

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 46(11), 921-933(2018)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2018.46.11.921

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

링레이저 자이로 기반 2축 회전형 관성항법장치 오차해석에 대한 연구

김천중\*, 유해성\*\*, 이인섭\*\*, 오주현\*\*, 이상정\*\*\*

A Study on Error Analysis of Dual-Axis Rotational Inertial Navigation System Based on Ring Laser Gyroscope

Cheon-Joong Kim\*, Hae-Sung Yu\*\*, In-Seop Lee\*\*, Ju-Hyun Oh\*\* and Sang-Jeong Lee\*\*\*

Agency for Defence Development\*\*, Chungnam National University\*\*\*

ABSTRACT

There is a method to enhance the pure navigation performance of INS(Inertial Navigation System) through the rotation of inertial measurement unit to compensate error sources of inertial sensors each other and that INS using this principle of operation is called rotational INS. In this paper, the exact error analysis of rotational INS based on ring laser gyro considering the coupling effect with gravity and earth rate is performed to evaluate the navigation performance by inertial sensor error sources. And error analysis and performance evaluation result confirmed by modelling and simulation is also proposed in this paper.

초 록

관성항법장치 순수항법 성능을 개선하는 방법으로 관성센서 오차가 상호 상쇄되도록 관성센서મ치를 회전시켜 항법 성능을 개선하는 방법이 있으며 이러한 원리로 동작하는 항법장치를 회전형 관성항법장치라 한다. 관성센서 오차에 의한 회전형 관성항법장치의 정확한 항법 성능 분석을 위해서는 이에 대한 이론적 오차해석이 요구되나 기존의 많은 연구에서는 지구회전 각속도 및 중력 가속도에 의한 영향을 무시하고 오차해석을 수행하여 회전형 관성항법장치의 정확한 항법 성능 분석이 수행되지 않았다. 본 논문에서는 링레이저 자이로 기반 회전형 관성항법장치의 정확한 항법 성능 분석을 위하여 지구회전 각속도 및 중력 가속도 항을 포함한 이론적인 오차해석을 수행하고 이를 기반으로 회전형 관성항법장치의 항법 성능 분석 결과를 제시하였다.

**Key Words** : Rotational Inertial Navigation System(회전형 관성항법장치), Error Analysis(오차 해석), Performance Analysis(성능 분석), Ring Laser Gyro(링레이저 자이로)

1. 서 론

관성항법장치의 항법 성능은 자이로와 가속도

계 같은 관성센서 성능에 의해 결정된다[1,2,3,4].  
 그러므로 관성항법장치의 항법 성능을 개선하기  
 위해서는 정밀한 관성센서를 적용하여야 한다.

† Received : July 11, 2018      Revised : October 5, 2018      Accepted : October 11, 2018

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

그러나 정밀한 관성센서 개발이 쉽지 않고 개발하는 과정에 많은 시간과 비용이 들기 때문에 관성센서 오차요소가 상쇄되도록 관성센서무치를 회전하여 항법 성능을 개선하는 방법에 대한 많은 연구가 진행되고 있다[7-14,18-26]. 이와 같은 원리를 이용하여 항법 성능을 개선하는 관성항법장치를 미국에서는 SISUR (Strapdown Inertial Sensor Unit Rotation)이라 하며 1970년대에 SISUR에 대한 이론적인 원리가 정립되었다[7-14]. 그리고 1970년대에 기계식 자이로인 ESG (Electrostatically Supported Gyro)를 적용한 SISUR이 개발되어 전략급 잠수함의 항법장치로 사용된 것으로 보고되고 있다[14,16,17]. 그러나 기계식 자이로인 ESG의 단점을 보완해줄 광학식 자이로의 등장으로 1980년대에는 링 레이저 자이로(RLG: Ring Laser Gyro)[9-12], 1990년대 중 후반에는 FOG(Fiber Optic Gyro)를 탑재한 SISUR이[14,16,17] 개발된 것으로 보고되고 있다. 이러한 미국의 SISUR 개발 관련 풍부한 개발 경험을 바탕으로 개발된 MK-49(혹은 AN/WSN-7) 항법장치가 현재 전 세계 전략급 함정의 항법장치로 사용되고 있는 것으로 알려져 있다[5,6]. MK-49의 공식적으로 알려진 성능규격은 1nm/24hr인[5] 것으로 나타났으나 연구 논문에서 나타난 자료를 보면 1nm/2weeks 이상의 성능을 [13,15] 가지고 있는 것으로 기술되어 있어 현재 이 제품의 실제적인 항법 성능의 정확한 수치는 알려져 있지 않은 것으로 보는 것이 타당하다 하겠다.

2010년 전·후부터 중국에서 미국의 SISUR과 동일한 동작 원리를 가지나 회전형 관성항법장치 (Rotational Inertial Navigation System) 라는 개념으로 이에 대한 많은 연구가 진행되고 있다 [18~26]. 중국에서 발행된 회전형 관성항법장치 관련 최신 연구 자료를 보면 1nm/1week 항법 성능에 도달한 것으로 나타나고 있다[26]. 이는 미국의 연구결과에서 발표된 항법 성능에는 미치지 못하나 관련 기술의 엄청난 연구를 통한 급성장으로 조만간 미국과 동등한 항법 성능을 보유한 회전형 관성항법장치가 중국에서도 개발될 것으로 판단된다.

지금까지 회전형 관성항법장치 혹은 SISUR 관련 기본적인 원리 및 기술 발전 배경에 대해서 기술하였다. 회전형 관성항법장치 관련 현재까지의 연구 결과를 검토해 보면 미국의 경우 SISUR 관련 상세 설계 및 해석 관련 연구내용이 포함되어 있지 않고 기본 원리 및 시험결과 위주로 연구결과가 발표되어 SISUR의 자세한

설계 내용을 파악하기가 어려운 실정이다[7-17]. 최근 중국에서 발표된 연구내용은 관성센서 오차요소가 관성센서무치 회전을 통하여 상호 완전히 상쇄되도록 회전 절차를 정하는 문제와 지구 회전 각속도/중력에 의한 커플링 효과를 무시하고 좌표변환된 관성센서 오차를 가지고 항법 좌표계에서의 간단한 오차해석을 통하여 실제 관성센서 오차요소가 상호 상쇄되는 가를 16 회전[18]이나 32 회전[19] 절차로 혹은 연속형[23] 회전 절차로 확인하는 연구가 주로 진행되었다. 또한 관성센서 오차 이외에 회전형 관성항법장치를 구성하면서 발생하는 장착각 오차[20] 및 회전중 편심[21]에 의한 오차 분석 및 시험 결과, 교정[24,26] 관련 연구결과가 제시되었다. 그러나 지구 회전 각속도/중력을 무시하고 항법 좌표계에서의 오차해석 결과는 간단한 가감승제 및 적분만을 통하여 가능하므로 정확한 항법 오차해석이라 할 수 없다. 그러므로 회전형 관성항법장치 항법 성능 분석을 위해서는 이론적인 항법 오차해석이 필요하다 하겠다. 또한 요구되는 목표 성능을 만족하는 회전형 관성항법장치 시스템을 설계하기 위해서는 관성 센서 오차, 회전으로 상쇄되는 오차, 회전 중 발생하여 상쇄되지 전까지 남아 있는 오차 등의 영향을 이론적으로 분석할 필요가 있다. 이에 본 논문에서는 링레이저 자이로 기반의 회전형 관성항법장치에 대한 이론적인 항법 오차해석을 통하여 회전형 관성항법장치의 회전 절차가 항법 오차에 미치는 영향, 관성센서 오차요소가 회전형 관성항법장치 항법 성능에 미치는 영향, 회전형 관성항법장치 성능규격을 만족하기 위한 관성센서 오차규격 설정방법 등에 대한 연구결과를 제시한다. 본 논문의 구성은 2장에서 회전형 관성항법장치의 동작원리 및 관성센서 오차모델을 3장에서는 회전형 관성항법장치 오차해석 결과를 4장에서는 3장의 오차해석 결과의 타당성을 검증하기 위한 시뮬레이션 결과를 기술하고 5장에서 본 논문의 결론을 기술하도록 한다.

## II. 2축 회전형 관성항법장치 원리 및 관성센서 오차 모델

### 2.1 2축 회전형 관성항법장치 원리

회전형 관성항법장치는 관성센서 오차요소가 상호 상쇄되도록 일정한 순서로 관성센서무치를 회전하여 항법 성능을 개선하는 관성항법장치이다. 이를 수식으로 증명하기 위하여 관성항법장치 속도 및 자세 오차 방정식  $\delta \dot{v}^n$ ,  $\dot{\epsilon}$ 을 유도하면 식 (1), (2)와 같다[1-4].

$$\dot{\delta v}^n = -\epsilon \times f^n + C_b^n \delta f^b - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times \delta v^n + \delta g^n \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon} = -\omega_{in}^n \times \epsilon + \delta \omega_{in}^n + C_b^n \delta \omega_{ib}^b \quad (2)$$

식 (1)-(2)에서 초기 자세가 모두 영이라고 가정하면 동체 좌표계(b-frame)에서 항법 좌표계(n-frame)로의 좌표변환행렬  $C_b^n$ 은 단위 행렬이 된다. 이 상태에서 일정시간 경과 후 방위각을 180도 회전하면 좌표변환행렬  $C_b^n$ 의 x, y축 대각행렬 성분이 -1이 된다. 이 상태에서 일정 시간이 경과하면 방위각 0도 때의 관성센서 오차 성분( $\delta f^b$ 는 동체 좌표계에서의 가속도계 오차,  $\delta \omega_{ib}^b$ 는 동체 좌표계에서의 자이로 오차)과 방위각 180도 때의 관성센서 오차 성분이 상쇄되어 수평축 관성센서 오차 성분이 모두 상쇄되는 효과를 나타나게 된다. 이러한 원리로 3축의 관성센서 오차 성분이 모두 상쇄되도록 회전 절차를 설계하여 운용하는 것이 회전형 관성항법장치 동작원리이다[7-14,18-26].

## 2.2 관성센서 오차 모델

본 장에서는 관성항법장치에서 사용되는 RLG 및 가속도계의 오차모델에 대해서 기술한다.

