

# 가속도계 온도안정화 상태에서 고정이득방식 자체정렬의 성능개선 방법에 대한 연구

이 인 섭<sup>\*,1)</sup>

<sup>1)</sup> 국방과학연구소 제3기술연구본부

## A Study on Performance Improvement Method of Fixed-gain Self-alignment on Temperature Stabilizing State of Accelerometers

Inseop Lee<sup>\*,1)</sup>

<sup>1)</sup> The 3rd Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 22 January 2016 / Revised 25 April 2016 / Accepted 8 July 2016)

### ABSTRACT

For inertial navigation systems, initial information such as position, velocity and attitude is required for navigation. Self-alignment is the process to determine initial attitude on stationary condition using inertial measurements such as accelerations and angular rates. The accuracy of self-alignment is determined by inertial sensor error. As soon as an inertial navigation system is powered on, the temperature of accelerometer rises rapidly until temperature stabilization. It causes acceleration error which is called temperature stabilizing error of accelerometer. Therefore, temperature stabilizing error degrades the alignment accuracy and also increases alignment time. This paper suggests a method to calculate azimuthal attitude using curve fitting of horizontal control angular rate in fixed-gain self-alignment. It is verified by simulation and experiment that the accuracy is improved and the alignment time is reduced using the proposed method under existence of the temperature stabilizing error.

Key Words : Self-alignment(자체정렬), Temperature Stabilizing Error(온도안정화 오차), Inertial Navigation System(관성항법장치), Curve Fitting(곡선적합)

### 1. 서론

대표적인 추측 항법장치인 관성항법장치(Inertial Navigation System : INS)는 항법을 수행하기 위해서

초기 위치, 속도, 자세 정보가 요구된다. 자이로/가속도계와 같은 관성센서가 측정한 각속도/가속도 정보를 이용하여 정지 상태에서 초기 자세를 획득하는 것을 자체정렬이라 한다. 관성항법장치의 초기 항법 성능은 자체정렬 정밀도에 의해 결정되며 자체정렬시 관성센서 오차는 정렬 정밀도를 저하시키는 주요원인이 된다<sup>1-3)</sup>. 관성항법장치에 전원이 인가되면 가속도계가

\* Corresponding author, E-mail: inseop@add.re.kr  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

온도안정(stabilized) 상태에 도달하기 전에 온도가 상승하며, 이 과정에서 가속도계 오차가 시간에 따라 변하는 특성을 보인다. 이를 가속도계 온도안정화 오차(temperature stabilizing error)라고 한다<sup>[4]</sup>. 따라서 자체 정렬시 가속도계 온도안정화 오차는 정렬정밀도를 저하시키고 자체정렬 시간이 길어지게 하는 주요원인이 된다.

가속도계 온도안정화 오차에 의한 정렬정밀도 저하를 막고 정렬시간 단축을 위한 학술연구는 보고된 바가 없으나, 해외 선진국에서는 가속도계 생산 단계에서 온도안정화 오차를 모델링하여 보상하는 방법<sup>[5]</sup>과 가속도계 자체의 성능을 개선하여 온도안정화 오차를 감소시키려는 많은 연구<sup>[6-8]</sup>가 진행되었다. 최근 국내에서도 정렬시간 단축에 대한 요구가 높아짐에 따라 가속도계 온도안정화 오차가 존재하는 상황에서 정렬시간 단축에 대한 필요성이 대두되었다.

본 논문에서는 가속도계 온도안정화 오차가 존재하는 경우에 정렬정밀도 저하를 막고 정렬시간 단축을 위하여, 고정이득 방식의 자체정렬에서 수평축 제어신호를 곡선적합(curve fitting)하여 계산하는 관성항법시스템 차원의 새로운 방법을 제시하였다. 또한, 이러한 기법을 적용할 경우, 기존 자체정렬 방법 대비하여 방위각 오차 개선 및 정렬시간 단축이 가능함을 시뮬레이션 및 실험을 통하여 확인하였다

2. 온도안정화 오차의 영향

관성항법장치에 전원이 인가되면 관성센서 온도가 급격히 상승하는 온도안정화 과정이 진행되며, 이때 가속도계 출력은 Fig. 1과 같이 시간이 경과함에 따라 안정화되는 모습을 보인다. 가속도계 온도안정화 오차는 온도안정화 완료 이전과 이후의 가속도계 출력의 차로 정의할 수 있으며, 이를 식 (1)과 같이 표현할 수 있다<sup>[4]</sup>. 식 (1)에서  $\delta a^n$ 은 가속도계 온도안정화 오차,  $\delta a^n$ 은 온도안정화 바이어스의 크기,  $T_i$ 는 온도안정화 오차의 시정수이다.

