

레이저 관성항법장치 초기정렬 성능 분석

Performance Analysis on the Initial Alignment of Laser Inertial Navigation System

김 현 석* 김 천 중* 이 태 규*
Hyun-Seok Kim Cheon-Joong Kim Tae-Gyoo Lee

Abstract

Laser Inertial Navigation System(LINS) consists of Ring Laser Gyroscopes(RLG) and accelerometers. RLG has a lock-in region in which there is zero output for input angular rates less than about 0.1deg/sec. The lock-in region is generated by the imperfect mirrors in RLG. To avoid the lock-in region, a sinusoidal motion called dither motion is applied on RLG. Therefore this dither motion is measured by RLG/accelerometer even if at a stop state. In this situation, the performance on the initial alignment of LINS can be degraded. In this paper, we analyze the performance on the initial alignment of LINS theoretically and experimentally. Analysis results include how dither motion, the pre-filter and the corner frequency in alignment loop affects the performance on the initial alignment of LINS.

Keywords : Initial Alignment(초기 정렬), Laser Inertial Navigation System(레이저 관성항법장치), Dither Motion(디더 운동), Sinusoidal Measurement(정현파 측정치)

1. 서론

관성항법장치는 자이로 및 가속도계 등 관성 센서를 이용하여 정밀한 위치, 속도, 자세, 각속도 및 가속도 정보를 실시간 제공하는 장비로서 유도무기 및 무기 체계 자동화 목적으로 지상, 해상, 항공, 우주 분야 등 다양한 분야의 운반체에 공통으로 소요되는 핵심부품이다. 특히 관성항법장치는 GNSS(Global Navigation Satellite System)와 같은 전파항법에 비하여 별도의 외

부장비가 필요치 않고, 전파방해를 받지 않는 등의 장점이 있으므로 정밀 항법정보가 요구 되는 주요 무기 체계에서는 관성항법장치를 주 항법장치로 많이 사용하고 있다^[1~3]. 관성항법장치는 전파항법과 같이 절대 항법(absolute navigation) 방식을 이용하여 항법정보를 구하지 않고 상대항법(relative navigation) 방식을 이용하여 항법정보를 구하기 때문에 관성항법장치 운용 전에 초기 항법정보가 요구된다. 관성항법장치 초기 항법정보 중에 관성항법장치 센서 출력을 이용하여 정지 상태에서 초기 자세를 구하는 것을 초기정렬이라 하며 초기정렬 정밀도에 의하여 관성항법장치의 항법 성능이 크게 좌우되므로 초기정렬 정밀도를 높이기 위한 많은 연구가 진행되었다^[6,7].

† 2009년 4월 20일 접수~2009년 7월 31일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 김현석(hyskim77@add.re.kr)

광학식 자이로의 일종인 RLG(Ring Laser Gyroscope ; 이하 RLG)를 탑재한 관성항법장치를 일반적으로 레이저 관성항법장치(Laser Inertial Navigation System; 이하 LINS)라 한다^[2,3]. RLG는 일반적으로 내부의 레이저 공진기에 장착된 반사경의 후방산란으로 인하여 0.1 deg/sec 이하의 각속도가 측정되지 않는 lock-in 영역이 존재하기 때문에 이를 제거하기 위해서 강제로 수백 Hz 주기를 가지며 lock-in 크기의 1000배 정도의 정현파 각속도 진동을 RLG의 레이저 공진기에 가하는데 이를 Dither 운동이라 한다^[2,3]. RLG 측정치를 항법에 이용하기 위해서는 항체의 운동과 무관한 Dither 운동을 제거하여야 하며 Dither 운동을 RLG 출력에서 제거하는 방법으로 Trapping 기법과 Stripping 기법 등이 있다^[4,5]. 이러한 기법을 적용하여 Dither 운동을 제거하면 RLG 단품에서는 정확하게 Dither 운동이 제거되거나 3개의 RLG로 관성센서모듈을 구성하고 LINS 레벨에서 각 축의 RLG/가속도계 측정치를 확인하면 항상 Dither 운동이 측정됨을 확인할 수 있다. 이러한 이유는 3개의 RLG에서 구동되는 Dither 운동이 동시에 관성센서모듈에 가해지기 때문에 RLG 장착축 Dither 운동은 제거되나 다른 두 축의 Dither 운동 성분이 측정치에 포함되어 나타나기 때문이다.

본 논문에서는 Trapping 기법을 적용한 LINS의 초기정렬 성능분석 결과를 제시한다. LINS는 일반적으로 FOG(Fiber Optic Gyroscope), DTG(Dynamically Tuned Gyroscope) 등을 적용한 관성항법장치와 다르게 RLG/가속도계에서 출력되는 각속도/가속도 측정치에 Dither 운동에 의한 정현파 운동성분이 포함되어 나타난다. 이러한 정현파 운동성분은 항법 계산주기에 따라 측정치에 포함된 정현파 운동성분의 주파수도 변하기 때문에 초기정렬 성능을 고려한 항법 계산주기를 선정하여야 한다. 본 논문에서는 이러한 LINS의 측정치 특성을 고려하여 항법 계산주기에 따라 LINS 측정치에 포함되어 나타나는 Dither 운동성분이 초기정렬 성능에 어떠한 영향을 미치는가를 이론적으로 분석하고 이를 검증하기 위한 시뮬레이션 결과를 제시한다. 시뮬레이션은 LINS에서 획득된 측정치를 후처리하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에서는 항법 계산주기에 따른 정렬/항법 성능분석 외에 초기정렬 루프의 절점 주파수 및 전단필터 유무에 대한 초기정렬 성능분석을 추가로 수행하여 결과를 제시하였다.

본 논문의 구성을 살펴보면 2장에서는 항법 계산주기에 따른 LINS의 측정치를 분석하고 모델링 결과를

제시하였으며 3장에서는 이론적으로 정현파 운동에 의한 초기정렬 성능분석 결과를 제시하였으며 4장에서는 시뮬레이션을 통하여 항법 계산주기, 절점 주파수 및 전단필터 유무에 따른 초기정렬 성능분석 결과를 제시하고 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

2. LINS 측정치 분석

가. LINS 측정치 모델링

앞에서 언급한 바와 같이 RLG 고유의 특성인 Dither 운동은 RLG의 lock-in을 제거하기 위하여 강제적으로 RLG에 인가해주는 정현파 운동으로서 약 100deg/sec의 크기에 ± 30 deg/sec의 랜덤한 크기가 더해지는 진폭을 가지고 400Hz 부근의 주기로 RLG에 인가된다. 이러한 정현파 운동은 항법 계산과정에서 원하지 않는 것이므로 이것을 제거하는 두가지 방법이 있다. 하나는 RLG 측정치를 Dither 주기에 맞추어 측정하는 trapping 방식이며, 다른 하나는 RLG 측정치에 RAVS(Relative Angular Velocity Sensor)에서 측정된 Dither 운동을 빼주어 Dither 운동을 제거하는 stripping 방식이 있다. 현재 LINS에서 적용된 방법은 구현이 용이한 trapping 방식이며 trapping 방식을 사용하더라도 Dither 운동은 RLG 측정치에 Dither 운동과 다른 주파수를 가지는 정현파 형태로 포함되어 측정된다.

LINS 구성시 3개의 RLG의 Dither 주파수는 400Hz를 기준으로 하여 축간 상호간섭을 피하기 위하여 약 30Hz 정도 차이를 두고 축 선정을 하며 대략 370, 400, 430 부근에 Dither 주파수가 설정되도록 3개의 RLG를 선정하여 관성센서 조립체를 구성한다. 먼저 자이로 출력을 살펴보면 자이로는 trapping 방식을 사용하므로 자이로 자신의 측정치에는 Dither 운동에 의해 가해진 정현파 운동이 측정되지 않으나 자이로 자신의 Dither 주파수와 다른 두 축에 설치된 자이로의 Dither 주파수와 차에 해당하는 주파수를 가진 정현파 진동이 측정된다. 그리고 가속도계의 경우 자이로와 한 몸체에 장착되므로 자이로의 Dither 운동에 의한 정현파 진동이 측정된다. 자이로와 같은 축에 장착된 가속도계 역시 자이로가 장착 축을 기준으로 정현파 진동을 하므로 같은 축의 자이로 Dither 운동은 가속도계가 측정하지 않으며 이와 수직인 두 축의 자이로에서 인가되는 Dither 운동에 의해 정현파 가속도가 측정된다. 그러나 위의 분석은 RLG와 가속도계가 정

확하게 축 정렬이 되어 있고 축간 간섭이 없는 이상적인 경우에 RLG/가속도계 장착축에 대한 Dither 운동이 상호 측정되지 않으나 실제로 측정치를 분석해보면 장착축에 대한 Dither 운동이 다른 두축에 비하여 진폭이 작게나마 측정된다. 이와 같은 사실을 근거로 하여 Dither 운동에 대한 RLG/가속도계 측정치를 모델링하면 식 (1), (2)와 같다.

