델링된 LINS 가속도계 측정치 모델 식인 식 (1)을 항법 계산주기 ΔT 로 샘플링하는 경우에 대한 식 (2)를 좌표변환행렬을 통하여 항법좌표계로 변환하여 정리하면 식 (11)과 같이 새로운 방정식이 유도된다⁷⁾. 식 (11)은 연속 신호를 이산 신호로 만들기 위한 샘플링 이론에 의거 식 (2)을 기반으로 하여 유도되었으며 해석의 편의성을 위해서 우선은 사인 성분만이 존재한다고 가정하였다. 식 (11)에서 주파수 $\omega_{Ai}(= 2\pi f_{Ai})$ 는 디더 운동 주파수가 일반적으로 항법 계산주기보다 크기 때문에 위신호 현상(Aliasing)에 의해 식 (1)에서 나타난 디더 운동 주파수(ω)와 식 (2)의 항법 계산주기(ω_s)의 배수 주파수와의 차($\omega_{Ai} = \omega \pm i \times \omega_s$)에 의해서 생성된 주파수이다⁷⁾. 그

리고 진폭 A_i^m 은 식 (2)에서 유도된 바와 같이 디더 운동에 의해서 생성된 가속도 측정치의 진폭으로 좌표변환 및 항법 계산주기 등에 의해서 식 (3), (4)와 같이 디더 운동 주파수 별로 다른 크기를 가진다.

$$\delta a_N(t) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i^m \sin(\omega_{Ai} t) \quad (11)$$

디더 운동에 의한 정현파 가속도 측정치에 의한 정렬루프 성능 해석을 위하여 식 (11)을 (8), (9)에 대입하고 역 라플라스 변환하여 정리하면 식 (12), (13)와 같다.

$$\delta v_N(t) = A_{\delta v1} e^{\frac{-k + \sqrt{k^2 - 4k_b g}}{2} t} + A_{\delta v2} e^{\frac{-k - \sqrt{k^2 - 4k_b g}}{2} t} - \sum_{i=1}^{\infty} [\alpha_i^a \sin(\omega_{Ai} t) + \beta_i^a \cos(\omega_{Ai} t)] \quad (12)$$

$$\Phi_E(t) = A_{\Phi1} e^{\frac{-k + \sqrt{k^2 - 4k_b g}}{2} t} + A_{\Phi2} e^{\frac{-k - \sqrt{k^2 - 4k_b g}}{2} t} - \sum_{i=1}^{\infty} [a_i^a \sin(\omega_{Ai} t) + b_i^a \cos(\omega_{Ai} t)] \quad (13)$$

식 (12), (13)에서 $A_{\Phi1}$, $A_{\Phi2}$, $A_{\delta v1}$, $A_{\delta v2}$ 항은 시간이 경과함에 따라 감소되는 항으로 정상상태에서 자체 정렬 성능에 영향을 미치지 않으나 가속도계 측정치의 정현파 성분은 시간에 관계없이 계속해서 속도 및 자세 오차에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 식 (12), (13)에서 정현파 성분의 진폭을 나타내는 계수를 정리하면 아래와 같다⁶⁾.

$$a_i^a = A_i^m \frac{k_b \omega_{Ai}^2 - k_b^2 g}{(\omega_{Ai}^2 - k_b g)^2 + k^2 \omega_{Ai}^2},$$

$$b_i^a = A_i^m \frac{-k k_b \omega_{Ai}}{(\omega_{Ai}^2 - k_b g)^2 + k^2 \omega_{Ai}^2} \quad (14)$$

$$\alpha_i^a = A_i^m \frac{k \omega_{Ai}^2}{(\omega_{Ai}^2 - k_b g)^2 + k^2 \omega_{Ai}^2},$$

$$\beta_i^a = A_i^m \frac{\omega_{Ai}^3 - k_b g \omega_{Ai}}{(\omega_{Ai}^2 - k_b g)^2 + k^2 \omega_{Ai}^2} \quad (15)$$