$$\delta a^n = (1 - e^{-\frac{t}{T_i}}) \delta a^n \tag{1}$$

가속도계 온도 안정화 상태에서의 자체 정렬 성능 분석을 위하여 2차 고정이득 방식의 자체 정렬을 가

정하였다. 일반적으로 2차 제어기를 이용한 고정이득 방식의 스트랩다운 관성항법장치의 정렬루프는 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다<sup>[1]</sup>. Fig. 2에 나타난 바와 같이 자체정렬은 항법좌표계에서 계산된 수평축 가속도계 측정치  $C_b^m f^b$ 가 0이 되도록 2차 제어기를 이용하여 제어신호  $\omega_E^c(t)$ ,  $\omega_N^c(t)$ 을 생성하고, 이를 이용하여 동체 좌표계와 항법 좌표계 사이의 좌표변환 행렬  $C_b^m$ 을 계산하여 수평축 정렬을 수행하는 것이다. 수직축 자세는 생성된 제어신호를 이용하여 계산한다. Fig. 2에서  $k$ ,  $k_b$ 는 정렬루프 계수이며  $v_E$ ,  $v_N$ 은 항법좌표계에서의 E축 및 N축 속도,  $\Omega$ 는 지구회전 각속도,  $L$ 은 위도,  $\Omega_E$ ,  $\Omega_N$ ,  $\Omega_U$ 는 항법 좌표계에서의 각속도,  $\Omega_{ib}^b$ 는 자이로에서 출력되는 각속도를 의미한다.

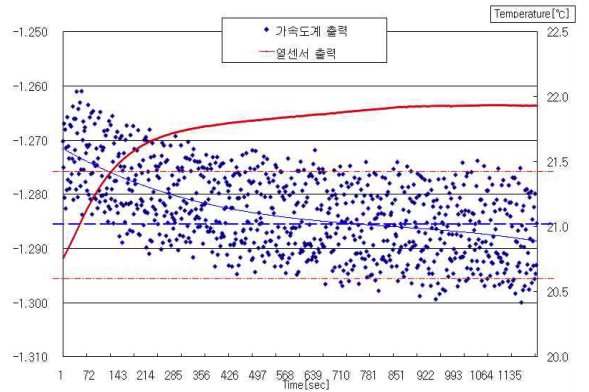


Fig. 1. Accelerometer output on temperature stabilizing state<sup>[4]</sup>

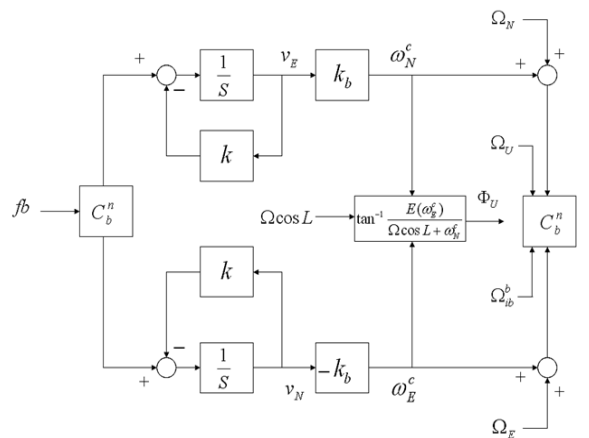


Fig. 2. Block diagram of self alignment<sup>[1,4]</sup>

Fig. 2의 자체정렬 방법으로 식 (1)의 가속도계 온도 안정화 오차 및 자이로 오차가 존재한다고 가정하여 자체정렬을 수행하면, 제어신호  $\omega_E^c(t)$ ,  $\omega_N^c(t)$ 가 온도 안정화가 진행됨에 따라 변하며, 이는 수평축 자세 또한 변하게 됨을 의미한다. 식 (1)의 온도안정화 오차 및 자이로 오차가 존재하는 경우 Fig. 2의 자체정렬을 수행하여 구한 수평축 제어신호 오차  $\delta\omega_E^c(t)$ ,  $\delta\omega_N^c(t)$ 는 식 (2), (3)과 같다<sup>14)</sup>. 식 (2), (3)에서  $\delta a_{Ei}$ ,  $\delta a_{Ni}$ 는 E 및 N축의 가속도계 온도안정화 바이어스,  $\delta\omega_{Ei}$ ,  $\delta\omega_{Ni}$ 는 E 및 N축 자이로 오차이며  $g$ 는 중력가속도이다. 식 (2), (3)에 나타난 바와 같이 수평축 제어신호 오차는 가속도계 온도안정화 오차 및 자이로 오차에 의해 결정되는 것을 보여준다.

$$\delta\omega_E^c(t) = -\frac{\frac{k_b \delta a_{Ni}}{T_i}}{\frac{1}{T_i^2} - \frac{k}{T_i} + k_i g} e^{-\frac{t}{T_i}} + \delta\omega_{Ei} \quad (2)$$

$$\delta\omega_N^c(t) = \frac{\frac{k_b \delta a_{Ei}}{T_i}}{\frac{1}{T_i^2} - \frac{k}{T_i} + k_i g} e^{-\frac{t}{T_i}} + \delta\omega_{Ni} \quad (3)$$