$$\begin{aligned}
 G_x &= G_{xy} \sin(2\pi|f_x - f_y|t + \theta_{xy}) \\
 &\quad + G_{xz} \sin(2\pi|f_x - f_z|t + \theta_{xz}) \\
 G_y &= G_{yx} \sin(2\pi|f_y - f_x|t + \theta_{yx}) \\
 &\quad + G_{yz} \sin(2\pi|f_y - f_z|t + \theta_{yz}) \\
 G_z &= G_{zx} \sin(2\pi|f_z - f_x|t + \theta_{zx}) \\
 &\quad + G_{zy} \sin(2\pi|f_z - f_y|t + \theta_{zy})
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 A_x &= A_{xx} \sin(2\pi f_x t + \theta_{xx}) + A_{xy} \sin(2\pi f_y t + \theta_{xy}) \\
 &\quad + A_{xz} \sin(2\pi f_z t + \theta_{xz}) \\
 A_y &= A_{yx} \sin(2\pi f_x t + \theta_{yx}) + A_{yy} \sin(2\pi f_y t + \theta_{yy}) \\
 &\quad + A_{yz} \sin(2\pi f_z t + \theta_{yz}) \\
 A_z &= A_{zx} \sin(2\pi f_x t + \theta_{zx}) + A_{zy} \sin(2\pi f_y t + \theta_{zy}) \\
 &\quad + A_{zz} \sin(2\pi f_z t + \theta_{zz})
 \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 f_x, f_y, f_z 는 x, y, z축 RLG의 Dither 주파수, G_{ii} 는 i 축 Dither 진폭, $G_{ij}(i \neq j)$ 는 i 축과 j 축의 상호 간섭에 의한 Dither 진폭을 의미한다.

식 (1), (2)와 같이 이론적/실험적으로 분석된 Dither 운동에 의한 RLG/가속도계 측정치 모델은 LINS의 고유 특성이며 LINS가 정상동작하는 경우에는 항상 RLG/가속도계 측정치에 식 (1), (2) 신호가 항상 포함됨을 의미한다.

나. 항법 계산주기에 따른 주파수 영역에서의 측정치 분석

본 절에서는 관성센서에서 출력되는 신호와 항법을 수행하기 위하여 생성되는 주기적인 이산신호와와의 관계를 정리한다. 관성센서에서 출력되는 연속신호를 $x_c(t)$ 라 하고 이를 항법에 이용하기 위하여 T_s 초마다 일정한 주기로 신호를 샘플링한다고 가정하자. 이러한 경우 샘플링 함수를 $s(t)$ 라 하면 샘플링된 관성센서 출력을 $x_s(t)$ 라 하면 아래와 같은 관계가 성립한다^[5].

$$x_s(t) = x_c(t)s(t) \tag{3}$$

위 수식에서 샘플링 함수 $s(t)$ 는 아래와 같다.

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT_s) \tag{4}$$

$$x_s(t) = x_c(t) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT_s) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x_c(kT_s) \delta(t - kT_s) \tag{5}$$

위 식을 주파수 영역에서 분석하기 위하여 Fourier 변환을 하면 다음과 같다^[5].

$$\begin{aligned}
 X_s(f) &= F\{x_s(t)\} = F\left\{ \sum_{k=-\infty}^{\infty} x_c(kT_s) \delta(t - kT_s) \right\} \\
 &= f_s \sum_{n=-\infty}^{\infty} X_c(f - nf_s)
 \end{aligned} \tag{6}$$

위 식에서 $f_s = \frac{1}{T_s}$ 이다. 식 (6)을 다시쓰면 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned}
 X_s(f) &= f_s (X_c(f) + X_c(f - f_s) + X_c(f + f_s) \\
 &\quad + X_c(f - 2f_s) + X_c(f + 2f_s) + \dots)
 \end{aligned} \tag{7}$$

식 (7)에서 나타난 바와 같이 항법 계산주기 f_s 로 샘플링된 관성센서 신호는 관성센서에서 출력되는 고유의 주파수와 항법 계산주기와와의 차와 합의 주파수 성분이 실제 항법계산에 사용되는 측정치에 생성되는 것을 알 수 있다. 그러므로 항법 계산주기 선정시 이를 고려하여 너무 낮은 주파수 성분이 측정치에 나타나 초기 정렬에 문제가 발생하지 않도록 최적의 항법 계산주기를 선정하여야 한다.

3. LINS 초기정렬 성능분석

일반적으로 관성항법장치의 정렬은 고정이득 방식과 가변이득 방식을 많이 사용한다. 본 논문에서는 LINS 항법 계산주기에 따른 정렬성능 분석을 위하여 2차 제어기를 이용한 고정이득 방식의 정렬루프를 적용한 경우를 가정하여 분석을 수행하였다.

일반적으로 2차 제어기를 이용한 고정이득 방식의 정렬루프는 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다. 그림에서 나타난 바와 같이 항법좌표계에서 수평축 가속도계 측정치 f^b 가 영이 되도록 2차 제어기를 이용하여 제어 신호(ω_E^c, ω_N^c)를 생성하고 이를 이용하여 동체좌표계 (b-frame)와 항법좌표계(n-frame) 사이의 좌표변환 행렬 C_b^n 을 계산하여 수평축 정렬을 수행하며 수직축 자세는 생성된 제어신호를 이용하여 계산한다. Fig. 1에서 k, k_b 는 정렬루프 계수이며 v_E, v_N 은 항법좌표계에서의 속도, Ω 는 지구회전 각속도, L 은 위도, $\Omega_E, \Omega_N, \Omega_U$ 는 항법좌표계에서의 각속도, Ω_{ib}^b 는 RLG에서 출력되는 각속도를 의미한다.

정렬루프 해석을 위해서는 정렬루프에 대한 오차방정식이 요구되며 이를 그림으로 나타내면 Fig. 2와 같고 이를 식으로 나타내면 식 (8), (9)와 같다. 식 (8), (9)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.

$$\begin{bmatrix} \dot{\Phi}_E \\ \dot{\delta v_N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -k_b \\ g & -k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_E \\ \delta v_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\delta \omega_E(t) \\ \delta a_N(t) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\Phi}_N \\ \dot{\delta v_E} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & k_b \\ -g & -k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_N \\ \delta v_E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\delta \omega_N(t) \\ \delta a_E(t) \end{bmatrix} \quad (9)$$

식 (8), (9)를 라플라스 변환을 통하여 정리하면 식 (10)~(13)과 같다.

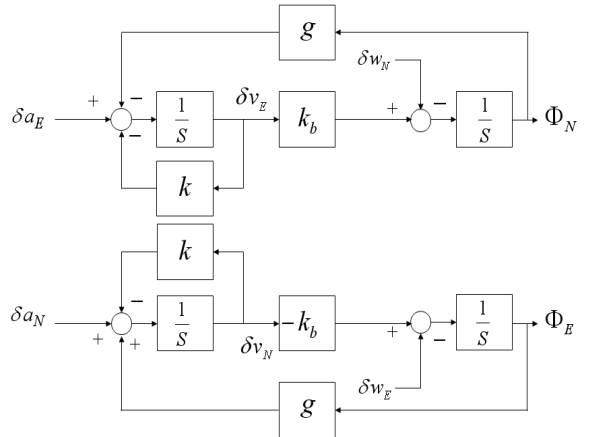


Fig. 2. 2차 제어기 적용 정렬루프 오차특성

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

$$\delta v_N(s) = \frac{s\delta a_N(s) - g\delta w_E(s)}{s^2 + ks + k_b g} \quad (11)$$

$$\Phi_E(s) = \frac{-k_b \delta a_N(s) - (s+k)\delta w_E(s)}{s^2 + ks + k_b g} \quad (12)$$

$$\Phi_N(s) = \frac{k_b \delta a_E(s) - (s+k)\delta w_N(s)}{s^2 + ks + k_b g} \quad (13)$$

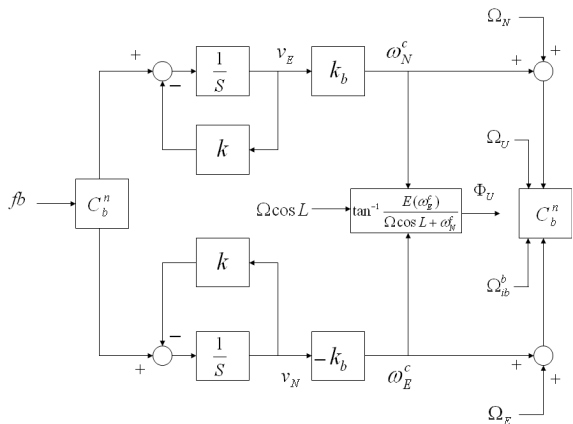


Fig. 1. 2차 제어기 적용 정렬루프

위 수식에서 나타난 바와 같이 정렬을 위한 2차 제어기는 가속도계 및 자이로 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 및 자이로 측정치에 포함되어 있는 정현과 성분이 적절히 제거되도록 w_c 를 결정하여야 한다.