### 2.2.1 가속도계 오차 모델

가속도계의 오차 모델은 바이어스 오차와 척도계수 오차 그리고 비정렬 오차로 나타낼 수 있다. 이를 식으로 나타내면 식 (3)과 같다[1-4].

$$\delta f^b = B^a(T) + k_s^a(T) f^b + \Delta C_b^a(T) f^b + w^a \quad (3)$$

여기서,

$$B^a(T)^T = [A_{bx}(T) \ A_{by}(T) \ A_{bz}(T)]^T,$$

$$k_s^a(T) = \begin{bmatrix} Asf_{xx}(T) & 0 & 0 \\ 0 & Asf_{yy}(T) & 0 \\ 0 & 0 & Asf_{zz}(T) \end{bmatrix},$$

$$\Delta C_a^b = \begin{bmatrix} 0 & Asf_{xy}(T) & Asf_{xz}(T) \\ Asf_{yx}(T) & 0 & Asf_{yz}(T) \\ Asf_{zx}(T) & Asf_{zy}(T) & 0 \end{bmatrix}$$

위 식에서  $Asf_{ij}$ 는 k축 방향으로 i, j축간 회전한 비정렬 각,  $B^a$ 는 가속도계 바이어스 오차,  $k_s^a$ 는 가속도계 척도계수 오차,  $\Delta C_a^b$ 는 가속도계 비정렬 오차,  $w^a$ 는 백색잡음,  $T$ 는 가속도계 온도이다. 식 (3)에서 가속도계 바이어스 오차, 척도계수 오차 및 비정렬 오차는 랜덤 상수로 가정한다.

### 2.2.2 RLG 오차 모델

RLG의 오차요소는 바이어스 오차, 척도계수

오차, 비정렬 오차 및 동적 비정렬(flexure) 오차 등이 있으며 식 (4)와 같이 모델링 된다[1-4].

$$\delta \omega_{ib}^b = B^g(T) + k_s^g(T) \omega_{ib}^b + \Delta C_b^g(T) \omega_{ib}^b + \Delta \Omega(\Delta C_g^b, f^b, \omega_{ib}^b, T) + w^g \quad (4)$$

여기서,

$$B^g(T)^T = [G_{bx}(T) \ G_{by}(T) \ G_{bz}(T)]^T,$$

$$k_s^g(T) = \begin{bmatrix} Gsf_{xx}(T) & 0 & 0 \\ 0 & Gsf_{yy}(T) & 0 \\ 0 & 0 & Gsf_{zz}(T) \end{bmatrix},$$

$$\Delta C_g^b = \begin{bmatrix} 0 & Gsf_{xy}(T) & Gsf_{xz}(T) \\ Gsf_{yx}(T) & 0 & Gsf_{yz}(T) \\ Gsf_{zx}(T) & Gsf_{zy}(T) & 0 \end{bmatrix}.$$

위 식에서  $Gsf_{ij}$ 는 k축 방향으로 i, j축간 회전한 비정렬 각,  $B^g$ 는 자이로 바이어스 오차,  $k_s^g$ 는 자이로 척도계수 오차,  $\Delta C_b^g$ 는 자이로 비정렬 오차,  $w^g$ 는 백색잡음,  $\Delta \Omega(\cdot)$ 는 동적 비정렬 오차,  $T$ 는 자이로 온도이다.

RLG의 공진기내에는 서로 반대 방향으로 진행되는 두 광파가 동시에 존재하며 자이로의 회전에 의해 유도되는 두 광파사이의 작은 주파수 차이를 검출함으로써 자이로의 회전을 측정하게 된다. 그러나 광로를 구성하는 반사경의 결함으로 인한 후방산란 때문에 자이로의 작은 회전 각속도 영역에서는 출력이 생기지 않는 주파수 일치화(Lock-in) 현상이 생기게 되며 이 현상을 제거하기 위하여 동작 중에 RLG의 입력 축에 정현파의 각 변위를 인가하는 dithering을 하게 된다. 동적 비정렬 오차는 이 dither구조의 유연성 때문에 생기는 오차로서 입력 각속도에 비례하여 발생하는 비정렬 오차이다. 식 (4)에서 자이로 바이어스 오차, 척도계수 오차, 비정렬 오차 및 동적 비정렬 오차를 랜덤 상수로 가정한다.

## III. 2축 회전형 관성항법장치 오차해석

본 장에서는 2축 회전형 관성항법장치의 오차 해석 결과를 기술한다.

### 3.1 2축 회전형 관성항법장치 회전 절차

회전형 관성항법장치 오차해석을 수행하기 위한 회전형 관성항법장치의 회전 절차는 참고문헌에서 제시한 회전 절차를 기준으로 오차해석을 수행하였다. 참고문헌 [18]에서 제시한 회전 절차는 총 16회의 정지(Stop) 및 회전(Rotation)을 반복하는 절차로 구성되며 이를 그림으로 나타내면

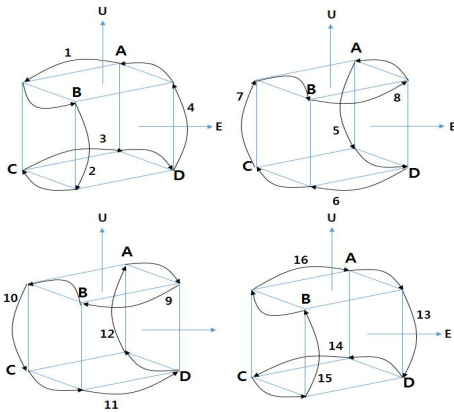


Fig. 1. Stop/Rotation Sequences of Rotational INS

Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 E는 east축을 의미하며 롤(roll) 방향을 U는 up축을 의미하며 요(yaw) 방향, 1-16은 회전 순서를 A-D는 회전 후 자세를 나타낸다. 예를 들어 A의 자세는 동체 좌표계와 항법 좌표계가 일치하는 자세를 나타내며 B는 요 방향으로 180도 회전한 자세를 나타낸다. 그리고 Fig. 1에서 각 회전 절차의 회전 속도는 12 deg/sec로 15초간 회전하고 30초간 정지를 반복하는 회전 절차로 구성된다. Fig. 1의 회전 절차는 총 16회의 정지/회전 절차를 그림으로 나타낸 것이며 9-16의 회전 절차는 관성센서 척도계수 비대칭 오차의 상쇄를 위해서 추가되는 정지/회전 절차로 1-8의 회전 절차 대비 회전 방향만 다르게 구성된다. 따라서 정지구간에서의 관성센서 오차의 경우 1-8 및 9-16 회전 절차의 자세가 동일하게 반복되기 때문에 항법 오차에 동일한 영향을 미치나 회전 구간에서의 관성센서 오차의 경우 회전 방향이 달라 한 주기가 완료되어야 항법 오차의 영향성에 대한 분석이 가능하다. 정지/회전 시간을 고려하여 한 주기의 회전 절차 완료에 필요한 시간을 계산하면 720초이다.

### 3.2 2축 회전형 관성항법장치 관성센서 오차 모델

#### 3.2.1 RLG 바이어스 오차 모델

2장에서 기술한 관성센서 오차모델에서 3.1절에서 기술한 회전형 관성항법장치 정지/회전 절차에 의해 항법 좌표계로 좌표변환된 자이로 바이어스 오차를 구하여 표로 정리하면 Table 1과 같다. Table 1에서 회전형 관성항법장치 자이로 바이어스 오차는 1~16 정지/회전 구간에 대하여 정리한 내용이다. 표에서 알 수 있듯이 1-8 정지구간에서의 자이로 바이어스는 9-16 정지구간에서의 값과 동일하나 회전 구간의 경우 1-8과

9-16 회전 구간의 회전 방향이 반대가 되기 때문에 Table 1의 회전구간에서 계산된 자이로 바이어스 값의 sine 성분 부호만 반대로 해주면 회전 구간에서의 자이로 바이어스 값이 계산된다. Table 1에서  $G_{bx}$ ,  $G_{by}$ ,  $G_{bz}$ 는 랜덤상수 자이로 바이어스 오차를  $w_R$ 은 회전 속도를 의미한다.

Table 1에서 정리된 바와 같이 정지 및 회전 절차에 따라 변하는 자이로 바이어스 오차를 단위 함수(unit function) 및 정현과 함수를 이용하여 회전 절차 반주기 구간인 360초 동안 항법 좌표계에서의 e(east), n(north), u(up)축 자이로 바이어스를 수식으로 나타내면 식 (5)~(7)과 같다.

$$G_{re} = G_{bx} \times [u(t) - u(t-30) - u(t-45) + u(t-120) + u(t-135) - u(t-255) - u(t-270) + u(t-345) + \cos(w_R(t-30)) \times (u(t-30) - u(t-45)) - \cos(w_R(t-120)) \times (u(t-120) - u(t-135)) + \cos(w_R(t-255)) \times (u(t-255) - u(t-270)) - \cos(w_R(t-345)) \times (u(t-345) - u(t-360))] + G_{by} \times [\sin(w_R(t-30)) \times (-u(t-30) + u(t-45)) + \sin(w_R(t-120)) \times (u(t-120) - u(t-135)) - \sin(w_R(t-255)) \times (u(t-255) - u(t-270)) + \sin(w_R(t-345)) \times (u(t-345) - u(t-360))] \quad (5)$$

$$G_{rn} = G_{by} \times [u(t) - u(t-30) - u(t-45) + u(t-75) + u(t-90) - u(t+120) - u(t-135) + u(t-165) + u(t-180) - u(t-210) - u(t-225) + u(t+255) + u(t-270) - u(t-300) - u(t-315) + u(t-345) + \cos(w_R(t-30)) \times (u(t-30) - u(t-45)) - \cos(w_R(t-75)) \times (u(t-75) - u(t-90)) + \cos(w_R(t-120)) \times (u(t-120) - u(t-135)) - \cos(w_R(t-165)) \times (u(t-165) - u(t-180)) + \cos(w_R(t-210)) \times (u(t-210) - u(t-225)) - \cos(w_R(t-255)) \times (u(t-255) - u(t-270)) + \cos(w_R(t-300)) \times (u(t-300) - u(t-315)) - \cos(w_R(t-345)) \times (u(t-345) - u(t-360))] + G_{bx} \times [\sin(w_R(t-30)) \times (u(t-30) - u(t-45)) + \sin(w_R(t-120)) \times (u(t-120) - u(t-135)) - \sin(w_R(t-255) \quad (6)$$

$$G_{ru} = G_{bz} \times [u(t) - u(t-75) - u(t-90) + u(t-165) - u(t-180) - u(t-210) - u(t-225) + u(t-300) + u(t-315) - u(t-360) + \cos(w_R(t-75)) \times (u(t-75) - u(t-90)) - \cos(w_R(t-165)) \times (u(t-165) - u(t-180)) + \cos(w_R(t-210)) \times (u(t-210) - u(t-225)) - \cos(w_R(t-300)) \times (u(t-300) - u(t-315))] + G_{by} \times [\sin(w_R(t-75)) \times (-u(t-75) + u(t-90)) + \sin(w_R(t-165)) \times (u(t-165) - u(t-180)) - \sin(w_R(t-210)) \times (u(t-210) - u(t-225)) + \sin(w_R(t-300)) \times (u(t-300) - u(t-315))] \quad (7)$$