Fig. 2에서 구한 수평축 제어 신호를 이용하여 방위각 계산식을 나타내면 식 (4)와 같다<sup>11)</sup>. 식 (4)에 나타난 바와 같이 오차가 포함된 수평축 제어신호가 방위각 계산에 사용되므로, 식 (2), (3)의 수평축 제어신호 오차가 방위각 오차를 발생시킨다는 것을 알 수 있다.

$$H = \arctan\left(\frac{\hat{\omega}_E^c}{\Omega_N + \hat{\omega}_N^c}\right) \quad (4)$$

식 (4)에서  $\hat{\omega}_E^c$ ,  $\hat{\omega}_N^c$ 은 수평축 제어신호 참값( $\omega_E^c$ ,  $\omega_N^c$ )에 식 (2), (3)의 수평축 제어신호 오차가 포함된 것으로 식 (5), (6)과 같다.

$$\hat{\omega}_E^c = \omega_E^c + \delta\omega_E^c \quad (5)$$

$$\hat{\omega}_N^c = \omega_N^c + \delta\omega_N^c \quad (6)$$

방위각 계산식인 식 (4)를 근사화하여 방위각 오차를 계산하면 식 (7)과 같다. 식 (7)에 식 (2)를 대입하여 가속도계 온도안정화 오차 및 자이로 오차에 의한 방위각 오차를 계산하면 식 (8)과 같다. 식 (8)은 기존에 잘 알려진 바와 같이 E축 자이로 오차에 의해 방위각 오차가 발생되며 온도안정화 오차 존재 시 이에 의해 시간적으로 변하는 방위각 오차가 추가적으로 발생하는 것을 보여주고 있다.

$$\delta H \approx \arctan\left(\frac{\delta\omega_E^c}{\Omega_N}\right) \approx \frac{\delta\omega_E^c}{\Omega_N} \quad (7)$$

$$\delta H = \frac{-\frac{\frac{k_b \delta a_{Ni}}{T_i}}{\frac{1}{T_i^2} - \frac{k}{T_i} + k_i g} e^{-\frac{t}{T_i}}}{\Omega_N} + \frac{\delta\omega_{Ei}}{\Omega_N} \quad (8)$$

식 (2), (3)의 자이로 오차  $\delta\omega_{Ei}$ ,  $\delta\omega_{Ni}$ 에 바이어스 오차 외에 랜덤워크 오차가 포함되는 경우 수평축 제어신호  $\hat{\omega}_E^c$ ,  $\hat{\omega}_N^c$ 의 변화폭이 매우 크게 된다. 그러므로 순간적으로 측정된  $\hat{\omega}_E^c$ ,  $\hat{\omega}_N^c$ 을 이용하여 방위각을 계산하게 되면 방위각 정밀도 확보가 어렵게 된다. 그러므로 자이로의 랜덤워크가 큰 관성항법장치의 자체정렬 수행 시, 랜덤워크에 의한 방위각 정밀도 저하를 막기 위하여 수평축 제어 신호에 대한 전체구간 평균(total average)을 취하여 방위각을 계산하는 것이 일반적이다<sup>11)</sup>. 이를 수식으로 나타내면 식 (9)와 같다.

$$H = \arctan\left(\frac{\hat{\beta}_E}{\hat{\beta}_N}\right) \quad (9)$$

식 (9)에서  $\hat{\beta}_E$ ,  $\hat{\beta}_N$ 을 수식으로 나타내면 식 (10), (11)과 같다. 여기서  $T$ 는 전체평균 수행 시간 즉, 정렬시간을 의미한다.

$$\hat{\beta}_E = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{\omega}_E^c(t) dt \quad (10)$$

$$\hat{\beta}_N = \Omega_N + \frac{1}{T} \int_0^T \hat{\omega}_N^c(t) dt \quad (11)$$

식 (2), (3)의 수평축 제어신호 오차를 식 (9)와 같이 전체구간 평균을 취하여 방위각을 계산하게 되면, 가속도계 온도안정화 오차 및 자이로 오차에 의해 발생된 수평축 제어신호 오차가 평균하는 시간이 증가함에 따라 평활화(smoothing) 효과로 인해 작아지게 된다. 그러므로 가속도계 온도안정화 오차 및 자이로 랜덤워크 오차 존재 시, 방위각 정밀도 확보를 위해서는 오랜 시간 동안 자체정렬을 수행하여야 한다.