식 (14), (15)로부터 알 수 있듯이 정렬루프에서 정현파 가속도 측정치에 의해 발생하는 속도 및 수평축 자세 오차는 식 (11)의 정현파 운동 주파수 및 진폭과 정렬루프 특성에 의하여 결정됨을 알 수 있다. 수직축 자세오차 Φ_U 는 Fig. 2에서 나타난 바와 같이 ω_E^c 의 평균값을 구하여 계산되기 때문에 식 (16)과 같이 유도된다⁶⁾.

$$\Phi_U = -\frac{k_b}{(T-T_0)\omega_N} \left[\int_{T_0}^T (A_{\delta v1} e^{\frac{-k+\sqrt{k^2-4k_b g}}{2}t} + A_{\delta v2} e^{\frac{-k-\sqrt{k^2-4k_b g}}{2}t}) dt \right] + \frac{\alpha_i^a}{\omega_{Ai}} [\cos(\omega_{Ai}T) - \cos(\omega_{Ai}T_0)] - \frac{\beta_i^a}{\omega_{Ai}} [\sin(\omega_{Ai}T) - \sin(\omega_{Ai}T_0)] \quad (16)$$

식 (16)에서 나타난 바와 같이 수직축 자세오차도 수평축과 유사하게 입력되는 식 (11)의 사인 정현파 운동 주파수 및 진폭과 정렬루프 특성에 의하여 결정됨을 알 수 있다. 식 (11)은 사인 정현파를 가정하였으나 코사인 정현파 가속도계 측정치에 대해서도 동일한 방법으로 식 (12), (13), (16)와 같은 수식의 유도가 가능하며 식 (7), (10)에 대해서도 유사한 형태로 전개가 가능하며 정렬루프의 적절한 설계를 통하여 원하는 자체 정렬 성능을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

앞에서 기술한 바를 종합하면 Fig. 11의 정렬루프에 입력되는 정현파 가속도 신호는 정렬루프 자체의 저역통과 특성에 의해 속도 및 자세 오차에 미치는 영향이 크게 감소하므로 가속도계 공진에 의해 어느 정도 진폭이 증가하여도 자체 정렬 성능이 크게 저하되지 않을 것으로 판단된다. 그러나 진폭이 크게 증가하고 Aliasing으로 인하여 식 (11)의 w_{Ai} 가 작아지는 경우 속도 및 자세오차의 증가가 예상되므로 이에 대한 허용기준은 마련해야 할 것으로 판단된다.

5.2 가속도계 공진에 의한 항법 성능 분석

본 절에서는 가속도계 공진에 의한 항법 성능을 분석하기 위하여 동체 좌표계에서 측정된 가속도 측정치에 식 (1)의 입력만이 존재한다고 가정하고 항법 방정식을 이용하여 항법 성능을 분석한 결과를 제시한다. 가속도 측정치에 식 (1)의 성분만이 존재하고 외

부 운동이 없다고 가정하면 항법방정식은 식 (17), (18)과 같이 간단하게 유도된다¹⁻³⁾. 식 (17), (18)에서 v^n 은 항법 좌표계에서의 속도, p^n 은 항법 좌표계에서의 이동거리, f^b 는 동체 좌표계에서의 가속도, C_b^n 는 동체 좌표계에서 항법 좌표계로의 좌표변환 행렬로 정지 상태라 가정하면 상수가 된다. 따라서 식 (17)에서 동체좌표계로 좌표변환된 식 (1)의 측정치는 항법 계산주기로 샘플링 하는 경우 진폭은 식 (3), (4)의 수식에 의거하여 감소되며 주파수는 식 (11)에 의거하여 w_{Ai} 로 변경되기 때문에 식 (19)과 같이 표현가능하다. 식 (17)에서 C_b^n 가 단위행렬이라 가정하면 식 (19)가 $C_b^n f^b$ 가 된다. 따라서 식 (19)를 식 (18)의 $C_b^n f^b$ 를 대신하여 대입하고 e축에 대한 속도 및 이동거리를 계산하면 식 (20), (21)과 같다. 식 (1)의 디더 운동에 의한 가속도 측정치에 의해 발생하는 속도인 식 (20)을 보면 식 (1)의 정현파 디더 운동 성분(주파수 f_i 를 가지는 항)은 정지 상태에서 속도를 발생시키는 것으로 나타났으며 정현파 성분이라서 속도를 증가시키지는 않는 것으로 나타났으나 식 (1)의 디더 운동 위상오차 θ_{ij} 가 초기 속도를 발생시키는 것으로 나타났다. 앞에서 언급한 바와 같이 실제로 관성항법장치 운용시 디더 운동 위상오차는 알 수 없기 때문에 초기 속도는 항상 발생한다고 볼 수 있다. 식 (20)에 나타난 바와 같이 디더 운동 위상 오차가 0도 혹은 180도 일 때 초기 속도가 가장 크게 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 사실은 디더 운동에 의한 가속도 공진으로 식 (19)의 진폭이 증가하면 초기 속도가 증가할 수 있음을 식 (20)은 보여주고 있다.