회전형 관성항법장치 정지/회전 반 주기에 대한 자이로 바이어스 수식 (5)~(7)을 일반화하기 위해서 시간이 경과함에 따라 정지/회전 주기가 반복됨을 고려하여 식을 새로이 유도하여야 한

Table 1. Gyro Bias Error of Rotational INS

Sequence	e-axis bias	n-axis bias	u-axis bias
Stop 1	$G_{bx}$	$G_{by}$	$G_{bz}$
Rotation 1	$\cos(w_R t)G_{bx} - \sin(w_R t)G_{by}$	$\sin(w_R t)G_{bx} + \cos(w_R t)G_{by}$	$G_{bz}$
Stop 2	$-G_{bx}$	$-G_{by}$	$G_{bz}$
Rotation 2	$-G_{bx}$	$-\cos(w_R t)G_{by} - \sin(w_R t)G_{bz}$	$-\sin(w_R t)G_{by} + \cos(w_R t)G_{bz}$
Stop 3	$-G_{bx}$	$G_{by}$	$-G_{bz}$
Rotation 3	$-\cos(w_R t)G_{bx} + \sin(w_R t)G_{by}$	$\sin(w_R t)G_{bx} + \cos(w_R t)G_{by}$	$-G_{bz}$
Stop 4	$G_{bx}$	$-G_{by}$	$-G_{bz}$
Rotation 4	$G_{bx}$	$-\cos(w_R t)G_{by} - \sin(w_R t)G_{bz}$	$\sin(w_R t)G_{by} - \cos(w_R t)G_{bz}$
Stop 5	$G_{bx}$	$G_{by}$	$G_{bz}$
Rotation 5	$G_{bx}$	$\cos(w_R t)G_{by} + \sin(w_R t)G_{bz}$	$-\sin(w_R t)G_{by} + \cos(w_R t)G_{bz}$
Stop 6	$G_{bx}$	$-G_{by}$	$-G_{bz}$
Rotation 6	$\cos(w_R t)G_{bx} - \sin(w_R t)G_{by}$	$-\sin(w_R t)G_{bx} - \cos(w_R t)G_{by}$	$-G_{bz}$
Stop 7	$-G_{bx}$	$G_{by}$	$-G_{bz}$
Rotation 7	$-G_{bx}$	$\cos(w_R t)G_{by} + \sin(w_R t)G_{bz}$	$\sin(w_R t)G_{by} - \cos(w_R t)G_{bz}$
Stop 8	$-G_{bx}$	$-G_{by}$	$G_{bz}$
Rotation 8	$-\cos(w_R t)G_{bx} + \sin(w_R t)G_{by}$	$-\sin(w_R t)G_{bx} - \cos(w_R t)G_{by}$	$G_{bz}$
Stop 9	$G_{bx}$	$G_{by}$	$G_{bz}$
Rotation 9	$\cos(w_R t)G_{bx} + \sin(w_R t)G_{by}$	$-\sin(w_R t)G_{bx} + \cos(w_R t)G_{by}$	$G_{bz}$
Stop 10	$-G_{bx}$	$-G_{by}$	$G_{bz}$
Rotation 10	$-G_{bx}$	$-\cos(w_R t)G_{by} + \sin(w_R t)G_{bz}$	$\sin(w_R t)G_{by} + \cos(w_R t)G_{bz}$
Stop 11	$-G_{bx}$	$G_{by}$	$-G_{bz}$
Rotation 11	$-\cos(w_R t)G_{bx} - \sin(w_R t)G_{by}$	$-\sin(w_R t)G_{bx} + \cos(w_R t)G_{by}$	$-G_{bz}$
Stop 12	$G_{bx}$	$-G_{by}$	$-G_{bz}$
Rotation 12	$G_{bx}$	$-\cos(w_R t)G_{by} + \sin(w_R t)G_{bz}$	$-\sin(w_R t)G_{by} - \cos(w_R t)G_{bz}$
Stop 13	$G_{bx}$	$G_{by}$	$G_{bz}$
Rotation 13	$G_{bx}$	$\cos(w_R t)G_{by} - \sin(w_R t)G_{bz}$	$\sin(w_R t)G_{by} + \cos(w_R t)G_{bz}$
Stop 14	$G_{bx}$	$-G_{by}$	$-G_{bz}$
Rotation 13	$\cos(w_R t)G_{bx} + \sin(w_R t)G_{by}$	$\sin(w_R t)G_{bx} - \cos(w_R t)G_{by}$	$-G_{bz}$
Stop 15	$-G_{bx}$	$G_{by}$	$-G_{bz}$
Rotation 15	$-G_{bx}$	$\cos(w_R t)G_{by} - \sin(w_R t)G_{bz}$	$-\sin(w_R t)G_{by} - \cos(w_R t)G_{bz}$
Stop 16	$-G_{bx}$	$-G_{by}$	$G_{bz}$
Rotation 16	$-\cos(w_R t)G_{bx} - \sin(w_R t)G_{by}$	$\sin(w_R t)G_{bx} - \cos(w_R t)G_{by}$	$G_{bz}$

다. 이를 위하여 식 (5)에 대한 일반화된 수식을 우선적으로 유도하기 위하여 식 (5)에서 랜덤 상수인 자이로 바이어스  $G_{bx}$ ,  $G_{by}$ 와 곱해지는 계수항을 단위 함수만으로 구성되는 성분, cosine 함수와 곱해지는 성분, sine 함수와 곱해지는 성분

으로 구분하여 일반화된 식을 유도하면 식 (8)~(10)이 유도된다. 식 (8), (9)에서 나타난 바와 같이 회전 방향에 관계없이 일정한 값을 가지는 상수항과 cosine 항은 회전 반주기인 360초마다 반복되는 식의 합으로 구성된다. 그러나 회전 방향

에 따라 부호가 달라지는 sine 항의 경우 회전 주기인 720초마다 반복되는 식의 합으로 구성됨이 식 (10)에 나타나 있다. 식 (8)~(10)에서  $n$ 은 16회전절차를 수행한 횟수를 의미한다.

$$u_e(t) = \sum_{i=0}^n [u(t-i \times 360) - u(t-30-i \times 360) - u(t-45-i \times 360) + u(t-120-i \times 360) + u(t-135-i \times 360) - u(t-255-i \times 360) - u(t-270-i \times 360) + u(t-345-i \times 360)] \quad (8)$$

$$u_{ce}(t) = \sum_{i=0}^n [\cos(w_R(t-30-i \times 360)) \times (u(t-30-i \times 360) - u(t-45-i \times 360)) - \cos(w_R(t-120-i \times 360)) \times (u(t-120-i \times 360) - u(t-135-i \times 360)) + \cos(w_R(t-255-i \times 360)) \times (u(t-255-i \times 360) - u(t-270-i \times 360)) - \cos(w_R(t-345-i \times 360)) \times (u(t-345-i \times 360) - u(t-360-i \times 360))] \quad (9)$$

$$u_{se}(t) = \sum_{i=0}^n [\sin(w_R(t-30-i \times 720)) \times (-u(t-30-i \times 720) + u(t-45-i \times 720)) + \sin(w_R(t-120-i \times 720)) \times (u(t-120-i \times 720) - u(t-135-i \times 720)) - \sin(w_R(t-255-i \times 720)) \times (u(t-255-i \times 720) - u(t-270-i \times 720)) + \sin(w_R(t-345-i \times 720)) \times (u(t-345-i \times 720) - u(t-360-i \times 720)) + \sin(w_R(t-390-i \times 720)) \times (u(t-390-i \times 720) - u(t-405-i \times 720)) - \sin(w_R(t-380-i \times 720)) \times (u(t-380-i \times 720) - u(t-395-i \times 720)) + \sin(w_R(t-615-i \times 720)) \times (u(t-615-i \times 720) - u(t-630-i \times 720))] \quad (10)$$

회전 절차 반주기에 대한  $e$ 축 자이로 바이어스 인 식 (5)을 시간이 경과함에 따라 변하는 경우에 대한 일반화된 계수인 식 (8)~(10)과 랜덤 상수인 자이로 바이어스  $G_{bx}$ ,  $G_{by}$ 을 이용하여 회전형 관성항법장치의  $e$ 축 자이로 바이어스의 일반화된 식을 유도하면 식 (11)과 같다.

$$G_{re}(t) = G_{bx} \times [u_e(t) + u_{ce}(t)] + G_{by} \times u_{se}(t) \quad (11)$$

식 (11)에서  $G_{re}(t)$ 는 동체 좌표계에서의 자이로 바이어스에 의해 발생된 회전형 관성항법장치  $e$ 축 자이로 바이어스를 의미한다.

식 (11)이 유도된 방법과 동일한 방식을 이용하여 회전형 관성항법장치의  $n$ ,  $u$ 축 자이로 바이어스의 일반화된 식의 유도가 가능하기 때문에 본 논문에서 이에 대한 추가적인 유도과정은 생략하도록 하겠다.