$$\delta H = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T \delta \omega_E^c dt}{\Omega_N} \quad (12)$$

$$= \frac{\frac{k_b \delta a_{N_b}}{\frac{1}{T_i^2} - \frac{k}{T_i} + k_b g} \left( e^{-\frac{T}{T_i}} - 1 \right)}{\Omega_N} + \frac{\delta \omega_{E-w}}{\sqrt{T} \Omega_N} + \frac{\delta \omega_{B_b}}{\Omega_N}$$

전체구간 평균을 통하여 방위각 계산 시 발생하는 방위각 오차는 식 (9)를 근사화한 후 식 (10)을 적용하여 구할 수 있으며, 그 결과는 식 (12)와 같다. 식 (12)에서는 자이로 오차( $\delta \omega_{B_b}$ )를 자이로 랜덤워크 오차( $\delta \omega_{E-w}$ )와 자이로 바이어스 오차( $\delta \omega_{B_b}$ )로 구분하여 나타내었다. 식에서 알 수 있듯이 정렬 시간  $T$ 가 증가할수록 가속도계 온도안정화 오차 및 자이로 랜덤워크 오차에 의한 영향이 감소하여, 방위각 오차의 정밀도는 자이로 바이어스에 의해 결정되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 사실로 판단할 때 방위각 정밀도를 확보하면서 정렬시간을 단축하기 위해서는 자이로 랜덤워크 오차 및 가속도계 온도안정화 오차의 개선이 필수적임을 확인할 수 있다. 그러나 자이로 랜덤워크의 경우 하드웨어 특성에 의해 발생하는 것으로, 정렬 기법을 통하여 개선하는 것은 사실상 불가능 하다. 그러므로 본 논문에서는 자이로 랜덤워크 오차는 가속도계 온도안정화 오차에 비해 정렬정밀도 및 정렬시간에 대한 영향이 작다고 가정하여 방위각 정밀도를 확보하고 정렬시간을 단축하는 새로운 자체정렬 방법에 대한 연구결과를 제시한다.

### 3. 자체정렬 수평축 제어신호 곡선적합 방법

본 논문에서는 온도안정화 오차의 영향을 최소화

하여, 방위각 정밀도 저하를 막고 정렬시간을 단축하기 위해 수평축 제어신호를 곡선 적합하여 방위각을 계산하는 새로운 방법을 제안하였다. Fig. 3은 자이로 랜덤워크에 의해 산발적으로 나타나는 수평축(East축) 제어신호(검정색 점)와 이를 적분한 결과(붉은색 선)를 보여준다. 본 논문에서 제안한 방법은 수평축 제어신호를 적분하고, 적분한 곡선의 일정구간을 곡선적합한 후, 그 기울기를 계산하여 방위각 계산에 사용하는 것이다. 자체정렬은 정지 상태에서 수행되므로 수평축 제어신호의 참값은 상수형태가 될 것이며, 이를 적분하면 1차항으로 나타나는 것을 이용하는 것이다. 이 방법은 순간적으로 계산되는 수평축 제어신호를 전체구간 평균하여 계산할 때에 비하여 평활화 효과에 의해 정렬시간이 증가하는 영향이 작게 나타나기 때문에, 가속도계 온도안정화 오차에 의한 영향이 작아지게 되어 정렬성능을 향상시킬 것으로 판단된다.

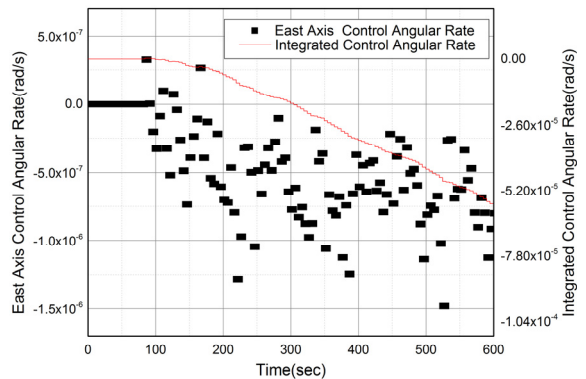


Fig. 3. Control angular rate and its integration during temperature stabilization<sup>[9]</sup>

오차가 포함된 수평축 제어신호  $\hat{\omega}_E^c$ 를 적분하면 식 (13)과 같이 네 개의 항으로 구성된다. 첫 번째는 정확한 수평축 제어신호  $\omega_E^c$ 와 자이로 바이어스에 의해 선형적으로 증가하는 항이고, 두 번째는 상수항이다. 세 번째 항은 가속도계 온도안정화 오차에 의해 발생하는 것으로 시간이 경과함에 따라 영향이 점점 작아지는 항이며, 네 번째 항은 자이로 랜덤워크에 의해 발생하는 항이다. 식 (13)에서 지수함수를 테일러 급수 전개하면 식 (14)와 같이 표현된다. 그리고 식 (10)을 이용해 전체평균을 취하여 구한 제어각속도는 식 (15)와 같다. 기존 자체정렬에서는 식 (15)를 통해 제