동체 좌표계에서 모델링된 LINS 측정치 모델 식인 식 (1), (2)에 식 (7)을 적용하여 좌표변환행렬을 통하여 항법좌표계로 변환하여 정리하면 식 (14)와 같이 새로운 방정식이 유도된다. 식 (14)에서 $\delta \omega_E(t), \delta a_N(t)$ 은 시변 각속도와 가속도 오차로 Dither 운동에 의해 발생된 정현과 성분으로 구성되며 주파수 $\omega_{Ai}, \omega_{\Omega}$ 은

식 (7)에서 나타남과 같이 샘플링 주파수와 Dither 주파수의 차에 의해서 생성된 주파수이며 진폭 A_i^m , Ω_i^m 은 Dither 운동에 의해서 생성된 진폭으로 좌표변환 및 샘플링 주파수 등에 의해서 주파수 성분별로 다른 크기를 가진다.

$$\delta a_N(t) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i^m \cos(\omega_{Ai}t) \quad (14)$$

$$\delta \omega_E(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \Omega_i^m \cos(\omega_{\Omega i}t)$$

Dither 운동에 의한 정렬루프 해석을 위하여 식 (14)를 (8), (9)에 대입하고 라플라스 변환하여 정리하면 식 (15), (16)과 같다.

$$\Phi_E(s) = \frac{1}{s^2 + ks + k_b g} [- (s+k) \sum_{i=1}^{\infty} (\Omega_i^m \frac{s}{s^2 + \omega_{\Omega i}^2}) - k_b \sum_{i=1}^{\infty} (A_i^m \frac{s}{s^2 + \omega_{Ai}^2})] \quad (15)$$

$$\delta v_N(s) = \frac{1}{s^2 + ks + k_b g} [-g \sum_{i=1}^{\infty} (\Omega_i^m \frac{s}{s^2 + \omega_{\Omega i}^2}) + s \sum_{i=1}^{\infty} (A_i^m \frac{s}{s^2 + \omega_{Ai}^2})] \quad (16)$$

위 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi_E(s) = \frac{a_0 s + b_0}{s^2 + ks + k_b g} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{a_i^{\omega} s + b_i^{\omega} \omega_{\Omega i}}{s^2 + \omega_{\Omega i}^2} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{a_i^a s + b_i^a \omega_{Ai}}{s^2 + \omega_{Ai}^2} \quad (17)$$

$$\delta v_N(s) = \frac{\alpha_0 s + \beta_0}{s^2 + ks + k_b g} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\alpha_i^{\omega} s + \beta_i^{\omega} \omega_{\Omega i}}{s^2 + \omega_{\Omega i}^2} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\alpha_i^a s + \beta_i^a \omega_{Ai}}{s^2 + \omega_{Ai}^2} \quad (18)$$

위 식으로 부터 자세, 속도 오차는 다음과 같이 된다.

$$\Phi_E(t) = A_{\Phi 1} e^{\frac{-k + \sqrt{k^2 - 4k_b g}}{2} t} + A_{\Phi 2} e^{\frac{-k - \sqrt{k^2 - 4k_b g}}{2} t} + \sum_{i=1}^{\infty} [a_i^{\omega} \cos(\omega_{\Omega i}t) + b_i^{\omega} \sin(\omega_{\Omega i}t)] + \sum_{i=1}^{\infty} [a_i^a \cos(\omega_{Ai}t) + b_i^a \sin(\omega_{Ai}t)] \quad (19)$$

$$\delta v_N(t) = A_{\delta v 1} e^{\frac{-k + \sqrt{k^2 - 4k_b g}}{2} t} + A_{\delta v 2} e^{\frac{-k - \sqrt{k^2 - 4k_b g}}{2} t} + \sum_{i=1}^{\infty} [\alpha_i^{\omega} \cos(\omega_{\Omega i}t) + \beta_i^{\omega} \sin(\omega_{\Omega i}t)] + \sum_{i=1}^{\infty} [\alpha_i^a \cos(\omega_{Ai}t) + \beta_i^a \sin(\omega_{Ai}t)] \quad (20)$$

위 식에서 $A_{\Phi 1}$, $A_{\Phi 2}$, $A_{\delta v 1}$, $A_{\delta v 2}$ 항은 시간이 경과함에 따라 감쇄되는 항으로 정상상태에서 정렬성능에 영향을 미치지 않으나 정현파 성분은 시간에 관계없이 계속해서 정렬에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있으며 정현파 성분의 진폭을 나타내는 계수를 정리하면 아래와 같다.

$$a_i^{\omega} = \Omega_i^m \frac{-k k_b g}{(\omega_{\Omega i}^2 - k_b g)^2 + k^2 \omega_{\Omega i}^2}, \quad (21)$$

$$b_i^{\omega} = A_i^m \frac{\omega_{Ai}^3 - k_b g \omega_{Ai}}{(\omega_{Ai}^2 - k_b g)^2 + k^2 \omega_{Ai}^2}$$

$$a_i^a = A_i^m \frac{k_b \omega_{Ai}^2 - k_b^2 g}{(\omega_{Ai}^2 - k_b g)^2 + k^2 \omega_{Ai}^2}, \quad (22)$$

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

$$\alpha_i^{\omega} = \Omega_i^m \frac{g \omega_{\Omega i}^2 - k_b g^2}{(\omega_{\Omega i}^2 - k_b g)^2 + k^2 \omega_{\Omega i}^2}, \quad (23)$$

$$\beta_i^{\omega} = \Omega_i^m \frac{-g k \omega_{\Omega i}}{(\omega_{\Omega i}^2 - k_b g)^2 + k^2 \omega_{\Omega i}^2}$$

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

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

식 (19), (20)으로 부터 알 수 있듯이 정렬루프에서의 각 및 속도 오차는 입력되는 정현파 운동의 주파수 및 정렬루프 특성에 의하여 결정됨을 알 수 있고 고주파성분은 정렬루프 자체의 저역통과필터 특성에 의하여 차단됨을 알 수 있다. 그러나 k , k_b 선정에 제한이 다르므로 저주파 신호에 대한 특성은 존재하게 되며 특히 샘플링 주파수와 Dither 주파수의 차에 의해서 생성되는 저주파 성분의 측정치는 정렬 성능을 저하 시키는 주요 요인이 될 수 있기 때문에 이를 고려한 샘플링 주파수의 선정이 요구된다. 수직축 자세오차 Φ_U 는 Fig. 2에서 나타난 바와 같이 ω_E^c 의 평균값을 구하여 계산되기 때문에 식 (25)와 같이 계산된다.

$$\Phi_U = -\frac{k_b}{(T-T_0)\omega_N} \left[\int_{T_0}^T (A_{\delta v1} e^{-\frac{k+\sqrt{k^2-4k_b g}}{2}t} + A_{\delta v2} e^{-\frac{k-\sqrt{k^2-4k_b g}}{2}t}) dt \right] \quad (25)$$

$$+ \int_{T_0}^T \sum_{i=1}^{\infty} (\alpha_i^{\omega} \cos(\omega_{\Omega_i} t) + \beta_i^{\omega} \sin(\omega_{\Omega_i} t) + \alpha_i^{\omega_A} \cos(\omega_{A_i} t) + \beta_i^{\omega_A} \sin(\omega_{A_i} t)) dt$$

식 (25)의 적분성분을 계산하여 정리하면 식 (26)과 같다.

$$\Phi_U = -\frac{k_b}{(T-T_0)\omega_N} \left[\int_{T_0}^T (A_{\delta v1} e^{-\frac{k+\sqrt{k^2-4k_b g}}{2}t} + A_{\delta v2} e^{-\frac{k-\sqrt{k^2-4k_b g}}{2}t}) dt \right]$$

$$+ \sum_{i=1}^{\infty} \left(\frac{\alpha_i^{\omega}}{\omega_{\Omega_i}} [\sin(\omega_{\Omega_i} T) - \sin(\omega_{\Omega_i} T_0)] - \frac{\beta_i^{\omega}}{\omega_{\Omega_i}} [\cos(\omega_{\Omega_i} T) - \cos(\omega_{\Omega_i} T_0)] \right)$$

$$+ \frac{\alpha_i^{\omega_A}}{\omega_{A_i}} [\sin(\omega_{A_i} T) - \sin(\omega_{A_i} T_0)] - \frac{\beta_i^{\omega_A}}{\omega_{A_i}} [\cos(\omega_{A_i} T) - \cos(\omega_{A_i} T_0)] \quad (26)$$

식 (26)에서 나타난 바와 같이 수직축 자세오차도 수평축과 유사하게 입력되는 정현파 운동의 주파수와 정렬루프 특성에 의하여 결정됨을 알 수 있으며 정렬루프 설계시 이러한 특성을 고려하여 정렬루프를 설계하여야 한다. 식 (10), (13)에 대해서 유사한 형태로 전개가 가능하며 정렬루프의 적절한 설계를 통하여 원하는 특성을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

앞에서 언급한 바와 같이 정렬루프에 입력되는 정현파 신호의 경우 고주파 성분은 정렬루프 자체의 저역통과특성에 의하여 제거되나 저주파 성분의 경우 정렬루프의 절점 주파수 선정에 따라 정렬루프의 성능이 좌우될 수 있음을 식 (19), (20), (26)을 통하여 보였다. 그러므로 항법 계산주기 선정시 식 (7)과 같이 샘플링 주파수와 Dither 주파수 사이의 관계를 고

려하여 선정하는 경우 최적 주파수는 정렬루프의 절점 주파수를 2Hz라 가정할 때 정현파 진동이 40dB이상 감쇄될 수 있고 15~20Hz이상의 정현파 신호만이 측정치에 포함되도록 LINS의 항법 계산주기를 선정하여야 한다.