### 3.2.2 RLG 척도계수 및 비정렬 오차 모델

자이로 바이어스 오차 성분 외에 관성센서장치 회전에 의해 발생하는 오차성분인 척도계수 및 비정렬 오차를 랜덤상수라 가정하여 회전 구간에 대한 항법 좌표계에서의 오차를 구하여 정리하면 Table 2와 같다.

Table 2에서 나타난 바와 같이 모든 척도계수 및 비정렬 오차요소에 대하여 수식을 유도하기에는 너무 많은 지면이 요구되므로 본 논문에서는 9개의 척도계수 및 비정렬 오차요소 중  $Gsf_{xz}$ 에 의한 오차 해석을 우선적으로 수행한다.  $Gsf_{xz}$ 의 다른 오차요소에 대한 오차해석 방법은  $Gsf_{xz}$  오차요소에 대한 오차해석 방법과 동일하므로 필요시 동일한 방법으로 오차해석이 가능하다. 따라서  $Gsf_{xz}$ 의 다른 오차요소에 대한 오차해석을 본 논문에서 기술하지 않더라도 논문의 연구 목적에 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

비정렬 오차인  $Gsf_{xz}$ 에 의해 발생하는 자이로 오차를 단위함수 등을 이용하여 유도 하면 식 (12), (13)과 같다. 식 (12)는 Table 2에서 회전구간에서  $Gsf_{xz}$ 에 의해 발생되며 cosine 함수와 곱해지는 성분을, 식 (13)은 sine 함수와 곱해지는 성분을 단위함수를 이용하여 정리한 식이다. 식 (12), (13)은 회전형 관성항법장치 회전 절차에 의해 발생하는 회전 각속도는 상수이고 비정렬 오차  $Gsf_{xz}$ 는 랜덤상수라 가정하여 유도된 식이다.

$$u_{ce}(t) = \sum_{i=0}^n [\cos(w_R(t-30-i \times 720)) \times (u(t-30-i \times 720) - u(t-45-i \times 720)) - \cos(w_R(t-120-i \times 720)) \times (u(t-120-i \times 720) - u(t-135-i \times 720)) + \cos(w_R(t-255-i \times 720)) \times (u(t-255-i \times 720) - u(t-270-i \times 720)) - \cos(w_R(t-345-i \times 720)) \times (u(t-345-i \times 720) - u(t-360-i \times 720)) - \cos(w_R(t-390-i \times 720)) \times (u(t-390-i \times 720) - u(t-405-i \times 720)) + \cos(w_R(t-480-i \times 720)) \times (u(t-480-i \times 720) - u(t-495-i \times 720)) - \cos(w_R(t-615-i \times 720)) \times (u(t-615-i \times 720) - u(t-630-i \times 720))] \quad (12)$$

$$u_{sn}(t) = \sum_{i=0}^n [\sin(w_R(t-30-i \times 720)) \times (u(t-30-i \times 720) - u(t-45-i \times 720)) + \sin(w_R(t-120-i \times 720)) \times (u(t-120-i \times 720) - u(t-135-i \times 720)) - \sin(w_R(t-255-i \times 720)) \times (u(t-255-i \times 720) - u(t-270-i \times 720)) - \sin(w_R(t-345-i \times 720)) \times (u(t-345-i \times 720) - u(t-360-i \times 720)) + \sin(w_R(t-390-i \times 720)) \times (u(t-390-i \times 720) - u(t-405-i \times 720)) - \sin(w_R(t-480-i \times 720)) \times (u(t-480-i \times 720) - u(t-495-i \times 720)) - \sin(w_R(t-615-i \times 720)) \times (u(t-615-i \times 720) - u(t-630-i \times 720))] \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & \sin(w_R(t-345-i \times 720)) \times \\ & (u(t-345-i \times 720) - u(t-360-i \times 720)) + \\ & \sin(w_R(t-390-i \times 720)) \times \\ & (u(t-390-i \times 720) - u(t-405-i \times 720)) + \\ & \sin(w_R(t-480-i \times 720)) \times \\ & (u(t-480-i \times 720) - u(t-495-i \times 720)) - \\ & \sin(w_R(t-615-i \times 720)) \times \\ & (u(t-615-i \times 720) - u(t-630-i \times 720)) - \\ & \sin(w_R(t-705-i \times 720)) \times \\ & (u(t-705-i \times 720) - u(t-720-i \times 720)) \end{aligned}$$

식 (12), (13)과 회전 각속도  $w_R$  및 비정렬 오차  $Gsf_{xz}$ 의 크기를 고려하여 자이로 바이어스 오차형태로 변환이 가능하며 이를 수식을 나타내면 식 (14), (15)와 같다. 식 (14), (15)는 회전 각속도가 인가되어 비정렬 오차에 의해 발생하는 자이로 오차가 자이로 바이어스 오차와 동일한 형태로 표현 가능함을 보여주는 식으로 자이로 바이어스 오차에 대한 오차해석 방법과 동일한 방법으로 오차해석이 가능함을 증명하는 식이라 하겠다.

$$G_{re}(t) = Gsf_{xz} \times w_R \times u_{ce}(t) \quad (14)$$

$$G_{rn}(t) = Gsf_{xz} \times w_R \times u_{sn}(t) \quad (15)$$

식 (14), (15)에서  $G_{re}(t)$ ,  $G_{rn}(t)$ 은 동체 좌표계에서의 비정렬 오차  $Gsf_{xz}$ 에 의해 발생한 회전형 관성항법장치 e, n축 자이로 바이어스를 의미한다.

**Table 2. Gyro Scale Factor and Misalignment Error of Rotational INS**

Seq.	axis	scale factor and misalignment error	time (sec)
Rot. 1	e	$\cos(w_R t) Gsf_{xz} w_R - \sin(w_R t) Gsf_{yz} w_R$	30
	n	$\sin(w_R t) Gsf_{xz} w_R + \cos(w_R t) Gsf_{yz} w_R$	~
	u	$Gsf_{zz} w_R$	45
Rot. 2	e	$Gsf_{xx} w_R$	75
	n	$\cos(w_R t) Gsf_{yx} w_R + \sin(w_R t) Gsf_{zx} w_R$	~
	u	$\sin(w_R t) Gsf_{yx} w_R - \cos(w_R t) Gsf_{zx} w_R$	90
Rot. 3	e	$-\cos(w_R t) Gsf_{xz} w_R + \sin(w_R t) Gsf_{yz} w_R$	120
	n	$\sin(w_R t) Gsf_{xz} w_R + \cos(w_R t) Gsf_{yz} w_R$	~
	u	$-Gsf_{zz} w_R$	135
Rot. 4	e	$-Gsf_{xx} w_R$	165
	n	$\cos(w_R t) Gsf_{yx} w_R + \sin(w_R t) Gsf_{zx} w_R$	~
	u	$-\sin(w_R t) Gsf_{yx} w_R + \cos(w_R t) Gsf_{zx} w_R$	180
Rot. 5	e	$-Gsf_{xx} w_R$	210
	n	$-\cos(w_R t) Gsf_{yx} w_R - \sin(w_R t) Gsf_{zx} w_R$	~
	u	$\sin(w_R t) Gsf_{yx} w_R - \cos(w_R t) Gsf_{zx} w_R$	225

Rot. 6	e	$\cos(w_R t) Gsf_{xz} w_R - \sin(w_R t) Gsf_{yz} w_R$	255
	n	$-\sin(w_R t) Gsf_{xz} w_R - \cos(w_R t) Gsf_{yz} w_R$	~
	u	$-Gsf_{zz} w_R$	270
Rot. 7	e	$Gsf_{xx} w_R$	300
	n	$-\cos(w_R t) Gsf_{yx} w_R - \sin(w_R t) Gsf_{zx} w_R$	~
	u	$-\sin(w_R t) Gsf_{yx} w_R + \cos(w_R t) Gsf_{zx} w_R$	315
Rot. 8	e	$-\cos(w_R t) Gsf_{xz} w_R + \sin(w_R t) Gsf_{yz} w_R$	345
	n	$-\sin(w_R t) Gsf_{xz} w_R - \cos(w_R t) Gsf_{yz} w_R$	~
	u	$Gsf_{zz} w_R$	360
Rot. 9	e	$-\cos(w_R t) Gsf_{xz} w_R - \sin(w_R t) Gsf_{yz} w_R$	390
	n	$\sin(w_R t) Gsf_{xz} w_R - \cos(w_R t) Gsf_{yz} w_R$	~
	u	$-Gsf_{zz} w_R$	405
Rot. 10	e	$-Gsf_{xx} w_R$	435
	n	$-\cos(w_R t) Gsf_{yx} w_R + \sin(w_R t) Gsf_{zx} w_R$	~
	u	$\sin(w_R t) Gsf_{yx} w_R + \cos(w_R t) Gsf_{zx} w_R$	450
Rot. 11	e	$\cos(w_R t) Gsf_{xz} w_R + \sin(w_R t) Gsf_{yz} w_R$	480
	n	$\sin(w_R t) Gsf_{xz} w_R - \cos(w_R t) Gsf_{yz} w_R$	~
	u	$Gsf_{zz} w_R$	495
Rot. 12	e	$Gsf_{xx} w_R$	525
	n	$-\cos(w_R t) Gsf_{yx} w_R + \sin(w_R t) Gsf_{zx} w_R$	~
	u	$-\sin(w_R t) Gsf_{yx} w_R - \cos(w_R t) Gsf_{zx} w_R$	540
Rot. 13	e	$Gsf_{xx} w_R$	570
	n	$\cos(w_R t) Gsf_{yx} w_R - \sin(w_R t) Gsf_{zx} w_R$	~
	u	$\sin(w_R t) Gsf_{yx} w_R + \cos(w_R t) Gsf_{zx} w_R$	585
Rot. 14	e	$-\cos(w_R t) Gsf_{xz} w_R - \sin(w_R t) Gsf_{yz} w_R$	615
	n	$-\sin(w_R t) Gsf_{xz} w_R + \cos(w_R t) Gsf_{yz} w_R$	~
	u	$Gsf_{zz} w_R$	630
Rot. 15	e	$-Gsf_{xx} w_R$	660
	n	$\cos(w_R t) Gsf_{yx} w_R - \sin(w_R t) Gsf_{zx} w_R$	~
	u	$-\sin(w_R t) Gsf_{yx} w_R - \cos(w_R t) Gsf_{zx} w_R$	675
Rot. 16	e	$\cos(w_R t) Gsf_{xz} w_R + \sin(w_R t) Gsf_{yz} w_R$	705
	n	$-\sin(w_R t) Gsf_{xz} w_R + \cos(w_R t) Gsf_{yz} w_R$	~
	u	$-Gsf_{zz} w_R$	720

