

## 관성항법장치의 관성 센서축과 하우징 축과의 비정렬 측정과 보상에 관한 연구

### A Study on Methods of Measuring and Compensating Misalignment between Inertial Sensor Body and Housing Frame

유해성*	김태훈*	김천중*	이윤선*	박흥원*
Haesung Yu	Taehoon Kim	Cheon Joong Kim	Youn Seon Lee	Heung-won Park

#### Abstract

In guided missile systems, reducing terminal-position error is the primary objective of the inertial navigation system. As a seeker is used to sense and track a target, the critical function of the inertial navigation system is to provide the seeker with accurate missile attitude information and help the seeker to keep tracking a target continuously. As inertial sensor body and missile body alignment errors are taken into account, it is desirable to minimize the alignment errors between the missile seeker and the attitude of inertial navigation system. Among the alignment errors, this paper addresses the methods of measuring and compensating misalignment between inertial sensor body and housing frame and shows test results of several experiments.

Keywords : Inertial Sensor(관성 센서), Misalignment(비정렬), Seeker(탐색기), Inertial Navigation System(관성항법장치)

#### 1. 서론

미래의 유도 무기 발전 추세가 정밀 타격 형태로 진행됨에 따라서 유도탄은 위치, 속도 및 자세 정보를 제공하는 관성항법장치(Inertial Navigation System)와 더불어 종말 오차를 향상시킬 수 있는 탐색기(Seeker)를 채택하는 방향으로 진행되고 있다<sup>[1]</sup>. 탐색기는 목표물에 대한 3차원의 영상 정보를 가지고, 종말 단계에서 관성항법장치의 자세 정보를 이용하여 예상되는

2차원 정보를 추출하며, 비행 중 영상 장치에서 획득된 정보와 융합하여 임무를 수행한다. 이 때 관성항법장치와 탐색기의 비정렬(Misalignment) 즉, 관성센서의 동체 좌표계(Body Frame)와 탄의 동체 좌표계 사이의 비정렬에 의해서 2차원 정보를 추출하고 획득하는 과정에서 오차를 발생시킬 수 있으며, 자세 정보를 이용하는 종말 단계에서의 유도에 오차를 유발하게 된다. 일반적으로 관성항법장치의 자세는 관성항법장치의 센서 뭉치(Inertial Measurement Unit)의 특정축(자이로나 가속도계축)을 기준으로 제공하는데 반해서, 탐색기가 획득하는 2차원 정보는 실제 유도탄의 자세를 기준으로 획득되어 지기 때문에 이런 오차가 유발될 수 있다.

† 2012년 4월 16일 접수~2012년 7월 13일 게재승인

\* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 유해성(haesong7@add.re.kr)

관성항법장치와 탐색기의 비정렬 오차는 관성항법 장치의 자체 성능과 관계된 자세 오차를 제외하고, 크게 3가지 형태로 구성된다. 첫째로 관성항법장치의 센서측과 센서가 장착된 하우징의 비정렬이 있으며, 두 번째로 관성항법장치의 하우징이 장착되는 부분과 탐색기의 하우징이 장착되는 부분과의 기계적 가공 오차에 의한 비정렬이 있다. 마지막으로 탐색기가 장착되는 하우징과 영상을 획득하는 부분 사이의 비정렬이 있다.

본 논문에서는 첫번째 오차 요소인 Strapdown형 관성항법장치(SDINS)의 센서측과 하우징 측의 비정렬을 최소화하는 방법에 대해서 기술한다. 세부적으로는 관성항법장치의 센서측과 하우징 측 사이의 비정렬을 계산하는 방법과 그 비정렬을 보상하는 방법에 대해서 논의한다. 비정렬을 계산하는 방법으로는 Rate Table을 이용하여 구하는 방법과 회전에 의한 방법에 대해서 기술하였으며, 각 방법의 장단점과 가정들에 대해서 논의한다. 비정렬을 보상하는 방법으로는 관성항법 장치의 자세 출력에 이용되는 DCM(Directional Cosine Matrix)을 통해서 보상하는 방법과 자세 계산 방법으로 사용되는 Quaternion을 통해서 보상하는 방법이 있을 수 있으며, 여기서는 제공되는 자세 정보의 최종 출력만을 보상하는 것에 대해서 논의한다.

본문에서 2장의 ‘가’절에서는 관성항법장치의 자세 오차에 대해서 살펴보고, ‘나’절에서는 정의된 축에 대해서 기술한다. 3장에서는 비정렬을 측정하는 여러 가지 방법에 대해서 언급하며, 4장에서는 제시된 방법으로 비정렬을 측정하고, 보상하는 검증 시험 결과를 제시한다. 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

## 2. 본 론

### 가. 센서에 의한 자세 오차와 비정렬

관성항법장치는 기준좌표계로 항법 좌표계(Navigation Frame, 여기서는 ENU frame)을 설정하고, 그 항법 좌표계가 각각의 축에 대해서 미소각 만큼 틀어진 좌표계를 플랫폼 좌표계(Platform frame)라 하고 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$X^P = C_N^P X^N = \begin{bmatrix} 1 & \phi_U & -\phi_N \\ -\phi_U & 1 & \phi_E \\ \phi_N & -\phi_E & 1 \end{bmatrix} X^N$$

여기서,  $\phi_E, \phi_N, \phi_U$ 는 관성항법장치의 자세 오차를 나타내며,  $\vec{\phi} = [\phi_E \ \phi_N \ \phi_U]^T$ 이다.