이각속도를 구하기 때문에 두 번째 항과 같은 가속도계 온도안정화 오차 성분에 의하여 방위각 정밀도가 저하되는 문제점이 발생한다. 이러한 문제점을 개선하기 위해서 본 논문에서는 곡선적합을 위한 측정방정식 식 (16)을 구성한 후 1차항 계수  $\mathbf{a}$ 를 식 (17)과 같이 최소자승법을 이용하여 구하는 새로운 방법을 제시한다.

$$\begin{aligned} \hat{\alpha}_E(t) &= \int_0^t \hat{\omega}_E^c(\tau) d\tau \\ &= \int_0^t (\omega_E^c + \delta\omega_E^c(\tau)) d\tau \\ &= (\omega_E^c + \delta\omega_{Eb})t - \frac{k_i \delta a_{N_i}}{\frac{1}{T_i^2} - \frac{k}{T_i} + k_i g} + \\ &\quad \frac{k_i \delta a_{N_i}}{\frac{1}{T_i^2} - \frac{k}{T_i} + k_i g} e^{-\frac{t}{T_i}} + \int_0^t \delta\omega_{Ew}(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \hat{\alpha}_E(t) &= (\omega_E^c + \delta\omega_{Eb} - \frac{1}{T_i})t + \\ &\quad A(\frac{t^2}{2!T_i^2} - \frac{t^3}{3!T_i^3} + \dots) + \int_0^t \delta\omega_{Ew}(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \hat{\beta}_E &= (\omega_E^c + \delta\omega_{Eb} - \frac{1}{T_i}) + \\ &\quad A(\frac{T}{2!T_i^2} - \frac{T^2}{3!T_i^3} + \dots) + \frac{1}{T} \int_0^T \delta\omega_{Ew}(t) dt \end{aligned} \quad (15)$$

식 (14), (15)에서  $A = \frac{k_i \delta a_{N_i}}{\frac{1}{T_i^2} - \frac{k}{T_i} + k_i g}$  이다.

곡선적합을 위한 측정방정식  $z = Hx + \epsilon$ 는 식 (16)과 같이 표현할 수 있다. 식 (16)에서 측정치벡터의 성분인  $\hat{\alpha}_E(t_i)$ 는  $t_i$ 시점에서 수평축 제어신호의 적분값을 의미하며,  $\epsilon$ 은 오차항에 해당한다.  $H$ 는 1차 함수 형태의 곡선적합을 위한 측정치 모델에 해당하며,  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$ 는 각각 1차함수의 기울기와  $y$ 절편에 해당한다. 식 (16)의 측정 방정식에 최소자승법을 적용하여 상태변수를 구하는 수식으로 변경하면 식 (17)과 같다. 방위각은 식 (17)을 이용하여 구한  $E$ ,  $N$ 축 제어신호를 식 (4)에 대입하여 계산한다.

$$\begin{bmatrix} \hat{\alpha}_E(t_0) \\ \hat{\alpha}_E(t_1) \\ \vdots \\ \hat{\alpha}_E(t_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_0 & 1 \\ t_1 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ t_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_0 \\ \epsilon_1 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\hat{x} = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = (H^T H)^{-1} H^T z \quad (17)$$

식 (17)을 이용하여 식 (14)를 곡선적합 하게 되면 제어각속도는  $\mathbf{a}$ 로 추정되며, 가속도계 온도안정화 오차에 의해 발생하는 고차항은 측정방정식의 오차항으로 추정이 된다. 이렇게 구한 제어각속도를 식 (15)와 비교하면, 곡선적합을 이용하여 계산한 제어각속도에는 가속도계 온도안정화 오차의 영향이 감소되는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 이를 이용하여 방위각 계산시 방위각 정밀도 확보 및 정렬시간 단축이 가능하다.

#### 4. 자체정렬 성능 개선 검증

##### 4.1 시뮬레이션

##### 4.1.1 관성항법장치 자체정렬 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 수평축 제어각속도 곡선적합을 적용한 고정이득방식 자체정렬의 성능을 검증하기 위하여 관성항법장치 자체정렬 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에서는 식 (1)의 가속도계 온도안정화 오차를 적용하여, 온도안정화 바이어스 및 시정수에 따른 방위각 정밀도 및 정렬시간에 대한 영향을 확인하였다. 관성센서 오차는 자이로 바이어스 0.01 deg/hr, 가속도계 바이어스 100  $\mu\text{g}$ , 자이로 랜덤워크는 0.003 deg/ $\sqrt{\text{hr}}$ 로 설정하였으며, 성능분석을 위해 100회의 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과에서 전체평균 방식의 자체정렬과 곡선적합을 적용한 자체정렬의 방위각 참값은 0.051°으로 동일하게 나타났다.