4. 시뮬레이션 결과

본 장에서는 LINS의 초기정렬 성능을 확인하기 위한 시뮬레이션 결과를 제시한다. 시뮬레이션은 LINS에서 실측한 데이터를 후처리하여 수행하였다. 우선 실측 데이터가 식 (1), (2)의 모델링 결과와 일치하는 것을 확인하기 위하여 RLG/가속도계 데이터에 대한 FFT를 수행하여 RLG 각 축에 대한 Dither 주파수를 구하고 이를 RLG 제작시 설정된 Dither 주파수와 비교한다. 실측 데이터를 획득하기 위하여 사용된 LINS의 Dither 주파수는 X축 431.2Hz, Y축 378.8Hz, Z축 399.9Hz이다. 식 (1), (2)에 의하면 자이로 측정치는 RLG 축간 차분 주파수인 21.1, 31.3, 52.4Hz의 주파수를 가지는 정현파 성분이 측정치에 나타나야 하며 가속도계 측정치에는 3축의 RLG Dither 주파수가 나타나야 한다. X축 RLG/가속도계 측정치에 대한 FFT 수행결과를 그림으로 나타내면 Fig. 3~5와 같다. Fig. 3은 X축 RLG 데이터를 FFT한 결과로 예측한 바와 같이 X축 Dither 주파수의 다른 두 축의 Dither 주파수의 차분 주파수 성분인 31.2, 52.4Hz 주파수 성분이 측정치에 포함되어 있는 것을 확인할 수 있으며 Fig. 4는 X축 가속도계 데이터를 FFT한 결과로 3축의 RLG Dither

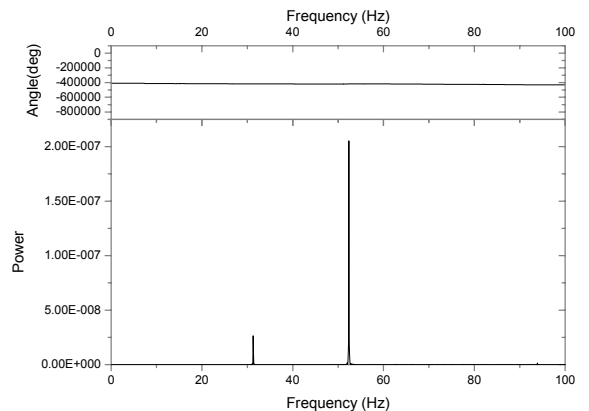


Fig. 3. X축 RLG 측정치 FFT 결과(0~100Hz)

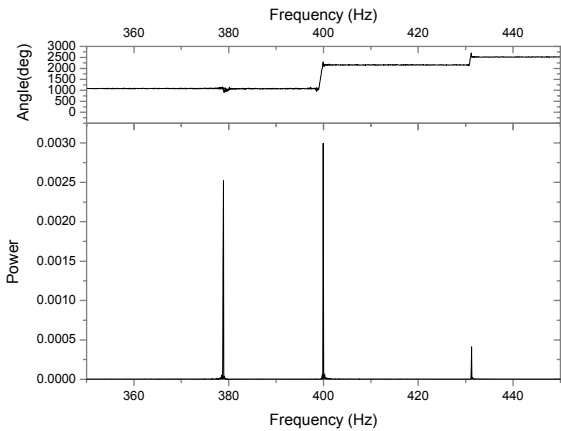


Fig. 4. X축 가속도계 측정치 FFT 결과(350~450Hz)

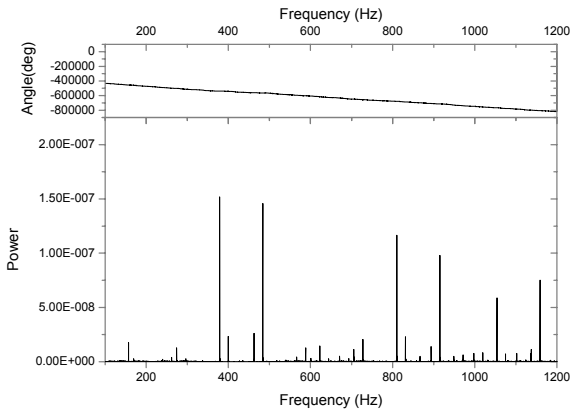


Fig. 5. X축 RLG 측정치 FFT 결과(100~1200Hz)

주파수가 측정치에 포함되어 나타남을 확인할 수 있다. 이는 식 (1), (2)의 모델링이 정확함을 보여주는 결과이다. 그러나 X축 RLG 측정치를 FFT 한 결과의 주파수 대역을 확대하여 분석하였을 때 400Hz 부근에서 마치 Dither 주파수 성분이 나타난 것처럼 보이나 이는 샘플링 주파수 즉 X축 RLG Dither 주파수(431.2Hz)와 차분주파수(31.2, 52.4Hz) 사이의 합 혹은 차 성분으로 식 (8)에서 나타난 바와 같은 동일한 주파수 성분이 검출되는 것을 확인할 수 있다. 이를 그림으로 나타내면 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 400Hz 부근에 4가지 다른 주파수 성분이 검출되는 것을 확인할 수 있다.

가. 항법 계산주기에 따른 정렬성능 분석

본 절에서는 항법 계산주기에 따른 초기정렬 성능 분석 결과를 제시한다. 시뮬레이션에 사용된 항법 계

산주기는 현재 시뮬레이션 대상 LINS의 Dither 주파수 및 샘플링 주기를 고려하여 150Hz와 200Hz의 항법 계산주기를 선정하고 동일한 측정치에 대하여 항법 계산주기를 다르게 하였을 경우에 대한 초기정렬 성능 분석 결과를 제시한다. 시뮬레이션에 적용된 정렬 루프는 Fig. 2에서 나타난 바와 같이 2차 제어기를 사용하는 정렬기법을 적용한 경우를 대상으로 한다. Fig. 2에서 나타난 바와 같이 정렬에서의 수평축 정렬은 가속도계 측정치를 이용하여 정렬을 수행하며 정렬 루프 자체는 가속도계 측정치에 대하여 저역 통과필터 특성을 보이기 때문에 가속도 측정치에 정렬 루프 자체의 절점 주파수보다 작은 주파수를 가지는 측정치가 포함되는 경우에는 가속도계 측정치의 진폭에 비례하여 수평축 자세가 흔들리며 그 주파수는 가속도 측정치에 포함된 정현파 성분의 주파수와 동일하다. Fig. 6~7은 Fig. 2의 정렬 루프를 이용하여 정렬을 수행하였을 때 항법 계산주기가 200 및 150Hz인 경우에 수평축 자세의 정렬상태를 보여주는 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 200Hz 항법 계산주기의 경우 식 (7)에서 유도된 바와 같이 항법 계산주기 및 항법 계산주기 배수와 Dither 주파수간의 차 주파수 성분의 정현파 진동이 가속도계 측정치에 나타나게 되며 이 경우 고주파 성분을 제외하고 정렬성능에 영향을 미치는 저주파 성분을 구해보면 가속도 측정치에 0.1Hz, 21.2Hz, 31.2Hz 주파수의 정현파 성분이 정렬성능에 영향을 미치게 됨을 알 수 있다. 그러나 3종류의 정현파와 가속도 측정성분 중에 정렬 루프의 절점 주파수인 2Hz보다 큰 주파수 성분인 21.2, 31.2Hz 성분은 정렬 루프의 저역통과 필터특성에 의하여 제거되고 0.1Hz 성분만이 정렬에 영향을 미치게 된다. 그러나 가속도 측정치에 포함된 0.1Hz 정도의 저주파 성분을 FFT를 이용하여 검출하기에는 매우 어렵기 때문에 가속도 측정치를 적분하여 고주파 성분이 제거된 속도성분을 구하고 이를 이용하여 역으로 가속도 측정치에 포함된 저주파 성분의 유도가 가능하다. X축 가속도 측정치를 적분하여 구한 속도 측정치를 그림으로 나타내면 Fig. 8과 같다, Fig. 8에서 알 수 있듯이 속도 측정치에 주파수가 0.1Hz이고 진폭이 약 0.012ft/sec인 속도 성분이 구해지며 이를 수식으로 나타내면 식 (27)과 같다. 식 (27)을 이용하여 가속도 측정치에 포함된 저주파 성분을 구하면 식 (28)과 같다.