식 (21)의 정지 상태에서의 이동거리는 식 (20)의 속도와 동일하게 연속적으로 디더 운동에 의한 영향은 받으나 정현파 성분이라서 이동거리를 증가시키지는 않는 것으로 나타났다. 그러나 디더 운동 위상 오차에 의해 발생한 초기 속도가 계속해서 적분됨에 따라 점진적으로 이동거리는 증가하는 것으로 나타났다. 초기 위상 오차가 초기 이동거리를 발생시키는 것으로 식 (21)에 나타났으나 진폭이 무시할 정도로 매우 작은 것으로 나타났다.

$$\dot{v}^n = C_b^n f^b \quad (17)$$

$$\dot{p}^n = v^n \quad (18)$$

$$\begin{aligned}
 A_c &= A_{ce}^m \sin(2\pi f_{Ax}t + \theta_{ce}) + A_{en}^m \sin(2\pi f_{Ay}t + \theta_{en}) \quad (19) \\
 &\quad + A_{eu}^m \sin(2\pi f_{Az}t + \theta_{eu}) \\
 A_n &= A_{ne}^m \sin(2\pi f_{Ax}t + \theta_{ne}) + A_{nn}^m \sin(2\pi f_{Ay}t + \theta_{nn}) \\
 &\quad + A_{nu}^m \sin(2\pi f_{Az}t + \theta_{nu}) \\
 A_u &= A_{ue}^m \sin(2\pi f_{Ax}t + \theta_{ue}) + A_{un}^m \sin(2\pi f_{Ay}t + \theta_{un}) \\
 &\quad + A_{uu}^m \sin(2\pi f_{Az}t + \theta_{uu})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 v_c &= \frac{A_{ce}^m}{2\pi f_{Ax}} [\cos(\theta_{ce}) - \cos(2\pi f_{Ax}t + \theta_{ce})] \quad (20) \\
 &\quad + \frac{A_{en}^m}{2\pi f_{Ay}} [\cos(\theta_{en}) - \cos(2\pi f_{Ay}t + \theta_{en})] \\
 &\quad + \frac{A_{eu}^m}{2\pi f_{Az}} [\cos(\theta_{eu}) - \cos(2\pi f_{Az}t + \theta_{eu})]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 p_c &= \frac{A_{ce}^m}{2\pi f_{Ax}} [\cos(\theta_{ce})t \quad (21) \\
 &\quad + \frac{A_{ce}^m}{2\pi f_{Ax}} [\sin(\theta_{ce}) - \sin(2\pi f_{Ax}t + \theta_{ce})]] \\
 &\quad + \frac{A_{en}^m}{2\pi f_y} [\cos(\theta_{en})t \\
 &\quad + \frac{A_{en}^m}{2\pi f_{Ay}} [\sin(\theta_{en}) - \sin(2\pi f_{Ay}t + \theta_{en})]] \\
 &\quad + \frac{A_{eu}^m}{2\pi f_{Az}} [\cos(\theta_{eu})t \\
 &\quad + \frac{A_{eu}^m}{2\pi f_{Az}} [\sin(\theta_{eu}) - \sin(2\pi f_{Az}t + \theta_{eu})]]
 \end{aligned}$$

식 (20), (21)의 근거로 판단할 때 디더 운동에 의한 정현파 가속도 측정치는 정지 상태에서 디더 운동 위상 오차(θ_{ij})에 의해 속도 및 이동거리 오차가 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 디더 운동에 의한 가속도계 공진으로 정현파 가속도 측정치의 진폭이 증가하고 w_{Ai} 가 감소하게 되면 속도 및 이동거리 오차도 같이 증가하므로 이에 대한 허용기준은 마련해야 할 것으로 판단된다.