온도안정화 오차의 시정수가 60초이고 온도안정화 바이어스의 크기가 0, 30, 60, 90, 120  $\mu\text{g}$ 로 변화할 경우 자체정렬 중 방위각 추정치를 Fig. 4, 5에 나타내었다. Fig. 4, 5를 통해 온도안정화 바이어스 크기가 증가할수록 자체정렬의 방위각 추정 성능이 저하되는 것을 확인할 수 있다.

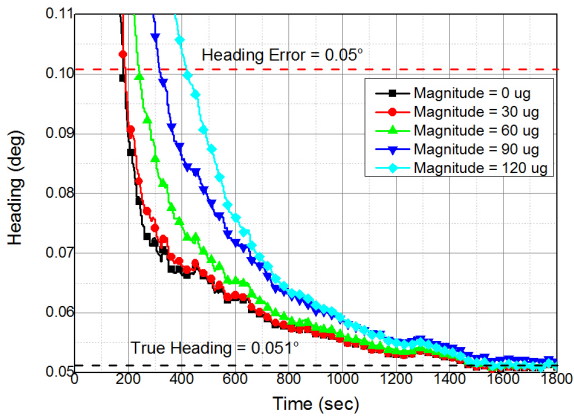


Fig. 4. Heading estimates of total average during fixed gain self alignment simulation

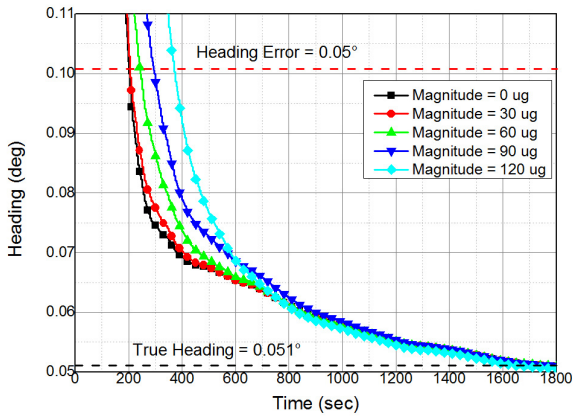


Fig. 5. Heading estimates of curve fitting during fixed gain self alignment simulation

Table 1. Time for heading error estimate to become under  $0.05^\circ$

Amplitude ( $\mu\text{g}$ )	Total Average (sec)	Curve Fitting (sec)
0	180 (A)	200 (B)
30	A+10	B+5
60	A+60	B+45
90	A+140	B+95
120	A+235	B+170

방위각 오차가  $0.05^\circ$  이하가 되기 위해 필요한 정렬

시간을 Table 1에 나타내었다. 곡선적합을 적용한 자체정렬이 전체평균 방식의 자체정렬보다 온도안정화 바이어스 크기 증가에 따른 정렬시간의 증가량이 작은 것을 알 수 있다. 따라서 곡선적합을 적용한 자체정렬이 전체평균 기반 자체정렬보다 온도안정화 오차에 의한 영향이 작은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 온도안정화 오차 시정수가 60초인 경우, 곡선적합을 적용한 자체정렬의 방위각 추정치에서 전체평균을 적용한 자체정렬의 동일시점 방위각 추정치를 뺀 결과를 나타낸 것이다. 즉, 방위각 차가 0보다 작을 경우, 곡선적합을 적용한 자체정렬의 방위각 추정 성능이 우수한 것으로 판단할 수 있다.

온도안정화 오차 바이어스가  $60 \mu\text{g}$  이하로 작을 경우, 정렬 200초 이후 방위각 차이가  $0.005^\circ$  이내가 되어 방위각 추정성능에 큰 차이가 없다. 하지만  $90 \mu\text{g}$  이상일 경우에는, 정렬 200초 이후부터 온도안정화 완료 이전까지 방위각 차의 크기가  $0.005^\circ$ 를 초과하는 것을 확인할 수 있다. 방위각 차가 시간이 지날수록  $0^\circ$ 로 수렴하는 것은 정렬시간이 길어짐에 따라 온도안정화 상태가 되어, 식 (12), (13)의 온도안정화 오차에 의한 방위각 오차 항이 작아지기 때문이다. 200초 이전 시점에서 전체평균을 적용한 자체정렬이 곡선적합을 적용한 자체정렬보다 방위각 오차가 작은 구간이 발생하는(방위각 차가 0보다 큰) 이유는 가속도계 온도안정화 오차로 인한 수평축 제어 각속도가 지수함수 형태이므로 초기에 급격히 감소하여 곡선적합 시 초기 오차가 크게 발생하기 때문이다.