### 3.3 2축 회전형 관성항법장치 오차 해석

3.2절에서 구한 회전형 관성항법장치 관성센서 오차모형을 이용하여 회전형 관성항법장치 위치 오차 영향성을 분석하기 위하여 오차요소별 위치 오차 방정식이 요구된다. 자이로 바이어스 성분 에 대한 오차 해석을 우선적으로 수행하기 위하여 이에 대한 위치오차 방정식을 먼저 유도한다. Table 1의 회전형 관성항법장치 자이로 오차모 델 수식을 보면 랜덤상수 자이로 바이어스 오차 요소, sine 및 cosine 함수에 의해 좌표변환된 오

차요소 성분만이 존재하기 때문에 이를 고려한 3 종류의 위치오차 방정식의 유도가 필요하다. 우선 3.2절에서 구한 회전형 관성항법장치 e축 자이로 바이어스 오차인 식 (11)에 대한 위치오차 분석을 위해서 e축 자이로 바이어스 오차에 대한 위치오차 방정식을 유도한다. e축 랜덤상수 자이로 바이어스 오차  $\delta w_e(t)$ 에 의한 위도 오차 수식을 구하면 식 (16)과 같다[4].

$$\delta L_u(t) = -\delta w_e(t) \left( \frac{1}{\Omega} \sin(\Omega t) - \frac{1}{w_s} \sin(w_s t) \cos(\Omega \sin(L)t) \right) \quad (16)$$

식 (16)에서  $L$ 은 위도,  $\Omega$ 는 지구회전 주기(24시간 주기),  $w_s$ 는 술러 주기(약 84분 주기),  $\Omega \sin(L)$ 는 푸코 주기(위도 36도에서 41시간 주기)  $w_f$ 를 나타낸다. sine 함수로 좌표변환되는 e축 랜덤 상수 자이로 바이어스 오차에 의한 위도 오차 수식을 구하면 식 (17)과 같다.

$$\delta L_s(t) = -w_R \delta w_e(t) \left( \frac{1}{(w_R^2 - \Omega^2)} (\cos(\Omega t) - \cos(w_R t)) - \frac{1}{2(w_R^2 - A^2)} (\cos(At) - \cos(w_R t)) - \frac{1}{2(w_R^2 - B^2)} (\cos(Bt) - \cos(w_R t)) \right) \quad (17)$$

식 (17)에서  $w_f = \Omega \sin(L)$ ,  $A = w_s + w_f$ ,  $B = w_s - w_f$ 이며  $w_R \gg A$ ,  $w_R \gg B$ ,  $w_R \gg \Omega$ 라 가정하여 정리하면 식 (18)과 같은 수식이 유도된다.

$$\delta L_s(t) = -\delta w_e(t) \left( \frac{1}{w_R} \cos(\Omega t) - \frac{1}{w_R} \cos(w_s t) \cos(w_f t) \right) \quad (18)$$

cosine 함수로 좌표변환되는 e축 랜덤 상수 자이로 바이어스 오차에 의한 위도 오차 수식을 구하면 식 (19)와 같다.

$$\delta L_c(t) = -\delta w_e(t) \left( \frac{1}{(\Omega^2 - w_R^2)} (\Omega \sin(\Omega t) - w_R \sin(w_R t)) - \frac{1}{2(A^2 - w_R^2)} (A \sin(At) - w_R \sin(w_R t)) - \frac{1}{2(B^2 - w_R^2)} (B \sin(Bt) - w_R \sin(w_R t)) \right) \quad (19)$$

식 (19)에서  $w_R \gg A$ ,  $w_R \gg B$ ,  $w_R \gg \Omega$ 라 가정하여 정리하면 식 (20)과 같은 수식이 유도된다.

$$\delta L_c(t) = \delta w_e(t) \left( \frac{\Omega}{w_R} \sin(\Omega t) - \frac{w_s}{2w_R} \sin(w_s t) \cos(w_f t) \right) \quad (20)$$

e축 랜덤상수 자이로 바이어스 오차, cosine 및 sine 좌표변환된 e축 랜덤상수 자이로 바이어스 오차에 의한 위도오차 수식인 식 (16), (18), (20)과 회전형 관성항법장치 e축 자이로 바이어스 오차인 식 (11)을 식 (21)을 이용하여 각각 라플라스 변환하여 곱한 후 식 (22)와 같이 역 라플라스 변환하여 정리하면 회전형 관성항법장치 e축 자이로 바이어스 오차에 의한 위도오차가 식 (23)과 같이 유도된다.

$$L(f(t-a)u(t-a)) = e^{-as}F(s) \quad (21)$$

$$\delta L(t) = L^{-1}(\delta L_u(s)G_{re}(s)) \quad (22)$$

$$\delta L(t) = G_{bx} \times (\delta L_{us}(t) + \delta L_{cs}(t)) + G_{by} \times \delta L_{ss}(t) \quad (23)$$

식 (23)에서 단위 함수의 시간지연 항목과 위치 오차 방정식의 시간지연 성분을 고려하여  $\delta L_{us}(t)$ ,  $\delta L_{cs}(t)$ ,  $\delta L_{ss}(t)$ 를 상세하게 정리하면 식 (24)~(26)과 같다. 식 (24)~(26)에서 함수 뒤에 곱해지는 단위 함수 성분은 수식의 간단화를 위하여 생략하였다. 식 (24)~(26)에 나타난 바와 같이 시간지연된 단위함수에 의한 성분이 그대로 위도 오차 방정식에 시간지연되어 반영되는 것을 확인할 수 있다.

$$\delta L_{us}(t) = \sum_{i=0}^n [\delta L_u(t-i \times 360) - \delta L_u(t-30-i \times 360) - \delta L_u(t-45-i \times 360) + \delta L_u(t-120-i \times 360) + \delta L_u(t-135-i \times 360) - \delta L_u(t-255-i \times 360) - \delta L_u(t-270-i \times 360) + \delta L_u(t-345-i \times 360)] \quad (24)$$

$$\delta L_{cs}(t) = \sum_{i=0}^n [(\delta L_c(t-30-i \times 360) + \delta L_c(t-45-i \times 360)) - (\delta L_c(t-120-i \times 360) + \delta L_c(t-135-i \times 360)) + (\delta L_c(t-255-i \times 60) - \delta L_c(t-270-i \times 360)) - (\delta L_c(t-345-i \times 360) - \delta L_c(t-360-i \times 360))] \quad (25)$$

$$\delta L_{ss}(t) = \sum_{i=0}^n [(-\delta L_s(t-30-i \times 720) + \delta L_s(t-45-i \times 720)) + (\delta L_s(t-120-i \times 720) - \delta L_s(t-135-i \times 720)) - (\delta L_s(t-255-i \times 720) - \delta L_s(t-270-i \times 720)) + (\delta L_s(t-345-i \times 720) - \delta L_s(t-360-i \times 720)) + (\delta L_s(t-390-i \times 720) - \delta L_s(t-405-i \times 720)) - (\delta L_s(t-380-i \times 720) - \delta L_s(t-395-i \times 720)) + (\delta L_s(t-615-i \times 720) - \delta L_s(t-630-i \times 720)) - (\delta L_s(t-705-i \times 720) - \delta L_s(t-720-i \times 720))] \quad (26)$$

식 (16), (20)의  $\delta L_u(t)$ ,  $\delta L_c(t)$ 에서  $\delta w_e(t) = G_{bx}$ 이고 식 (18)의  $\delta L_s(t)$ 에서는  $\delta w_e(t) = G_{by}$ 이며 이를 고려하여 위치오차에 대한 영향성을 분석하면  $\delta L_c(t)$ ,  $\delta L_s(t)$ 의 진폭이  $\delta L_u(t)$ 에 비교하여



무시할 정도로 작기 때문에 무시하여도 위도 오차 계산에 큰 영향이 없다. 이러한 사실로 확인할 때 회전형 관성항법장치 e축 자이로 바이어스 오차는 회전구간에서 위도 오차에 영향이 거의 없음이 증명된다. 이러한 사실을 바탕으로 식 (25), (26)의  $\delta L_{cs}(t)$ ,  $\delta L_{ss}(t)$ 의 진폭은 식 (24)의  $\delta L_u(t)$ 에 비교하여 매우 작아 무시할 수 있으므로 이를 고려하여 수식을 새로이 정리하면 식 (27)과 같다.

$$\delta L(t) = G_{bx} \times \delta L_{u_s}(t) \quad (27)$$

식 (27)을 상세하게 유도하면 식 (28)과 같은 수식이 유도된다.

$$\begin{aligned} \delta L(t) = & -G_{bx} \left( \frac{1}{\Omega} (\sin(\Omega t)c_{ue}(t) - \cos(\Omega t)s_{ue}(t)) - \right. \\ & \left. \frac{1}{w_s} (\sin(w_s t)\cos(w_f t)cc_{un}(t) + \right. \\ & \left. \sin(w_s t)\sin(w_f t)cs_{un}(t) - \right. \\ & \left. \cos(w_s t)\cos(w_f t)sc_{un}(t) - \right. \\ & \left. \cos(w_s t)\sin(w_f t)ss_{un}(t)) \right) \quad (28) \end{aligned}$$

식 (28)에서 계수를 수식으로 정리하면 식 (29)~(34)와 같고 식 (28)의 위도 오차의 크기는 식 (29)~(34)의 계수에 의해 결정됨이 확인된다. 식 (29)~(34)의 계수는 단위 함수와 곱해지며 푸코, 지구회전 및 슬러 주기를 가지는 정현과 지연 함수의 합으로 수식이 이루어져 있으며 회전형 관성항법장치 반주기 혹은 한 주기마다 새로운 값이 생성된다. 식 (29)~(34)를 구성하는 정현과 지연함수의 입력 값이 작아 선형성이 유지되는 경우 상호 상쇄되어 계수 값이 작으나 시간이 경과되어 입력 값이 큰 경우에는 정현과 함수의 비선형성에 의해 상호 상쇄되지 않고 남는 항에 의해 큰 값을 가지게 됨이 확인 가능하다. 따라서 회전형 관성항법장치의 정지/회전 시간을 짧게 가져가거나 식 (29)~(34)가 최소가 되도록 회전주기를 설정하면 회전형 관성항법장치의 성능이 개선됨을 확인 가능하다.