6. 시뮬레이션 결과

본 절에서는 5절에서 기술한 디더 운동에 의한 가속도계 공진이 정렬/항법에 미치는 영향에 대하여 이론적인 분석결과와 타당성을 검증하기 위해 수행한 시뮬레이션 결과를 제시한다. 시뮬레이션을 위한 디더

운동은 축별 상호 간섭이 없다고 가정하여 식 (1)을 참조하여 축별 가속도계 측정치를 모델링하면 식 (22)와 같다. 식 (22)에서 가속도계 공진에 의한 증폭을 모사하기 위하여 증폭계수 α 를 Table 1과 같이 1~6까지 증가시키는 4가지 경우를 가정하였으며 축별 디더 운동 주파수는 370, 430, 460 Hz로 가정하고 진폭은 Fig. 10을 참조하여 1.5 g(14.7 m/sec²)로 설정하였다.

$$\begin{aligned}
 A_x &= \alpha \times 1.5g \times \sin(2\pi \times 370 \times t) \\
 A_y &= \alpha \times 1.5g \times \sin(2\pi \times 430 \times t) \quad (22) \\
 A_z &= \alpha \times 1.5g \times \sin(2\pi \times 460 \times t)
 \end{aligned}$$

Table 1. Amplification factor of acceleration amplitude for simulation

Case	α
Case1	6
Case2	4
Case3	2
Case4	1

(22)를 식 (2)에 의해서 항법 계산주기로 변환하게 되면 식 (3), (4)에 의해서 진폭이 감쇄하게 되는데 이를 디더 운동 주파수 별로 계산하면 370 Hz에서 각각 0.035, -0.0696이 되며 430 Hz에서는 각각 0.0305, 0.0599가 된다. 따라서 식 (3), (4)에 의거 디더 운동 주파수가 370 Hz인 경우의 진폭 감쇄율은 0.078이고 430 Hz에서는 0.067이 된다. 따라서 식 (22)의 수평축 성분에 대하여 식 (2)를 이용하여 항법 계산주기로 변환하고 이를 식 (11)과 같이 나타내는 경우 진폭 A_i^m 은 식 (22)의 진폭에 진폭 감쇄율을 곱하여 구하고, 주파수 w_{Ai} 는 Aliasing에 의거 항법 계산주기의 배수에 해당하는 주파수와 디더 운동 주파수의 차에 해당하는 주파수 신호 중에 가장 낮은 주파수를 선정하여 모델링하면 식 (23)과 같다.

$$\begin{aligned}
 A_x &= 0.078 \times \alpha \times 1.5g \times \sin(2\pi \times 30 \times t) \\
 A_y &= 0.067 \times \alpha \times 1.5g \times \sin(2\pi \times 30 \times t) \quad (23)
 \end{aligned}$$

식 (23)의 입력 신호에 대하여 Fig. 11의 개략 자체 정렬은 60초간 수행되며 이때의 절점 주파수 $w_c(w_c =$

$\sqrt{k_b g}$ 는 2 Hz로 이후 정밀 자체 정렬에서는 0.5 Hz로 설정하였으며 방위각은 250초부터 계산하여 300초까지 정렬을 수행하는 것으로 정렬루프를 구성하였다. 따라서 개략 자체 정렬 60초까지 정렬이득 k , k_b 는 각각 2, 0.41이고 이후에는 0.5, 0.0255가 된다. 자체 정렬의 속도 및 자세오차의 진폭을 결정하는 식 (16), (17), (19)에서 식 (23)의 ω_{Ai} 이 30 Hz이므로 $\omega_{Ai} \gg k_b g$ 의 가정이 성립하게 된다. 그러므로 식 (14), (15)를 다시 쓰면 식 (24), (25)과 같다.

$$\alpha_i^a = A_i^m \frac{k_b}{\omega_{Ai}^2}, \quad \beta_i^a = A_i^m \frac{-k k_b}{\omega_{Ai}^3} \quad (24)$$

$$\alpha_i^a = A_i^m \frac{k}{\omega_{Ai}^2}, \quad \beta_i^a = A_i^m \frac{1}{\omega_{Ai}} \quad (25)$$