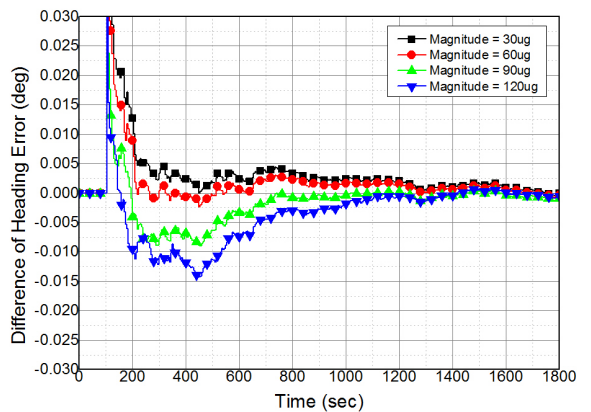


Fig. 6. Difference of heading estimates between curve fitting and total average under condition of time constant 60 seconds

온도안정화 오차 시정수가 120초로 증가할 경우, 방위각 차를 Fig. 7에 도시하였다. 시정수가 60초인 경우인 Fig. 6과 마찬가지로 온도안정화 오차가 90  $\mu\text{g}$  이상일 경우 곡선적합 방식의 자체정렬의 방위각 추정 성능이 전체평균을 적용한 경우보다 우수한 것을 확인할 수 있으며, 시정수가 증가하여 방위각 차이가 더 커진 것을 확인할 수 있다. 따라서 가속도계 온도안정화 오차의 바이어스 크기 및 시정수가 증가할수록, 고정이득방식의 자체정렬에 곡선적합을 적용할 경우 방위각 추정 성능이 개선되어 정렬시간 단축이 가능할 것으로 판단된다.

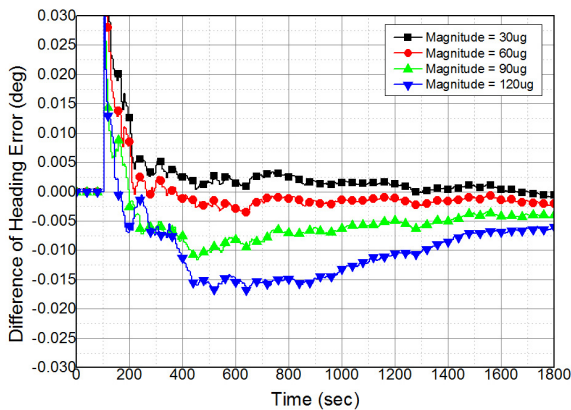


Fig. 7. Difference of heading estimates between curve fitting and total average under condition of time constant 120 seconds

#### 4.2 실험결과

수평축 제어가속도 곡선적합을 적용한 고정이득방식 자체정렬의 성능을 검증하기 위하여 관성항법장치를 이용하여 실험을 수행하였다. 관성항법장치의 자세는 ENU좌표계 기준으로  $[0^\circ \ 0^\circ \ 90^\circ]$  상태로 고정하였다. 정렬 알고리즘의 속도, 정확도 등의 성능을 평가하기 위해서는 방위각의 참값이 필요하다. 그러나 시뮬레이션과 달리 실제 실험 시에는 정렬결과와 참값을 알 수 없으므로, 관성항법장치를 견고하게 고정된 상태에서 정렬반복실험을 하여 방위각 평균을 도출하였다. 정렬반복실험은 전원인가, 15분간 정렬, 항법컴퓨터 재부팅의 순서로 38회 반복하여 수행하였다. 38회 정렬을 반복 수행하여 구한 방위각은 전체평균을 적용한 자체정렬시 87.89287°이며, 곡선적합을 적용한 자체정렬에서는 87.89258°가 되었다.

ENU좌표계 기준  $[0^\circ \ 0^\circ \ 90^\circ]$  자세의 경우 -N축을 가리키고 있는 X축 가속도계의 온도안정화 오차가 E축을 가리키고 있는 Y축 자이로에 영향을 주므로, 실제 실험시 방위각오차에 영향을 주는 가속도계 온도안정화 오차를 확인하려면 Roll각의 변화량을 관찰해야 한다. Fig. 8에 38회 연속정렬실험 중 첫 번째 정렬실험 시 Roll각을 나타내었다.

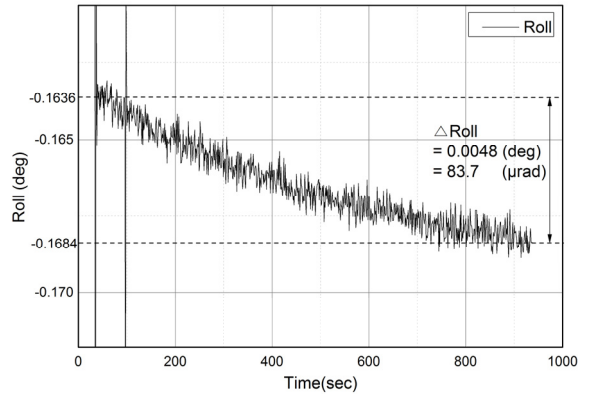


Fig. 8. Temperature stabilizing error in roll angle during self alignment

수평축 정렬 시 X축 가속도는 다음과 같다.

$$f_{xb} = -g\Phi_y(X) \quad (18)$$

여기서  $f_{xb}$ 는 동체좌표계상 X축의 가속도,  $g$ 는 중력가속도이다.  $\Phi_y$ 는 동체좌표계상 Y축이며, 자세 Roll각을 의미한다. Fig. 8과 식 (18)에 의해 본 실험에서의 가속도계 온도안정화 오차는 약 83.7  $\mu\text{g}$ 로 확인되었다.