$$\delta V_x(t) = 0.006 \times \sin(2\pi \times 0.1t) \tag{27}$$

$$\begin{aligned}\delta a_X(t) &= \frac{d\delta V_X(t)}{dt} = 0.006 \times 2\pi \times 0.1 \times \sin(2\pi \times 0.1t) \\ &= 0.0038 \times \sin(2\pi \times 0.1t)\end{aligned}\quad (28)$$

식 (28)은 200Hz 항법 계산주기를 가지는 경우 가속도 측정치에 포함된 저주파 성분을 모델링한 것으로 동체 좌표계에서 정의된 것으로 앞에서 언급한 정렬 루프의 해석을 위해서는 항법 좌표계에서의 가속도 측정치가 요구된다. 그러나 수평측 자세가 영으로 장착되고 방위각도 영에 근접한 상태에서 LINS 측정치를 획득한 것이기 때문에 항법좌표계와 동체좌표계가 일치할 것으로 판단되기 때문에 식 (28)의 저주파 가속도 측정치는 쉽게 항법좌표계로의 변환이 가능하다. 항법 계산주기의 따른 정렬루프 성능분석을 위하여 식 (19), (20)을 이용하여 정렬루프에서의 정현파 진동에 의한 해석을 수행하기 위해서는 식 (19), (20)의 수식을 구성한 정현파 성분의 계수 즉 식 (21)~(24)를 구하여야 한다. 이 계수는 절점주파수(ω_c), 측정치 주파수(ω_{A_i} , ω_{Ω_i}), 정렬루프의 계수(k , k_b) 등의 함수로 구성되며 절점 주파수에 비교하여 측정치 주파수가 매우 작은 경우 식 (21)~(24)는 식 (29)~(32)로 간략화된다.

$$a_i^\omega = -\Omega_i^m \frac{k}{k_b g}, \quad b_i^\omega = 0 \quad (29)$$

$$a_i^a = -A_i^m \frac{1}{g}, \quad b_i^a = 0 \quad (30)$$

$$\alpha_i^\omega = -\Omega_i^m \frac{1}{k_b}, \quad \beta_i^\omega = 0 \quad (31)$$

$$\alpha_i^a = 0, \quad \beta_i^a = 0 \quad (32)$$

위 식 (29)~(32)를 이용하여 가속도 측정치에 포함된 저주파 성분이 정렬 루프에 미치는 영향을 분석하기 위해서 식 (28)을 식 (29)~(32)에서 식 (30)에 대입하여 정리하면 식 (33)과 같은 자세오차가 발생됨을 수식으로 유도가 가능하다. 식 (33)과 같이 유도된 자세오차는 200Hz 항법 계산주기를 가지는 가속도계 측정치를 이용한 정렬 루프 시뮬레이션 결과인 Fig. 7~8의 결과와 동일한 결과를 보여주는 것을 확인하였으며 이는 200Hz 항법 계산주기로 정렬을 수행하는 경

우 정렬에 심각한 성능저하가 발생할 수 있음을 보여주는 결과이다. 반면에 150Hz 항법 계산주기로 정렬을 수행하는 경우에는 가속도 측정치에 포함되어 나타나는 정현파 성분의 주파수가 절점 주파수에 비하여 매우 크기 때문에 저역통과 필터 특성을 가지는 정렬루프에 의하여 모두 감쇄되어 정렬에 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다. 항법 계산주기가 150Hz인 경우에 대한 수평측 정렬 결과를 그림으로 나타내면 Fig. 7~8과 같다. 그림에서 나타난 바와 같이 200Hz 항법 계산주기를 적용한 경우와 비교하여 자세의 수렴성이 매우 좋은 것으로 나타났다. 그러나 항법 계산주기가 200Hz의 경우 수평측 자세가 크게 흔들리는 것을 확인 할 수 있으며 자세의 흔들리는 폭을 가속도계 바이어스로 환산하면 약 200ug 정도의 오차이며 이는 LINS 성능과 비교할 때 매우 큰 값으로 항법 계산주기에 따라 정렬성능이 크게 달라지는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 7~8에서 150Hz 항법 계산주기에서 수평측 자세가 고주파수로 진동하는 것은 자이로 측정치에 포함된 고주파수의 정현파 성분에 의하여 발생된 것으로 이에 대한 해석은 다음 절에서 상세히 다룰 예정이다.

$$\Phi_E(t) = -\frac{\delta A_X(t)}{g} = -0.0067 \times \sin(2\pi \times 0.1t) \text{ (deg)} \quad (33)$$

지금까지는 가속도계 측정치에 저주파 정현파 성분이 포함된 경우를 가정하여 정렬루프에 대한 성능을 분석하였다. 그러나 LINS의 경우 자이로 측정치에도 정현파 성분의 측정치가 포함되어 있으며 이러한 측정

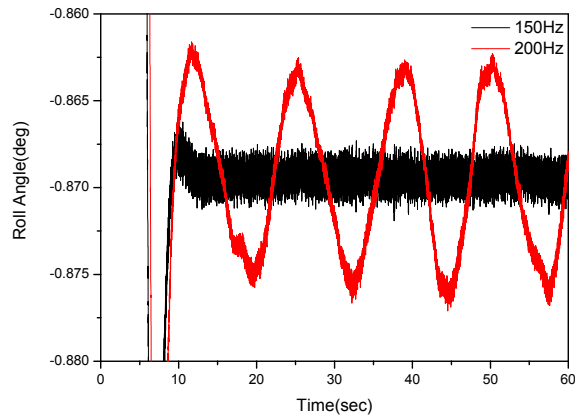


Fig. 6. Roll 각 정렬결과 비교

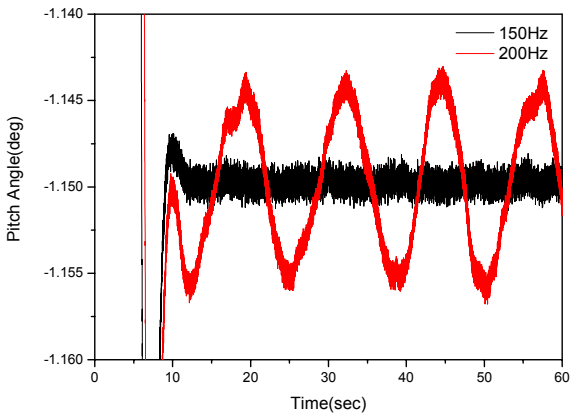


Fig. 7. Pitch각 정렬결과 비교

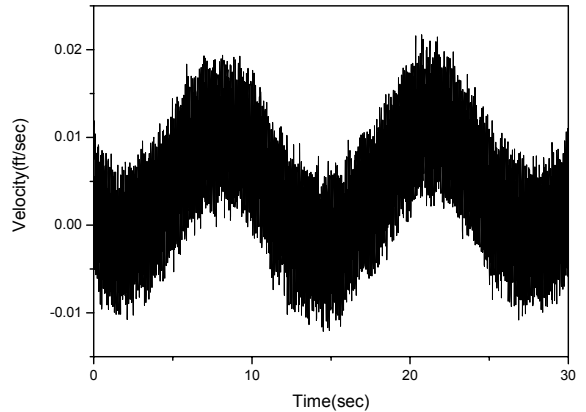


Fig. 8. 속도 측정치 성분

치 성분이 정렬 성능에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 분석을 수행한다. 자이로 측정치에 포함된 저주파 성분은 0.1Hz, 0.06rad의 진폭을 가지는 정현파 각속도를 Pitch 방향으로 인가하였으며 정렬루프의 절점 주파수 w_c 가 2Hz인 경우에 대한 시뮬레이션 결과로 그림으로 나타내면 Fig. 9~10과 같다. 시뮬레이션을 위한 정렬루프 계수 k , k_b 는 각각 $4, \frac{4}{g}$ 이며 이 값을 식 (34), (36)에 대입하여 정리하면 Fig. 9~10에 나타난 것과 동일한 결과가 수식으로 유도된다. 이러한 결과를 판단할 때 본 논문에서 유도한 정렬루프 해석을 위하여 유도된 수식이 모두 타당함을 보여주는 결과이다. 앞의 결과에서 정렬루프의 절점 주파수를 변경하는 경우 정렬성능을 확인하기 위하여 절점 주파수를 0.5Hz로 변경하고 정렬루프 계수도 k, k_b 각각 $1, \frac{0.25}{g}$ 로 변경하는 경우에는 자세 및 속도가 크게 증가하는 상황이 발생함을 Fig. 11~12는 보여주고 있다. 절점 주파수가 2Hz인 경우의 결과인 Fig. 9~10에 비하여 절점 주파수 0.5Hz인 경우는 식 (29), (31)에 나타난 바와 같이 정렬루프의 계수에 의하여 자이로 측정치에 포함된 정현파 성분이 증폭되어 자세 및 속도 오차를 발생하는 새로운 사실이 발견되었으며 이러한 사실은 LINS 정렬루프 설계에 유용하게 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