식 (23)의 진폭과 식 (24)을 이용하여 개략 자체 정렬에서 구한 자세오차의 진폭을 이론적으로 계산하면 식 (23)의 A_x , A_y 에 영향을 받는 롤 각은 Table 1의 증폭 계수 α 가 6인 경우 각각 0.0045 deg, 0.0039 deg가 된다. 정밀 자체 정렬에서는 식 (24), (25)에 의거 절점 주파수가 작아지므로 진폭이 개략 자체 정렬 대비하여 약 $\frac{1}{16}$ 로 감소할 것으로 판단된다. 그리고 방위각 오차는 식 (25)을 식 (16)에 대입하여 계산이 가능하나 식 (16)에서 나타난 바와 같이 정현파 운동의 주기와 일치하도록 방위각을 출력하는 경우 영의 값을 가지는 것으로 나타났다. 본 논문의 정렬 루프는 방위각을 5초 평균의 제어신호를 이용하여 계산하기 때문에 방위각 오차는 매우 작은 값을 가질 것으로 판단된다⁶⁾.

지금까지의 이론적인 분석 결과에 대한 타당성을 확인하기 위하여 Table 1의 가속도계 공진에 의한 정현파 가속도 측정치의 증폭을 가정한 4가지 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였으며 롤, 피치 및 방위각을 그림으로 나타내면 Fig. 13~15과 같다. 그림에서 나타난 바와 같이 Table 1의 Case1에 대하여 개략 자체 정렬인 경우에 대하여 이론적으로 계산된 자세오차 진폭과 시뮬레이션 결과가 동일한 특성을 보이며 Table 1의 증폭률에 따라 Fig. 13~15 진폭이 감소하는 것을 확인하였으며 이러한 결과는 본 논문에서 분석한 내용이 정확함을 보여주는 결과이다. 또한 정밀 자체 정렬에서 자세 오차의 진폭이 $\frac{1}{16}$ 로 감소함을 확

인하였으며 방위각 오차도 이론적으로 예측된 바와 같이 매우 작게 발생함을 Fig. 15은 보여주고 있다.

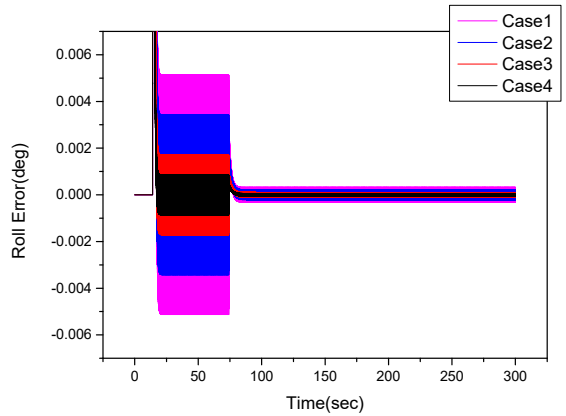


Fig. 13. Roll angle(deg)

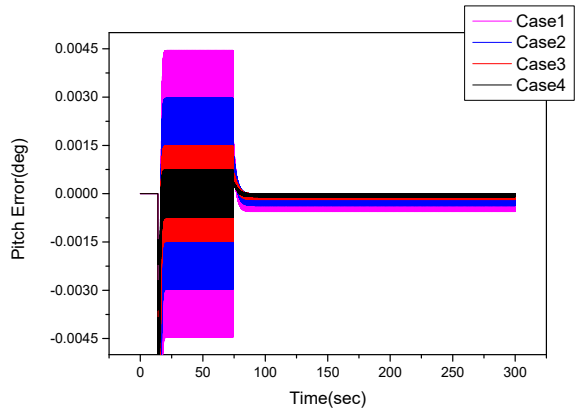


Fig. 14. Pitch angle(deg)

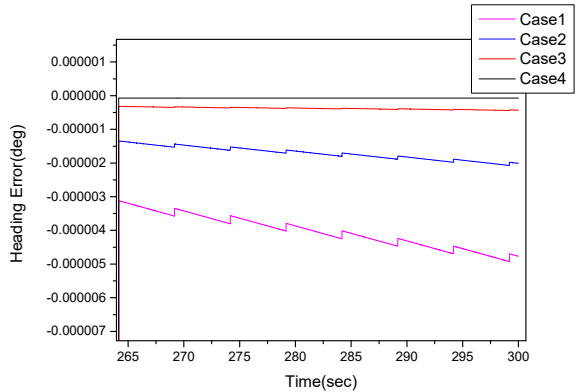


Fig. 15. Heading angle(deg)