실험을 수행하는 동안 자체정렬이 38회 수행되지만 전원이 인가되어 있는 상태에서는 온도안정화 과정이 진행되기 때문에 첫 번째 자체정렬에서 온도안정화 오차가 가장 크게 나타나며 이후 정렬에서는 온도안정화 오차가 감소하는 패턴을 보이게 된다. 따라서 연속 정렬실험 중 온도안정화 오차가 가장 크게 나타나는 첫 번째 자체정렬 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 방위각 오차의 기준은 38회 연속실험을 통해 얻은 방위각 평균으로 하였다. 방위각 평균을 기준으로 했을 때 방위각 오차가 0.05° 이내가 되는 시점은 전체평균을 적용한 경우에는 529초가 필요한 반면에 곡선적합

을 적용할 경우에는 355초가 소요되었다. 따라서 가속도계 온도안정화 오차가 존재할 경우, 곡선적합을 적용하여 자체정렬을 수행하여 방위각 정밀도 확보 및 정렬시간 단축이 가능함을 실험을 통하여 확인하였다.

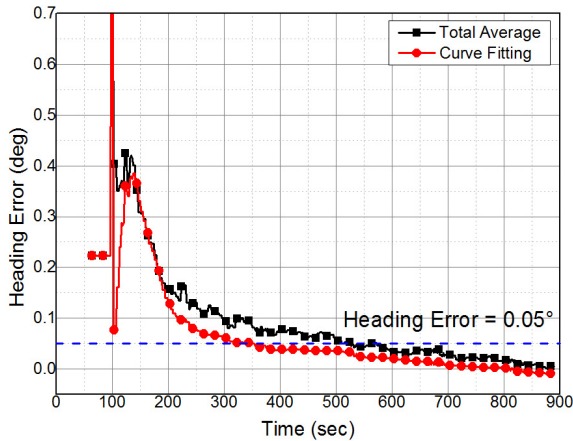


Fig. 9. Heading error estimate from INS experiment results

### 5. 결론

본 논문에서는 관성항법장치가 고정이득 방식의 자체정렬을 수행할 경우, 가속도계 온도안정화 오차에 의한 방위각 정밀도 저하를 막고 정렬시간을 단축시켜 자체정렬 성능을 개선하는 방법을 제안하였다. 가속도계 온도안정화 오차가 있는 경우, 수평축 제어신호에 오차가 유발되어 방위각 오차를 발생시키게 된다. 또한, 수평축 제어신호는 전체평균을 취하여 방위각을 구하는데, 이때 평활화 효과로 인해 정렬시간이 증가된다. 이를 개선하기 위하여 수평축 제어신호의

곡선적합을 통하여 방위각을 계산하는 새로운 방법을 제안하였다. 제안된 방법을 적용할 경우, 전체평균을 적용한 방법보다 방위각 추정성능이 개선되었으며 정렬시간이 단축되는 것을 시뮬레이션 및 실험을 통하여 확인하였다.

### References

- [1] O. Salychev, "Inertial Systems in Navigation and Geophysics," Bauman MSTU Press, pp. 155-168, 1998.
- [2] D. H. Titterton and J. L. Weston, "Strapdown Inertial Navigation Technology," Institution of Engineering & Technology, pp. 259-272, 1998.
- [3] K. R. Britting, Inertial Navigation Systems Analysis, John Wiley & Sons, Inc., 1971.
- [4] C. J. Kim, Performance Analysis of Self-Alignment in the Temperature Stabilizing State of Inertial Navigation System, JKAS, 2011.
- [5] Modular Azimuth Position System, Honeywell Technical Description, 1986.
- [6] S. A. Foote and D. B. Grindeland, Model QA3000 Q-FLEX<sup>®</sup> Accelerometer High Performance Test Results, IEEE, 1992.
- [7] QA-3000 Accelerometer, Inertial & Sensor Products, AlliedSignal Aerospace, 1994.
- [8] QA-2000 Accelerometer, Inertial & Sensor Products, AlliedSignal Aerospace, 1994.
- [9] J. H. Oh, "Performance Improvement Method of Fixed Gain Self-Alignment in the Temperature Stabilizing State of Inertial Navigation System," KIMST Annual Conference Proceedings, 2015.