식 (29)~(34)를 실제 회전 주기  $i$ 의 함수로 나타내지 않고 시간의 함수로 나타낸 사유는 시간이 경과하며 회전 절차가 진행됨에 따라 식 (29)~(34)를 구성하는 각각의 성분에 시간지연된 단위함수가 곱해진 형태로 수식이 유도되어야 한다. 그러나 지면 관계로 생략되었기 때문에 식 (29)~(34)를 시간의 함수로 나타나게 되었다.

$$\begin{aligned} s_{ue}(t) = & \sum_{i=0}^n [\sin(\Omega(i \times 360)) - \sin(\Omega(30 + i \times 360))] - \\ & \sin(\Omega(45 + i \times 360)) + \sin(\Omega(120 + i \times 360)) + \\ & \sin(\Omega(135 + i \times 360)) - \sin(\Omega(255 + i \times 360)) - \\ & \sin(\Omega(270 + i \times 360)) + \sin(\Omega(345 + i \times 360))] \quad (29) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_{ue}(t) = & \sum_{i=0}^n [\cos(\Omega(i \times 360)) - \cos(\Omega(30 + i \times 360))] - \\ & \cos(\Omega(45 + i \times 360)) + \cos(\Omega(120 + i \times 360)) + \\ & \cos(\Omega(135 + i \times 360)) - \cos(\Omega(255 + i \times 360)) - \\ & \cos(\Omega(270 + i \times 360)) + \cos(\Omega(345 + i \times 360))] \quad (30) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} cc_{un}(t) = & \sum_{i=0}^n (\cos(w_s(i \times 360)) \times \cos(w_f(i \times 360))) - \\ & (\cos(w_s(30 + i \times 360)) \times \cos(w_f(30 + i \times 360))) - \\ & (\cos(w_s(45 + i \times 360)) \times \cos(w_f(45 + i \times 360))) + \\ & (\cos(w_s(120 + i \times 360)) \times \cos(w_f(120 + i \times 360))) + \\ & (\cos(w_s(135 + i \times 360)) \times \cos(w_f(135 + i \times 360))) - \\ & (\cos(w_s(255 + i \times 360)) \times \cos(w_f(255 + i \times 360))) - \\ & (\cos(w_s(270 + i \times 360)) \times \cos(w_f(270 + i \times 360))) + \\ & (\cos(w_s(345 + i \times 360)) \times \cos(w_f(345 + i \times 360))) \quad (31) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} cs_{un}(t) = & \sum_{i=0}^n (\cos(w_s(i \times 360)) \times \sin(w_f(i \times 360))) - \\ & (\cos(w_s(30 + i \times 360)) \times \sin(w_f(30 + i \times 360))) - \\ & (\cos(w_s(45 + i \times 360)) \times \sin(w_f(45 + i \times 360))) + \\ & (\cos(w_s(120 + i \times 360)) \times \sin(w_f(120 + i \times 360))) + \\ & (\cos(w_s(135 + i \times 360)) \times \sin(w_f(135 + i \times 360))) - \\ & (\cos(w_s(255 + i \times 360)) \times \sin(w_f(255 + i \times 360))) - \\ & (\cos(w_s(270 + i \times 360)) \times \sin(w_f(270 + i \times 360))) + \\ & (\cos(w_s(345 + i \times 360)) \times \sin(w_f(345 + i \times 360))) \quad (32) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} sc_{un}(t) = & \sum_{i=0}^n (\sin(w_s(i \times 360)) \times \cos(w_f(i \times 360))) - \\ & (\sin(w_s(30 + i \times 360)) \times \cos(w_f(30 + i \times 360))) - \\ & (\sin(w_s(45 + i \times 360)) \times \cos(w_f(45 + i \times 360))) + \\ & (\sin(w_s(120 + i \times 360)) \times \cos(w_f(120 + i \times 360))) + \\ & (\sin(w_s(135 + i \times 360)) \times \cos(w_f(135 + i \times 360))) - \\ & (\sin(w_s(255 + i \times 360)) \times \cos(w_f(255 + i \times 360))) - \\ & (\sin(w_s(270 + i \times 360)) \times \cos(w_f(270 + i \times 360))) + \\ & (\sin(w_s(345 + i \times 360)) \times \cos(w_f(345 + i \times 360))) \quad (33) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} ss_{un}(t) = & \sum_{i=0}^n (\sin(w_s(i \times 360)) \times \sin(w_f(i \times 360))) - \\ & (\sin(w_s(30 + i \times 360)) \times \sin(w_f(30 + i \times 360))) - \\ & (\sin(w_s(45 + i \times 360)) \times \sin(w_f(45 + i \times 360))) + \\ & (\sin(w_s(120 + i \times 360)) \times \sin(w_f(120 + i \times 360))) + \\ & (\sin(w_s(135 + i \times 360)) \times \sin(w_f(135 + i \times 360))) - \\ & (\sin(w_s(255 + i \times 360)) \times \sin(w_f(255 + i \times 360))) - \\ & (\sin(w_s(270 + i \times 360)) \times \sin(w_f(270 + i \times 360))) + \\ & (\sin(w_s(345 + i \times 360)) \times \sin(w_f(345 + i \times 360))) \quad (34) \end{aligned}$$

지금까지는 회전형 관성항법장치 e축 자이로 바이어스 오차에 의한 위도 오차 해석을 수행하였다. 그러나 자이로는 바이어스 오차 외에 척도 계수 및 비정렬 오차가 존재하며 자이로 바이어스와는 다르게 회전구간에서만 오차가 존재하는 특성을 보인다. 그러나 3.2장에서 기술한 바와 같이 척도계수 및 비정렬 오차는 회전 구간에서 자이로 바이어스 오차와 동일한 특성을 가짐을 수식의 유도를 통하여 증명하였다. 따라서 이에 대

한 위치오차 영향성 분석을 위하여  $n$ 축 자이로 바이어스 오차  $\delta w_n(t)$ 에 의한 위치오차 방정식의 유도도 필요하다. Table 2의 척도계수 및 비정렬 오차에 의해 발생하는 자이로 오차 수식을 보면 랜덤상수 성분, sine 및 cosine 함수에 의해 좌표변환된 척도계수 및 비정렬 오차 성분만이 존재하기 때문에 이에 대한 위치오차 방정식을 유도한다.  $n$ 축 랜덤상수 자이로 바이어스 오차  $\delta w_n(t)$ 에 의한 위도 오차 수식을 구하면 식 (35)와 같다[4].

$$\begin{aligned} \delta L_u(t) = & -\sin(L)\delta w_n \left( \frac{1}{\Omega}(1-\cos(\Omega t)) \right. \\ & \left. - \frac{1}{w_s \sin(L)} \sin(w_s t) \sin(\Omega \sin(L)t) \right) \end{aligned} \quad (35)$$

sine 함수로 좌표변환되는  $n$ 축 자이로 바이어스 항에 의한 위도 오차 수식을 구하면 식 (36)과 같다.

$$\begin{aligned} \delta L_s(t) = & -\delta w_n(t) \left( \frac{\sin(L)}{(w_R^2 - \Omega^2)} (w_R \sin(\Omega t) - \Omega \sin(w_R t)) - \right. \\ & \frac{w_s}{2A(w_R^2 - A^2)} (w_R \sin(At) - A \sin(w_R t)) + \\ & \left. \frac{w_s}{2B(w_R^2 - B^2)} (w_R \sin(Bt) - B \sin(w_R t)) \right) \end{aligned} \quad (36)$$

식 (36)에서  $w_R \gg A$ ,  $w_R \gg B$ ,  $w_R \gg \Omega$ ,  $w_s \gg w_f$ 라 가정하여 정리하면 식 (36)이 유도된다.

$$\begin{aligned} \delta L_s(t) = & -\delta w_n(t) \left( \frac{\sin(L)}{w_R} \sin(\Omega t) - \right. \\ & \left. \frac{1}{w_R} \cos(w_s t) \sin(w_f t) \right) \end{aligned} \quad (37)$$

cosine 함수로 좌표변환되는  $n$ 축 자이로 바이어스 항에 의한 위도 오차 수식을 구하면 식 (38)과 같다.

$$\begin{aligned} \delta L_c(t) = & -\delta w_n(t) \left( \frac{\Omega \sin(L)}{(w_R^2 - \Omega^2)} (\cos(\Omega t) - \cos(w_R t)) - \right. \\ & \frac{w_s}{(w_R^2 - A^2)} (\cos(At) - \cos(w_R t)) + \\ & \left. \frac{w_s}{(w_R^2 - B^2)} (\cos(Bt) - \cos(w_R t)) \right) \end{aligned} \quad (38)$$

식 (38)에서  $w_R \gg A$ ,  $w_R \gg B$ ,  $w_R \gg \Omega$ 라 가정하여 정리하면 식 (39)이 유도된다.

$$\begin{aligned} \delta L_c(t) = & -\delta w_n(t) \left( \frac{\Omega \sin(L)}{w_R^2} (\cos(\Omega t) - \cos(w_R t)) - \right. \\ & \left. \frac{w_s}{w_R^2} \sin(w_s t) \sin(\Omega \sin(L)t) \right) \end{aligned} \quad (39)$$

식 (37), (39)에서 구한 위도오차 수식을 비교하면 식 (39)의 진폭이 지구 회전각속도 및 슬러 주기가 곱해져 식 (37)과 비교하여 무시할 정도로 작기 때문에 회전구간에서 cosine과 곱해지는 오차성분은 위치오차에 영향을 미치지 않음이 증명된다. 이러한 결과를 반영하여 식 (37)과 회전형 관성항법장치 비정렬 오차  $Gsf_{xz}$ 에 의해 발생하는  $n$ 축 자이로 바이어스 오차  $G_{rn}(t)$ 에 대한 식 (15)를 각각 라플라스 변환하여 곱한 후 식 (40)과 같이 역 라플라스 변환하여 정리하면 식 (41)과 같은 위도 오차 수식이 유도된다. 식 (41)의 계수를 유도하면 식 (42)와 같다.