Fig. 13에서 70~70.3초 구간을 확대하여 그림으로 나타내면 Fig. 16과 같다. Fig. 16은 Aliasing에 의해 자세오차의 주파수가 30 Hz로 공진함을 보여주고 있으며 Table 1의 증폭률에 따라 자세오차의 진폭이 증가함을 보여주고 있으며 이러한 결과는 본 논문의 해석 결과가 정확함을 증명하는 결과이다.

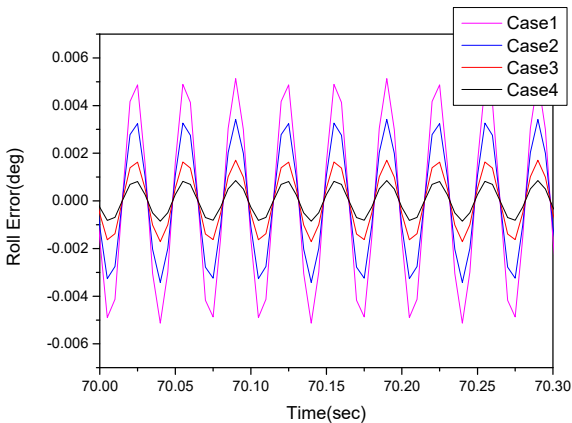


Fig. 16. Roll angle during 70.0~70.3 sec

가속도계 공진에 의한 항법 성능을 확인하기 위하여 식 (22)의 입력이 존재하는 경우를 가정하여 600초간 순수항법을 수행하는 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 수직축 속도 및 고도는 정확한 고도로 안정화되었다고 가정하였다. Table 1의 4가지 경우의 가속도계 측정치에 대한 속도 및 이동거리를 그림으로 나타내면 Fig. 17~21과 같다. Fig. 17~18의 속도는 식 (20)에서 나타난 바와 같이 디더 운동 위상 오차에 의해 발생하며 진폭은 식 (23)의 가속도 측정치 진폭에 의해 결정됨을 확인하였다. Table 1의 Case1에 대한 이론적인 진폭은 0.0366 m/sec이며 디더 운동 위상 오차에 의한 진폭과 더해져서 최종 Fig. 17~18의 속도가 발생하는 것을 식 (20)은 보여주고 있다. Fig. 17~18에 나타난 바와 같이 이론적으로 계산된 진폭과 시뮬레이션 결과가 일치하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 사실을 기반으로 식 (23)의 x축 가속도계 측정치는 Fig. 17의 e축 속도 오차를 발생시키며 e축의 위상 오차는 115도로 나타났으며 n축 속도 오차를 발생시키는 식 (23)의 y축 가속도계 측정치의 위상 오차는 0도로 확인되었다. 축 별 위상 오차가 다르게 나타나는 것은 식 (22)와 같이 축 별 디더 운동 주파수가 다르기 때문에 항법 모드(mode) 진입 시점에 따라 위상 오차

가 다르게 나타나는 것을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. Fig. 19은 0.3초까지의 n축 속도 오차를 확대한 그림으로 식 (23)에 나타난 바와 같이 디더 운동 주파수가 30 Hz이고 Table 1의 증폭률에 따라서 속도의 크기가 달라지는 것을 보여주고 있다.

식 (23)의 가속도계 측정치에 대한 이동거리는 식 (21)에 나타난 바와 같이 디더 운동 위상 오차에 의해 발생하는 속도 오차가 적분되어 나타나는 것으로 나타났다. Fig. 18의 Case1에 대하여 위상 오차에 의해 발생하는 속도가 약 0.0366 m/sec이므로 이를 600초간 적분하면 약 22 m의 이동거리가 발생할 것으로 이론적으로 분석되며 시뮬레이션 결과 이론적으로 분석한 결과와 동일한 결과가 산출됨을 Fig. 20은 보여주고 있다. 이러한 결과를 종합해 볼 때 본 논문에서 제시한 가속도계 공진에 의한 정현파 가속도계 측정치 증폭이 정렬/항법에 미치는 영향 분석이 정확하게 되었음을 확인할 수 있다.