자이로 및 가속도계 측정치에 포함된 저주파 성분 외에 고주파 성분 즉 정렬루프의 절점 주파수보다 큰 주파수 성분이 정렬성능에 어떠한 영향을 미치는가를 분석하기 위하여 저주파 성분에서와 유사하게 계수에 대한 간략화를 수행하고 이를 정리하면 식 (34)

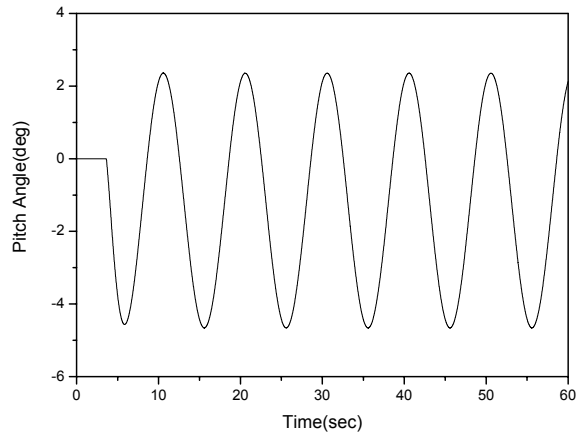


Fig. 9. Pitch 각 정렬결과($w_c=2$)

~(37)와 같다. 식 (34)~(37)에서 알 수 있듯이 고주파 성분은 정렬 루프를 통과하면 진폭이 주파수와 반비례 관계를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 정렬루프의 저역통과 필터 특성에 의하여 기인하는 것이며 식 (34)~(37)의 결과는 향후 측정치에 포함된 고주파 성분을 고려한 정렬 루프 설계시 적용 가능할 것으로 사료된다.

$$\alpha_i^\omega = 0, \quad b_i^\omega = -\Omega_i^n \frac{1}{\omega_{\Omega i}} \quad (34)$$

$$\alpha_i^a = 0, \quad b_i^a = 0 \quad (35)$$

$$\alpha_i^\omega = 0, \quad \beta_i^\omega = 0 \quad (36)$$

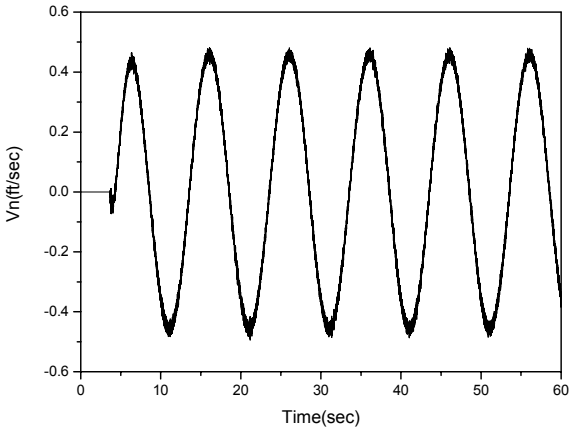


Fig. 10. N축 속도오차($w_c=2$)

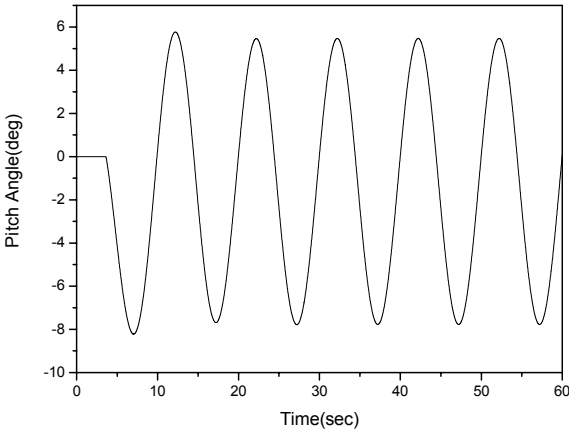


Fig. 11. Pitch각 정렬결과($w_c=0.5$)

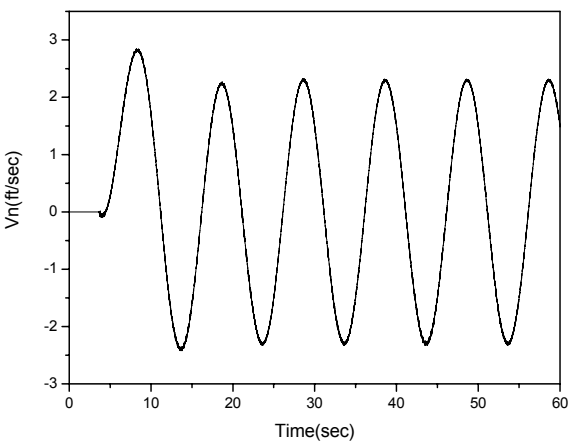


Fig. 12. N축 속도오차($w_c=0.5$)

$$\alpha_i^a = 0, \beta_i^a = A_i^m \frac{1}{\omega_{Ai}} \quad (37)$$

LINS 정렬의 주요 목적은 동체 좌표계와 항법좌표계 사이의 자세를 알아내는 것으로 수평축 자세의 경우 수평축 가속도 측정치를 이용하여 비교적 빠른 시간 내에 수행이 완료되나 수직축 자세의 경우 수평축 정렬과정에서 계산된 항법 좌표계에서의 각속도 성분을 이용하여 계산되기 때문에 수평축 정렬이 정상적으로 수행되지 않으면 수직축 정렬 또한 제대로 수행되지 않는다. 그러므로 200Hz 항법 계산주기를 가지는 경우 앞 절에서 언급한 바와 같이 가속도 측정치에 포함된 저주파 성분에 의하여 수평축 자세가 안정화 되지 않고 계속해서 흔들리는 것을 확인할 수 있었기 때문에 수직축 정렬 또한 정상적으로 수행되지 않을 것으로 사료된다. 이를 확인하기 위하여 200Hz 항법계산주기로 수행된 수직축 정렬 결과를 그림으로 나타내면 Fig. 13과 같다. Fig. 13의 오른쪽 스케일에서 나타난 바와 같이 수직축 자세인 Heading이 정렬 초기에 정상적으로 수렴하지 않고 약 25도 정도의 큰 진폭을 가지고 변하다가 시간이 경과하여 평균되는 수평축 가속도 측정치의 개수가 많아지면서 점차 수렴하는 특성을 보여주고 있으나 수렴값이 정확한 자세각으로 수렴하는 가를 확인할 수는 없다. 반면에 Fig. 13의 왼쪽 스케일에서 나타난바와 같이 150Hz 항법 계산주기로 수직축 정렬을 수행하는 초기에 약 0.3도의 작은 진폭을 가지고 변하다가 시간이 경과함에 따라 빠르게 일정한 값으로 수렴하는 것을 Fig. 13은 보여주고 있다. 그림에서 확연히 알 수 있듯이 200Hz 항법 계산주기로는 수직축 정렬이 불가능함을 보여주고 있다. 반면에 150Hz 항법 계산주기는 빠른 시간안에 수직축 정렬이 수행되는 것을 확인할 수 있었으며 정렬 관점에서는 150Hz 항법 계산주기가 200Hz 항법 계산주기에 비하여 정렬성능이 매우 우수한 것으로 시뮬레이션 결과 나타났다. 추가적으로 두 항법 계산주기의 최종 Heading 각 추정성능은 정렬완료 후 항법성능 평가를 통하여 200Hz 항법 계산주기로 정렬을 수행하는 경우 항법오차가 크게 증가하는 것을 확인하였다.