$$\delta L(t) = L^{-1}(\delta L_u(s)G_{rn}(s)) \quad (40)$$

$$\delta L(t) = \delta w_n(t) \times \delta L_{ss}(t) \quad (41)$$

식 (42)에서 함수  $\delta L_s(t)$  뒤에 곱해지는 단위 함수 성분은 수식의 간단화를 위하여 생략하였다.

$$\begin{aligned} \delta L_{ss}(t) = & \sum_{i=0}^n \\ & [(\delta L_s(t-30-i \times 720) + \delta L_s(t-45-i \times 720)) + \\ & (\delta L_s(t-120-i \times 720) + \delta L_s(t-135-i \times 720)) - \\ & (\delta L_s(t-255-i \times 720) + \delta L_s(t-270-i \times 720)) - \\ & (\delta L_s(t-345-i \times 720) + \delta L_s(t-360-i \times 720)) + \\ & (\delta L_s(t-390-i \times 720) + \delta L_s(t-405-i \times 720)) + \\ & (\delta L_s(t-480-i \times 720) + \delta L_s(t-495-i \times 720)) - \\ & (\delta L_s(t-615-i \times 720) + \delta L_s(t-630-i \times 720)) - \\ & (\delta L_s(t-705-i \times 720) + \delta L_s(t-720-i \times 720))] \end{aligned} \quad (42)$$

식 (37)의  $\delta L_s(t)$ 에서  $\delta w_n(t) = Gsf_{xz} \times w_R$ 이며 이를 반영하여 식 (41)을 상세 유도하면 식 (43)이 새로이 유도된다.

$$\begin{aligned} \delta L(t) = & -Gsf_{xz} (\sin(L)(\sin(\Omega t)c_{un}(t) - \cos(\Omega t)s_{un}(t)) - \\ & \cos(w_s t) \sin(w_f t) c_{un}(t) + \cos(w_s t) \cos(w_f t) s_{un}(t)) - \\ & \sin(w_s t) \sin(w_f t) s_{cun}(t) + \sin(w_s t) \cos(w_f t) s_{sun}(t) \end{aligned} \quad (43)$$

식 (43)의 계수를 상세하게 유도하여 정리하면 식 (44)~(46)과 같고 식 (34)의 위도오차의 크기는 식 (44)~(46)의 계수에 의해 결정됨이 확인된다. 식 (44)~(46)의 계수는 식 (29)~(34)와 동일하게 단위 함수와 곱해지며 푸코, 지구회전 및 슬러 주기를 가지는 정현파 지연 함수의 합으로 수식이 구성되며 회전형 관성항법장치 반주기 혹은 한 주기마다 새로운 값이 생성된다. 식 (29)~(34)와 동일하게 식 (44)~(46)을 구성하는 정현파 지연함수의 입력 값이 작아 선형성이 유지되는 경우 상호 상쇄되어 계수 값이 작으나 시간이 경과되어 입력 값이 큰 경우 정현파 함수의 비선형성

에 의해 상호 상쇄되지 않고 남은 항에 의해 식 (44)~(46)이 큰 값을 가짐을 확인할 수 있다. 따라서 회전형 관성항법장치의 정지/회전 시간을 짧게 가져가거나 식 (44)~(46)이 최소가 되도록 회전주기를 설정하면 회전형 관성항법장치의 성능이 개선됨을 확인 가능하다. 식 (43)에서 유도되지 않은  $cc_{un}(t)$ ,  $cs_{un}(t)$ ,  $sc_{un}(t)$ 은 식 (44)에서 두 정현파 함수의 곱을 변수 이름대로 수정하여 구할 수 있다. 예를 들면  $cc_{un}(t)$ 의 경우 식 (44)의 정현파 함수 곱을 모두 cosine으로  $cs_{un}(t)$ 의 경우 cosine, sine 함수로 변경하면 구해진다.

식 (44)~(46)도 식 (29)~(34)과 동일하게 시간 지연된 단위함수가 생략되었기 때문에 식 (44)~(46)을 시간의 함수로 나타내었다.

$$\begin{aligned}
 ss_{un}(t) = & \sum_{i=0}^n (\sin(w_s(30+i \times 720)) \times \sin(w_f(30+i \times 720))) + \\
 & (\sin(w_s(45+i \times 720)) \times \sin(w_f(45+i \times 720))) + \\
 & (\sin(w_s(120+i \times 720)) \times \sin(w_f(120+i \times 720))) + \\
 & (\sin(w_s(135+i \times 720)) \times \sin(w_f(135+i \times 720))) - \\
 & (\sin(w_s(255+i \times 720)) \times \sin(w_f(255+i \times 720))) - \\
 & (\sin(w_s(270+i \times 720)) \times \sin(w_f(270+i \times 720))) - \\
 & (\sin(w_s(345+i \times 720)) \times \sin(w_f(345+i \times 720))) - \\
 & (\sin(w_s(360+i \times 720)) \times \sin(w_f(360+i \times 720))) + \\
 & (\sin(w_s(390+i \times 720)) \times \sin(w_f(390+i \times 720))) + \\
 & (\sin(w_s(405+i \times 720)) \times \sin(w_f(405+i \times 720))) + \\
 & (\sin(w_s(480+i \times 720)) \times \sin(w_f(480+i \times 720))) + \\
 & (\sin(w_s(495+i \times 720)) \times \sin(w_f(495+i \times 720))) - \\
 & (\sin(w_s(615+i \times 720)) \times \sin(w_f(615+i \times 720))) - \\
 & (\sin(w_s(630+i \times 720)) \times \sin(w_f(630+i \times 720))) - \\
 & (\sin(w_s(705+i \times 720)) \times \sin(w_f(705+i \times 720))) - \\
 & (\sin(w_s(720+i \times 720)) \times \sin(w_f(720+i \times 720))) \quad (44)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 s_{un}(t) = & \sum_{i=0}^n (\sin(\Omega(30+i \times 720)) + \sin(\Omega(45+i \times 720))) + \\
 & (\sin(\Omega(120+i \times 720)) + \sin(\Omega(135+i \times 720))) - \\
 & (\sin(\Omega(255+i \times 720)) + \sin(\Omega(270+i \times 720))) - \\
 & (\sin(\Omega(345+i \times 720)) + \sin(\Omega(360+i \times 720))) + \\
 & (\sin(\Omega(390+i \times 720)) + \sin(\Omega(405+i \times 720))) + \\
 & (\sin(\Omega(480+i \times 720)) + \sin(\Omega(495+i \times 720))) - \\
 & (\sin(\Omega(615+i \times 720)) + \sin(\Omega(630+i \times 720))) - \\
 & (\sin(\Omega(705+i \times 720)) + \sin(\Omega(720+i \times 720))) \quad (45)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 c_{ue}(t) = & \sum_{i=0}^n (\cos(\Omega(30+i \times 720)) + \cos(\Omega(45+i \times 720))) - \\
 & (\cos(\Omega(120+i \times 720)) + \cos(\Omega(135+i \times 720))) + \\
 & (\cos(\Omega(255+i \times 720)) + \cos(\Omega(270+i \times 720))) - \\
 & (\cos(\Omega(345+i \times 720)) + \cos(\Omega(360+i \times 720))) - \\
 & (\cos(\Omega(390+i \times 720)) + \cos(\Omega(405+i \times 720))) + \\
 & (\cos(\Omega(480+i \times 720)) + \cos(\Omega(495+i \times 720))) - \\
 & (\cos(\Omega(615+i \times 720)) + \cos(\Omega(630+i \times 720))) + \\
 & (\cos(\Omega(705+i \times 720)) + \cos(\Omega(720+i \times 720))) \quad (46)
 \end{aligned}$$

지금까지 e축 자이로 바이어스 및 비정렬 오차  $Gsf_{xz}$ 에 대한 이론적인 오차해석 결과를 기술하였다. 이외 본 논문에서 기술하지 않은 가속도계 및 자이로 오차요소에 대한 오차해석은 본 논문에서 유도한 오차해석 방법과 동일한 방법과 절차로 오차해석이 가능하기 때문에 본 논문에서는 이에 대한 자세한 오차해석은 생략하였다.

### IV. 시뮬레이션 결과

3장에서 구한 이론적인 오차해석 결과가 정확한지를 확인하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 관성센서 오차규격은 자이로 바이어스 오차가 0.01 deg/hr, 자이로 비정렬 오차가 5arcsec라 가정하였으며 3장에서 기술한 회전형 관성항법장치의 정지/회전 절차를 그대로 사용하였고 자이로 바이어스 및 비정렬 오차 외 다른 오차요소는 없다고 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션은 자이로 바이어스 및 비정렬 오차에 대한 회전형 관성항법장치의 항법 방정식을 계산하는 시뮬레이션을 통하여 구한 위치 오차와 3장에서 구한 오차해석 방정식을 회전 절차 한 주기마다 계산하여 구한 위치 오차를 비교하여 3장에서 구한 오차해석 결과가 타당한지를 검증하였다.