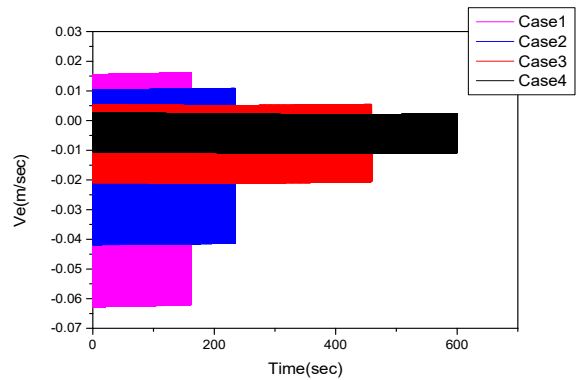


Fig. 17. e-axis velocity(m/sec)

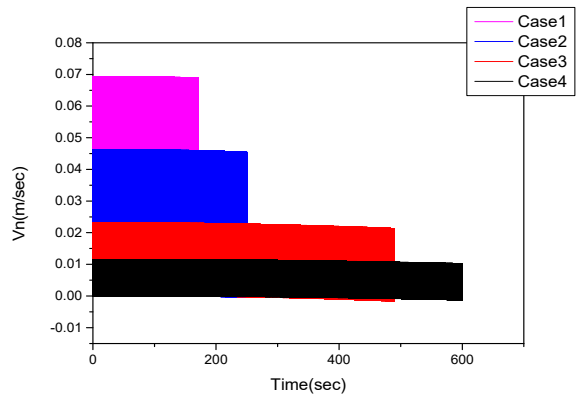


Fig. 18. n-axis velocity(m/sec)

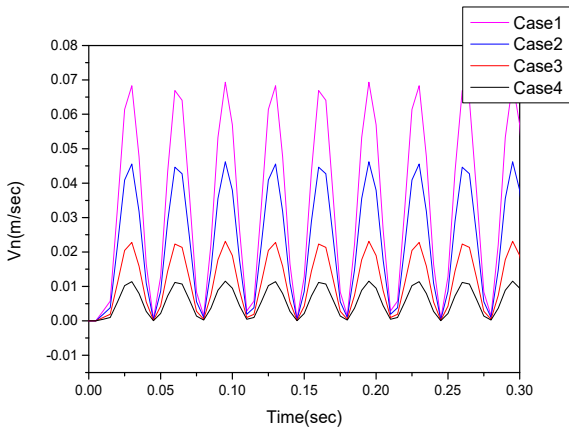


Fig. 19. n-axis velocity(m/sec) during 0.0~0.3 sec

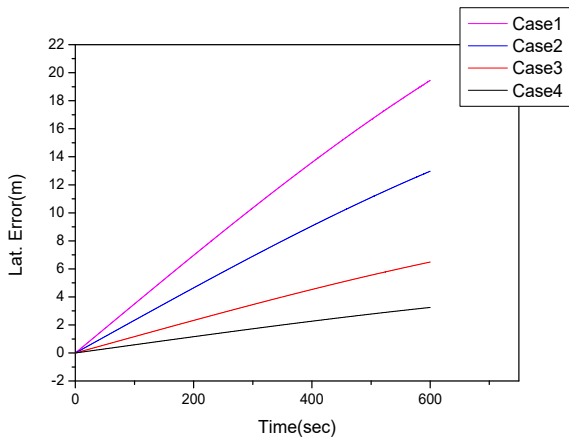


Fig. 20. Latitude error(m)

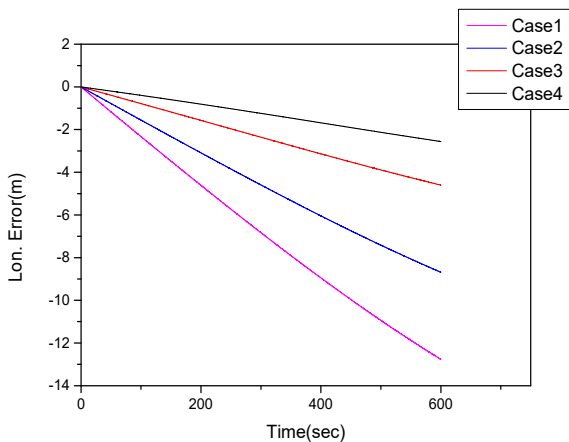


Fig. 21. Longitude error(m)