나 전단필터 추가에 따른 정렬성능 분석

본 절에서는 정렬루프에서 사용되는 가속도/각속도 측정치를 정렬전에 전단필터를 이용하여 사전에 정형

과 성분을 제거한 후 정렬을 수행하는 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 제시한다. 시뮬레이션은 3가지 경우를 가정하여 수행하였으며 전단필터는 2400Hz 주기로 측정된 데이터를 이용하여 수행된다. 비교분석을 위한 3가지 시뮬레이션 경우는 다음과 같다. Case1은 150Hz 항법 계산주기로 정렬을 수행한 결과이고 Case2, 3은 200Hz 항법 계산주기로 정렬을 수행한 결과이나 Case2는 2400Hz 가속도계 측정치를 정렬전에 1Hz 절점주파수를 가지는 1차 저역통과 필터로 데이터 처리하였으며 Case3는 2400Hz RLG/가속도계 측정치를 모두 정렬전에 1Hz 절점주파수를 가지는 1차 저역 통과필터로 데이터 처리한 경우이다. Case 2, 3을 그림으로 나타내면 Fig. 14, 15와 같다. Fig. 14, 15에서 나타난 바와 같이 전단필터는 RLG/가속도계 측정치인 Ω_{ib}^b/f^b 를 1차 저역통과 필터링한다.

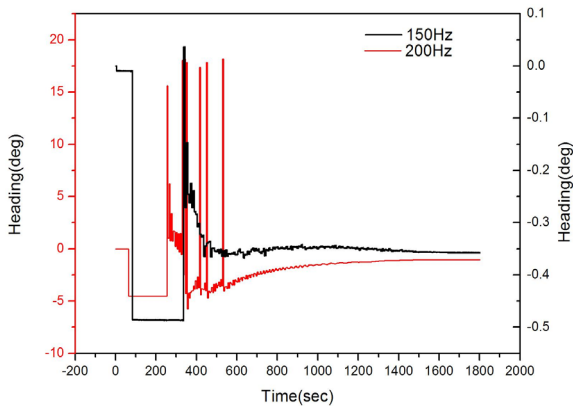


Fig. 13. Heading 각 정렬결과 비교

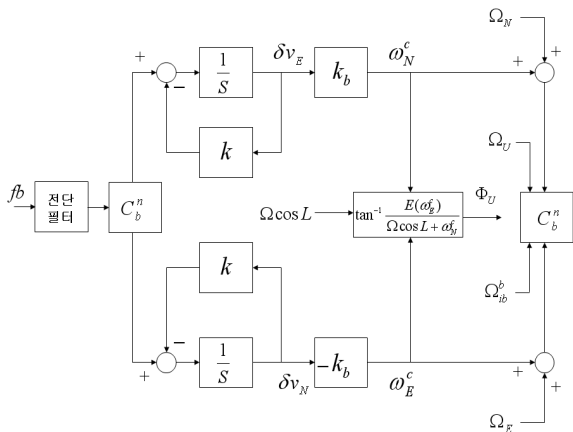


Fig. 14. Case2

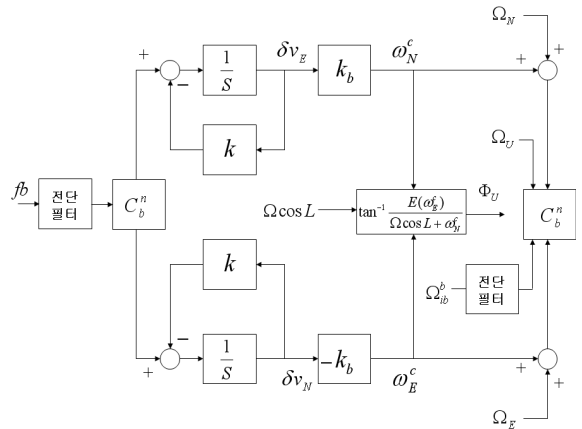


Fig. 15. Case3

3가지 경우에 대한 정렬루프에 대한 시뮬레이션 결과를 그림으로 나타내면 Fig. 16~18과 같다. 수평축 자세의 경우 앞서도 언급한 바와 같이 가속도계 측정치를 이용하여 정렬을 수행하기 때문에 수평축 자세에는 가속도계 측정치에 포함된 정현파 성분이 포함되어 나타나며 또한 자세계산을 위하여 사용된 자이로 측정치의 정현파 성분 또한 포함되어 나타날 것으로 판단된다. 그러므로 그림에서 알 수 있듯이 Case1의 경우 정렬루프 자체적으로 가속도 측정치에 대한 저역통과 필터링을 수행하기 때문에 자이로 측정치에 포함된 정현파 성분이 수평축 자세에 나타나는 것을 확인할 수 있으며 Case2의 경우에는 가속도계 측정치에 대한 전단 필터링을 수행하기 때문에 순수하게 자이로 측정치에 포함된 정현파 성분에 수평축 자세에 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그런데 Case1이 Case2보다 Roll 각의 경우 매우 큰 진폭을 가지는 것은 X축 가속도계 측정치가 매우 큰 진폭의 정현파 성분을 포함하고 있기 때문에 정렬루프에서 충분한 저역통과 필터링이 수행되지 않아서 발생한 것으로 판단되며 정렬루프의 절점 주파수를 2Hz에서 0.5Hz로 낮추면 Case1의 수평축 자세의 변화 진폭도 크게 감소할 것으로 판단된다. Case1, 2에 비하여 Case3은 RLG/가속도계 측정치를 모두 전단 필터링하기 때문에 측정치에 포함된 정현파 성분이 모두 제거되어 수평축 자세의 변화 진폭이 매우 작은 것으로 나타났다. 이러한 결과로 판단할 때 200Hz로 2400Hz의 RLG/가속도계 데이터를 변환하는 과정에서 발생하는 저주파 성분은 전단필터를 이용하여 변환전에 정현파 성분의 진폭을 크게 낮춘 후에 변환된 데이터를 이용하여 정렬을 수행하는 경우에는

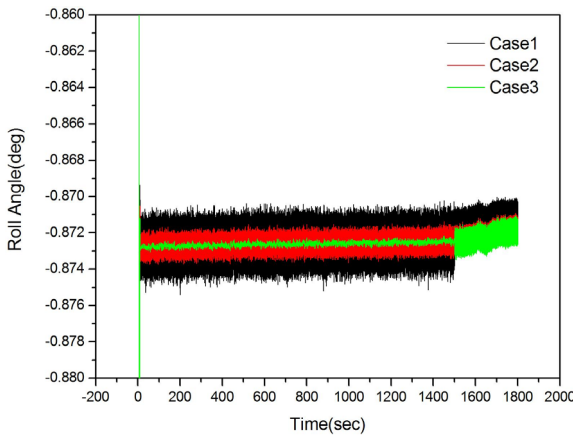


Fig. 16. Roll 각 정렬결과 비교

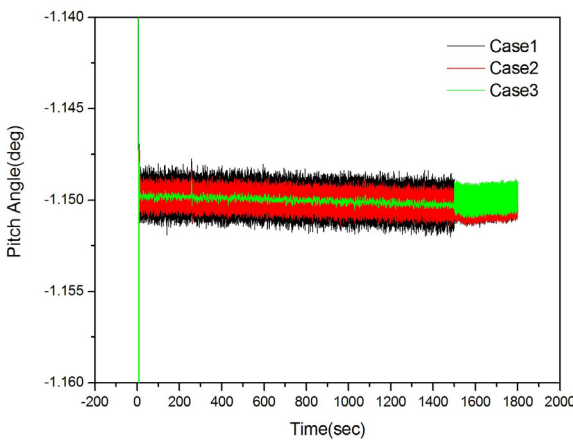


Fig. 17. Pitch 각 정렬결과 비교

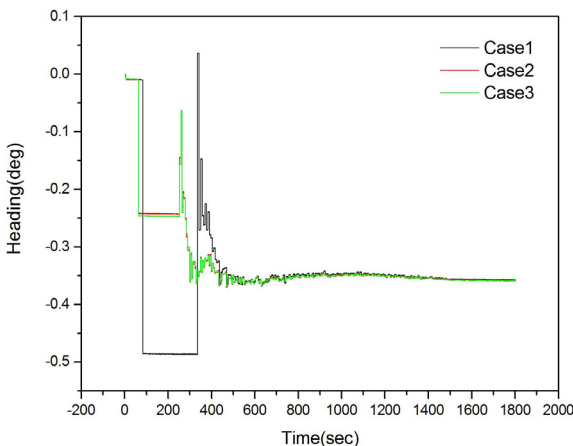


Fig. 18. Heading 각 정렬결과 비교

아무런 문제가 없을 것으로 사료된다. 수직축 자세의 경우 Fig. 18에서 나타난바와 같이 3가지 경우 모두 정렬이 정상적으로 이루어지는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 19는 Case3의 경우 정렬 모드에서 항법 모드로 변환되는 시점에서 Pitch 각을 확대한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 정렬 모드에서는 전단필터를 통과한 측정치를 이용하여 정렬을 수행하기 때문에 변화 진폭이 매우 작으나 항법 모드 진입과 동시에 진폭이 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 상황에서 문제는 항법 모드 진입시점에 따라서 정렬에서 구한 자세와 항법 모드에서 구한 자세에 차이가 발생할 수 있다는 점이다. 그림에서도 확인할 수 있듯이 정렬에서 구한 자세보다 위쪽에서 자세 진폭이 흔들리는 것을 확인할 수 있으며 이는 LINS 성능 저하의 원인이 될 수 있기 때문에 Case3을 적용하기 위해서는 이에 대한 대책이 추가로 요구된다.