Figure 2는 e축 자이로 바이어스 오차에 의한 위도 오차를 비교한 결과이고 Fig. 3은 자이로 비정렬 오차  $Gsf_{xz}$ 에 의한 위도 오차를 비교한 결과이다. Figs. 2, 3에서 M&S라고 표기된 검은 색 선의 삼각심별이 항법방정식을 시뮬레이션하여 구한 위도오차이고 Equation이라고 표기된 빨간 색 선의 삼각심별이 3장에서 구한 오차 방정식인

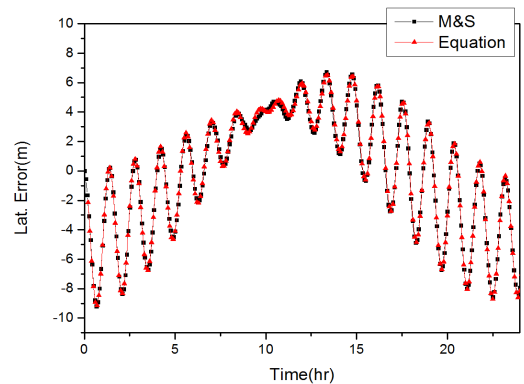


Fig. 2. Latitude Error Comparison Result by e-axis Gyro bias Error

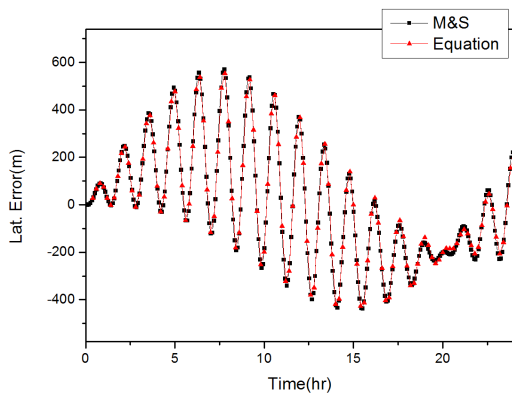


Fig. 3. Latitude Error Comparison Result by Misalignment Error  $Gsf_{xz}$

식 (28), (43)을 회전 절차의 한 주기마다 구한 위도오차이다. Figs. 2, 3에서 나타난 바와 같이 3장에서 구한 오차해석 결과가 실제 항법방정식을 계산하여 구한 오차해석 결과와 일치하는 것이 확인되었다. 이러한 결과로 판단할 때 본 논문에서 구한 회전형 관성항법장치의 오차해석 결과가 타당함이 증명되었다고 할 수 있겠다.

식 (16), (35)는 자이로 랜덤상수 오차에 의한 위도오차 수식으로 지구회전 각속도 주기를 가지는 정현과 성분이 슬러 및 푸코 주기를 가지는 정현과 성분보다 진폭이 약 17배 정도 크다는 것을 보여주고 있다. 그러나 Figs. 2, 3에서는 지구회전 각속도 정현과 성분은 크지 않고 슬러 주기 정현과 성분이 주요 오차로 나타남이 확인된다. 이에 대한 원인을 분석하면 다음과 같다.

3장의 식 (29)~(34), (44)~(46)에서 기술한 바와 같이 회전형 관성항법장치의 항법오차는 회전 절차 과정에서 정현과 함수의 비선형성에 의해 상호 상쇄되지 않은 성분이 회전형 관성항법장치의 항법오차로 나타난다는 점을 기술하였다. 이러한 점으로 인해 정현과 성분의 주기가 클수록 정현과 성분의 선형성도 증가하므로 오차가 상호 상쇄되는 비율이 커져 지구회전 각속도 주기 및 푸코 주기 정현과 성분의 진폭이 크게 줄고 작은 주기를 가지는 슬러 주기 정현과 성분이 주요 항법오차로 나타나는 것을 Figs. 2, 3은 보여주고 있다. 또한 3장에서 기술한 회전형 관성항법장치의 척도계수 및 비정렬 오차 특성에서 알 수 있듯이 5arcsec의 비정렬 오차와 12 deg/sec의 회전 각속도를 가정하여 회전 구간에서 이를 자이로 바이어스로 변환하면 1.05 deg/hr의 자이로 바이어스 오차로 환산되며 이는 0.01 deg/hr 자이로 바이어스 오차 대비 약 105배 큰 수치이다.

그러나 회전 구간의 회전 시간은 15초로 정지 구간 30초 대비 반이라서 이를 감안한 비정렬 오차에 의한 항법 오차는 자이로 바이어스 오차에 의한 항법오차보다 약 52배 정도 클 것으로 계산된다. 이러한 사실을 근거로 Fig. 3의 진폭을 분석하면 Fig. 2의 진폭대비 약 60배 정도 큰 것으로 나타나 이론적으로 분석한 결과와 유사한 결과가 나타났다. 이러한 사실로 판단할 때 회전형 관성항법장치의 항법 성능을 좌우하는 자이로 오차요소는 바이어스 오차가 아니라 척도계수 및 비정렬 오차인 것으로 확인되었다.

## V. 결 론

본 논문에서는 관성센서 오차에 의한 링레이저 자이로 기반 회전형 관성항법장치의 정확한 항법 성능 분석을 위하여 지구회전 각속도 및 중력 가속도 항을 고려한 이론적인 오차해석을 수행하였다. 회전형 관성항법장치 오차해석 결과 회전형 관성항법장치의 항법오차는 회전 절차 과정에서 정현과 함수의 비선형성에 의해 상호 상쇄되지 않은 성분이 회전형 관성항법장치 항법오차로 나타남을 증명하였으며 이러한 오차를 줄이기 위해서는 회전절차의 정지/회전 시간을 줄여 정현과 함수의 상호 상쇄 비율을 높이거나 정현과 함수의 합으로 구성되는 계수의 값이 최소가 되도록 회전주기를 설정하여 성능을 개선하는 방법이 있음을 이론적으로 증명하였다. 또한 슬러주기를 가지는 정현과 성분의 항법오차가 회전형 관성항법장치의 주요 항법오차임을 증명하였으며 관성센서 바이어스 오차보다는 척도계수 및 비정렬 오차가 항법오차를 발생시키는 주요 오차요인임을 증명하였다.

본 논문의 내용을 근거로 판단할 때 광경로 제어 및 강체인 광학부 구조로 인하여 척도계수 및 비정렬 오차가 매우 작은[1-3] 링레이저 자이로가 회전형 관성항법장치에 가장 적합한 자이로라 판단된다.

본 논문의 오차해석 결과는 향후 회전형 관성항법장치 개발 시 관성센서 규격 설계에 유효하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

## References

- 1) Titterton, D., and Weston, J., *Strapdown Inertial Navigation Technology*, Peter Peregrinus Ltd., 1997.

- 2) Kuritsky, M. M., and Goldstein, M. S., "Inertial Navigation," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 71, No. 10, Oct. 1983.
- 3) Siouris, G. M., *Aerospace Avionics Systems : A Modern Synthesis*, Academic Press, Inc. 1993.
- 4) Britting, K. R., *Inertial Navigation System Analysis*, Wiley-Interscience, 1971.
- 5) Keller, J., "Sperry Marine to build AN/WSN-7 Shipboard Navigation Systems as Navy Waits for New Replacement", *Military & Aerospace Electronics*, Sep. 2017.
- 6) M. B. May, "Ring Laser Gyro Inertial Navigation," *ION Newsletter*, 2014.
- 7) Fincke, W. H., "Strapdown Inertial Sensing Unit Rotation(SISUR), A New Approach to Inertial Navigation," *Proceedings of PLANS*, 1978.
- 8) Levinson, E., Horst, J., and Willcocks, M., "The Next Generation Marine Inertial Navigation is Here Now," *Proceedings of IEEE PLANS*, 1994.
- 9) Levinson, E., and Giovanni, C., "Laser Gyro Potential for Long Endurance Marine Navigation," *Proceedings of IEEE PLANS*, 1980.
- 10) Levinson, E., and Majure, R., "MARLIN, The Next Generation Marine Inertial Navigator," *Symposium Gyro Technology 1987*.
- 11) Levinson, E., and Majure, R., "Accuracy Enhancement Techniques Applied to the Marine Ring Laser Inertial Navigator (MARLIN)," *Proceedings of ION National Technical Meeting*, 1987.
- 12) Lahham, J. I., and Brazell, J. R., "Acoustic Noise Reduction in The MK 49 Ship's Inertial Navigation System(SINS)," *Proceedings of IEEE PLANS*, 1992.
- 13) Rice, H., Mendelsohn, L., Aarons, R., and Mazzola, D., "Next Generation Marine Precision Navigation System," *Proceedings of IEEE PLANS*, 2000.
- 14) Hays, K. M., Schmidt, R. G., Wilson, W. A., Campbell, J. D., Heckman, D. W., and Gokhale, M. P., "A Submarine Navigator for the 21<sup>st</sup> Century," *Proceedings of IEEE PLANS*, 2002.
- 15) Johnson, D., and Eppig, S., "Aided Inertial Navigation Systems for Underwater Vehicles," *Proceedings of the 1987 5<sup>th</sup> International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology*, 1987.
- 16) Morrow, R. B., and Heckman, D. W., "High Precision IFOG Insertion into the Strategic Submarine Navigation System," *Proceedings of IEEE PLANS*, 1998.
- 17) Vajda, S., and Zorn, A., "Survey of Existing and Emerging Technologies for Strategic Submarine Navigation," *Proceedings of IEEE PLANS*, 1998.
- 18) Yuan, B., Liao, D., and Han, S., "Error compensation of an optical gyro INS by multi-axis rotation," *Measurement Science and Technology*, 2012, pp. 9.
- 19) Qin, C., etc, "Design and Analysis of Dual-axis Rotating Scheme for Ring Laser Strapdown Inertial Navigation System," *Proceedings of the 35th Chinese Control Conference*, July 2016.
- 20) Song, N., etc, "Analysis and calibration of the mounting errors between inertial measurement unit and turntable in dual-axis rotational inertial navigation system," *Measurement Science and Technology*, 2013, pp. 10.
- 21) Wang, B., etc, "A Self-Calibration Method for Nonorthogonal Angles Between Gimbals of Rotational Inertial Navigation System," *IEEE Trans. on Industrial Elec.*, Vol. 62, No. 4, April 2015.
- 22) Jiang, R., etc, "Accurate Compensation of Attitude Angle Error in a Dual-Axis Rotation Inertial Navigation System," *Sensors*, 2017.
- 23) Liu, Z., etc, "An Improved Rotation Scheme for Dual-Axis Rotational Inertial System", *IEEE Sensors Journal*, Vol. 17, No. 13, July 2017.
- 24) Ren, Q., etc, "A multi-position self-calibration method for dual-axis rotational inertial navigation system," *Sensor and Actuator A*, 2014, pp. 24-31.
- 25) Rao, G. Y., etc, "Calibration of Laser Inertial Navigator with Dual-axis Rotation," *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2015, pp. 960-966.
- 26) Cai, Q., etc, "Online Calibration of the Geographic-Frame-Equivalent Gyro Bias in Dual-Axis RINS," *IEEE Trans. of Instrumentation and Measurement*, 2018.