본 절의 시뮬레이션 결과는 식 (23)에 나타난 바와 같이 Aliasing 현상에 의해 변경된 디더 운동 주파수 ω_{Ai} 가 30 Hz인 경우를 가정하여 해석을 수행한 결과로 가속도계 공진에 의한 측정치 증폭이 6배까지 증가하더라도 정렬/항법 성능을 크게 저하시키지는 않을 것으로 판단된다. 그러나 현실적으로 디더 주파수는 제작 과정에서 설계 대비 많이 가변되므로 이에 대한 허용 기준으로 판단할 때 식 (23)의 주파수가 10 Hz 까지 감소할 가능성이 존재한다. 이러한 경우 식 (20), (24), (25)에 의거 자세오차는 9배 속도오차는 3배가 증가할 것으로 예상된다. 따라서 이러한 사실을 근거로 가속도계 공진에 의한 가속도 측정치 증폭률을 3 배 이하로 규제하여야 자체 정렬 및 항법 성능이 크게 저하되지 않을 것으로 분석되었다.

7. 결론

본 논문은 RLG 디더 운동에 의한 가속도계 공진이 자체 정렬 및 항법 성능에 미치는 영향을 이론적으로 분석한 결과를 제시하였다. 분석결과 가속도계 공진에 의한 가속도계 출력 증폭은 항법 계산 주기로 데이터를 변환하는 과정에서의 진폭 감쇄율로 인하여 진폭이 크게 감소하고 Aliasing 효과로 인하여 주파수가 변경되는 것으로 나타났다. 이와 같이 변경된 가속도 측정치는 자체 정렬에서는 정렬 루프의 이득과 주파수에 의해 자세 오차 진폭이 결정되고 항법에서는 초기 위상 오차 및 주파수에 의해 속도오차의 크기가 결정됨을 이론적으로 분석하였으며 시뮬레이션을 통하여 타당성을 검증하였다. 이러한 결과로 판단할 때 가속도계 공진에 의한 가속도 측정치 증폭의 허용 기준은 정상상태 대비하여 3배 이하의 증폭률을 가질 때 추가적인 자체 정렬/항법 성능의 저하가 발생하지 않을 것으로 확인되었으며 이러한 결과는 레이저 관성항법 장치에 탑재될 가속도계 선정에 적용될 예정이다.

References

- [1] Kenneth R. Britting, Inertial Navigation Systems Analysis, John Wiley & Sons, Inc., 1971.
- [2] D. H. Titterton and J. L. Weston, Strapdown Inertial Navigation Technology, IEE Radar, Sonar, Navigation

- and Avionics Series, 1977.
- [3] G. M. Siouris, Aerospace Avionics Systems, Academic Press, Inc., 1993.
- [4] K. Shin and T. Chung, "A Study on the Lock-in and Random Walk Characteristics by Dither Amplitude Modulation of a Ring Laser Gyroscope," Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 29, No. 1, pp. 72-80, 2001.
- [5] J. M. Oelschlaeger and L. O. Thielman, "GG1308 Ring Laser Gyro Inertial Measurement Systems - Honeywell's Low Cost Solution for Tactical Applications," IEEE Conference, pp. 528-536, 1990.
- [6] H. Kim, C. Kim and T. Lee, "Performance Analysis on the Initial Alignment of Laser Inertial Navigation System," Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 12, No. 5, pp. 622-635, Oct., 2009.
- [7] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, Discrete-Time Signal Processing, Prentice-Hall International, Inc., 1989.
- [8] Y. F. Jiang, Y. P. Lin, "Error Estimation of Ground Alignment to Arbitrary Azimuth," AIAA, 1993.
- [9] K. R. Britting, T. Palsson, "Self-Alignment Techniques for Strapdown Inertial Navigation Systems with Aircraft Application," J. Aircraft, Vol. 7, No. 4, 1968.