다. 절점주파수 선정에 따른 정렬성능 분석

본 절에서는 정렬 루프의 절점 주파수 변화에 따른 정렬 성능을 분석한다. 앞에서 언급한 바와 같이 정렬 루프 자체가 저역통과 필터 특성을 가지고 있으므로 절점 주파수를 낮추는 것은 저역 통과 특성을 강화하는 것으로 가속도계 및 자이로 측정치에 대한 고주파 성분을 제거하고 안정적으로 정렬을 수행하기 위함이다. 정렬 루프는 150Hz 항법 계산주기로 수행되며 비교는 정렬 전 구간에서 2Hz의 절점 주파수를 가지는 경우와 정렬 수행 60초 시점에서 절점 주파수를 0.5Hz 변환하여 수행하는 경우에 대한 정렬 결과를 비교한다. 두 가지 경우에 대한 정렬 결과를 그림으로 나타내면 Fig. 20~22와 같다. 그림에서 알 수 있듯이 수평축 자세의 경우 절점 주파수를 0.5Hz로 줄이는 경우에 수평축 자세의 변화진폭이 감소하는 것을 확인할 수 있으며 이러한 결과는 수평축 결과를 이용하여 정렬을 수행하는 수직축 자세의 수렴 특성을 개선하는 효과를 가져왔다. 수평축 자세에 대한 정렬 결과인 Fig. 22에서 나타난바와 같이 절점 주파수의 감소에 따라 수평축 자세의 잡음 특성 개선으로 인하여 초기 수평축 자세의 수렴특성이 개선된 것을 확인할 수 있었다. 그러나 너무 과도하게 작은 절점 주파수를 이용하여 정렬루프를 설계하는 경우 응답속도가 너무 느려 외부 운동을 추종하지 못하여 모두 오차로 전환될 수 있으므로 이를 고려한 절점 주파수의 선정이 요구된다.

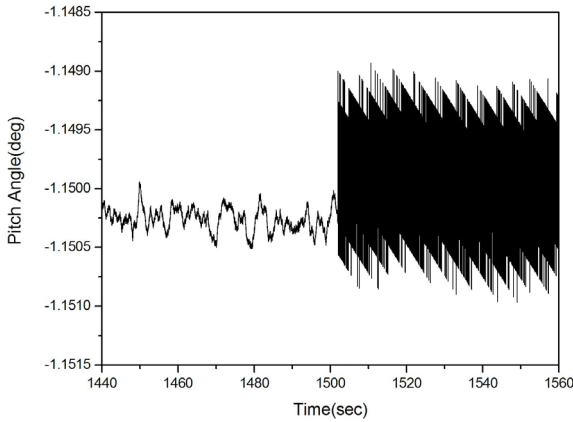


Fig. 19. Pitch 각 확대(Case3)

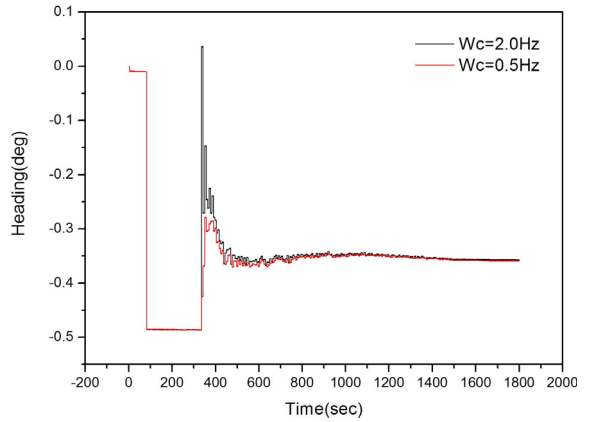


Fig. 22. Heading 각 정렬결과 비교

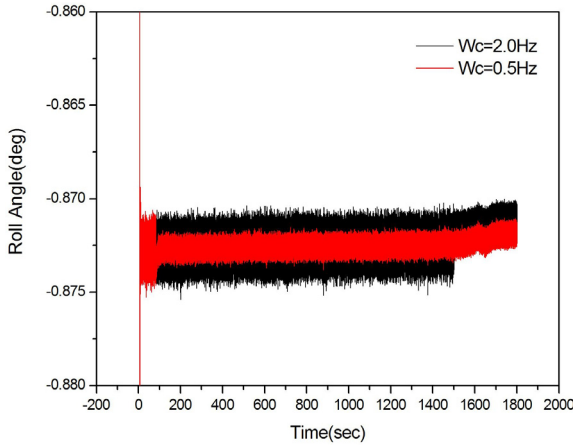


Fig. 20. Roll 각 정렬결과 비교

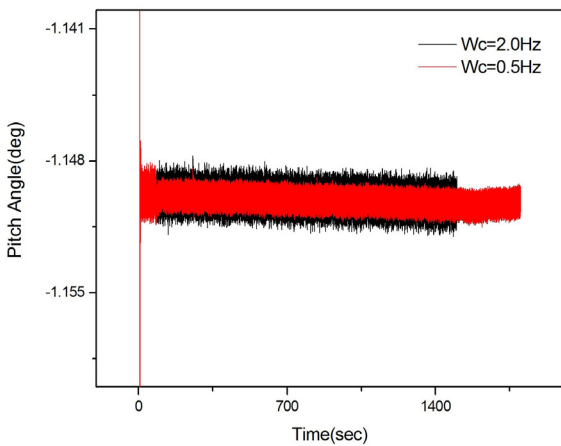


Fig. 21. Pitch 각 정렬결과 비교

5. 결론

본 논문에서는 LINS의 초기정렬에 대한 성능분석 결과를 제시하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 LINS는 광학식 자이로인 RLG를 탑재한 관성항법장치로서 일반적으로 사용되는 기계식 자이로인 DTG 혹은 광학식 자이로인 FOG를 탑재한 관성항법장치와 다르게 RLG 고유의 특성인 lock-in 영역을 제거하기 위해서 강제로 RLG에 인가되는 정현파 각속도 진동인 Dither 운동이 RLG/가속도계 측정치에 포함되어 나타난다. 이러한 Dither 운동은 LINS 관점에서 보면 불필요한 신호로 제거되어야 하나 완전한 제거가 불가능하기 때문에 LINS에 초기정렬 성능에 영향을 미칠 수 밖에 없다.

본 논문에서는 이러한 사실을 근거로 하여 Dither 운동에 의하여 RLG/가속도계 측정치에 포함되어 나타나는 정현파 운동이 항법 계산주기의 변화에 따라 LINS 초기정렬 성능에 어떠한 영향을 미치는 가를 이론적으로 분석하였으며 분석결과를 검증하기 위하여 후처리된 실측치를 이용한 시뮬레이션 수행결과를 제시하였다. 분석결과 LINS의 초기정렬 성능은 항법 계산주기에 의하여 크게 차이가 나는 것을 확인 할 수 있었다. 특히 정현파 운동의 경우 샘플링 주기에 의하여 측정치에 포함되어 나타나는 주파수 특성이 변화하기 때문에 항법 계산주기를 Dither 주파수와 유사하게 선정하는 경우 정렬에 사용되는 RLG/가속도계 측정치에 저주파 특성을 가지는 정현파 측정치가 생성되며 이는 정렬 성능을 크게 저하시키는 결과를 발생시킬 수 있음을 본 논문에서 검증하였다. 또한 초기정렬에 적

용되는 전단필터의 유무 및 절점 주파수의 변화에 따른 초기정렬 성능 분석결과를 제시하여 LINS 초기정렬 기법 설계에 대한 방향을 제시하였다.

본 논문에서 제시한 연구결과는 LINS 시스템 설계 시 측정치 샘플링 주기 선정 및 정렬기법 설계에 적용될 것으로 사료되며 향후 Stripping 기법을 적용한 RLG 측정치를 이용한 경우에 대한 초기정렬 성능분석 연구가 진행될 예정이다.

Reference

- [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] 심규민 외, "링레이저 자이로의 몸체진동 진폭 모델레이션에 의한 lock-in과 불규칙 잡음 특성 연구", 한국항공우주학회, 제29권 제1호, pp. 72~80, 2001.
- [5] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, "Discrete-Time Signal Processing", Prentice-Hall International, Inc., 1989.
- [6] Y. F. Jiang, Y. P. Lin, "Error Estimation of Ground Alignment to Arbitrary Azimuth", AIAA, 1993.
- [7] K. R. Britting, T. Palsson, "Self-Alignment Techniques for Strapdown Inertial Navigation Systems with Aircraft Application", J. Aircraft, Vol. 7, No. 4, pp. 302~307, 1968.