관성항법장치는 이 플랫폼 좌표계에 대해서 항법 계산을 수행하고, 이 자세 오차와 관성 센서 오차에 의해서 속도 오차 및 위치 오차를 유발하게 된다. 이와 같은 자세 오차는 자체정렬의 경우 주로 센서오차에 의해 결정되며, 다음과 같이 알려져 있다<sup>[2~5]</sup>.

$$\phi_E(0) = \frac{\delta\alpha_N}{g}, \quad \phi_N(0) = \frac{-\delta\alpha_E}{g}, \quad \phi_U(0) = \frac{\beta_E}{\Omega \cos\phi}$$

여기서,  $\delta\alpha_E, \delta\alpha_N$ 은 E, N축 가속도계 바이어스,  $\beta_E$ 는 E축 자이로 바이어스,  $\Omega$ 는 지구 회전 각속도,  $\phi$ 는 위도, 0는 초기치임을 나타낸다.

예를 들어, 가속도계 바이어스 100ug는 0.0057deg 정도의 수평축 초기 자세 오차( $\phi_E, \phi_N$ )를, 위도 35도 부근에서 자이로 바이어스 0.01deg/hr에 대해서는 0.057 deg 정도의 수직축 초기 자세 오차( $\phi_U$ )가 유발된다.

이와 같은 관성항법장치의 항법 좌표계에서의 자세 오차를 관성항법장치의 자세에 따라서 동체 좌표계에서의 오차(Roll, Pitch, Yaw error)로 표현하더라도 유도탄의 동체 좌표계와 관성항법장치의 하우징과의 요구되는 비정렬( $\pm 0.3^\circ$ )에 비하면 매우 작은 량이다. 따라서 본 논문에서는 자체 정렬을 수행하였을 때 발생하는 관성 센서에 의한 자세 오차는 무시하도록 한다. 하지만, 이 자세 오차와는 별개로 관성 센서몽치가 하우징에 장착되면서 발생하는 비정렬은 아래 그림의 예에서 같이 관성센서몽치(IMU : Inertial Measurement Unit)와 내·외부로 부터 발생하는 진동을 차단하기 위해서 장착되는 댐퍼(Damper)를 이용하면서 크게 발생할 수 있고, 그 크기가 자세 오차에 비해 훨씬 크게 존재하게 된다.

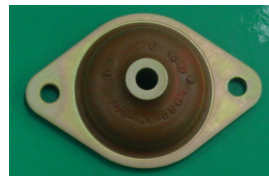


Fig. 1. Example of damper

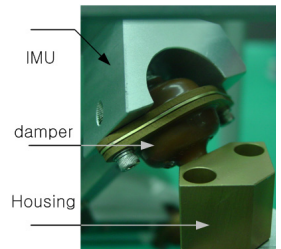


Fig. 2. Example of installation

본 논문에서는 이렇게 틀어진 관성센서의 축의 자세가 아닌, 하우징의 바닥면과 이에 수직인 기준면(일반적으로 관성항법장치가 장착되는 바닥면은 그 평면도 오차를 최소화 되도록 기계적 가공이 이루어진다)으로 자세를 출력할 수 있도록 비정렬을 측정하고 보상하는 방법에 대해서 기술한다.

나. 하우징 축과 관성 센서축 정의

관성항법장치의 하우징 축(Box frame, 여기서 하우징과 Box는 같은 의미로 사용한다)은 관성항법장치가 유도탄에 장착되는 바닥면을 기준으로 설정하였으며, 관성 센서축은 축간 12개의 비정렬이 정의 될 수 있다. 하지만, 아래 그림과 같이  $\alpha_{xy} = \alpha_{xz} = \alpha_{yz} = 0$  이 될 수 있도록 동체 좌표계의 xy평면이 실제 가속도계의 xy평면과 동일하게 설정한다.

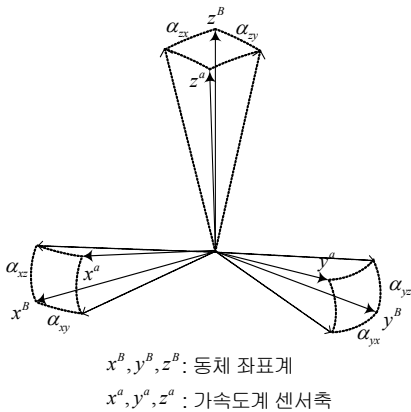


Fig. 3. Definition of inertial sensor axis

여기서,  $\alpha_{ij}(i \neq j)$ 는 비정렬 오차로 i축 가속도계가 j축 방향으로 틀어진 각을 의미한다.

3. 비정렬 측정 방법

비정렬 측정방법에는 하우징과 관성센서 사이의 비정렬인 미소각 3개를 동시에 측정할 수 있는 Rate Table을 이용하는 방법과 회전에 의해서 두개의 미소각을 측정할 수 있는 회전에 의한 방법이 있다.

가. Rate Table을 이용하는 방법(방법 1))

일반적으로 SDINS는 각각의 자이로와 가속도계를

관성센서몽치에 조립한 후, 시스템 단계에서 교정(Calibration)이라는 절차를 수행한다. 교정은 크게 관성 센서의 출력을 그대로 이용하는 직접(Direct) 교정 방식과 항법을 수행하면서 항법에서 발생한 속도 오차의 기울기를 이용하여 센서 오차를 찾는 간접(Indirect) 교정 방식이 있다. 위 두 가지 방식 모두 정밀한 자세 제어가 가능한 Rate Table(RT)을 이용하며, 이 RT은 항법축에 대해서 수평축 자세와 수직축 자세를 정밀하게 제어할 수 있다. RT을 이용하는 방법은 이 RT의 자세가 정확하게 알려졌다는 가정하에 이 자세를 이용하여 수행하게 된다.

$$C_{\text{box}}^N = C_b^N C_{\text{box}}^b \tag{1}$$

관성항법장치가 RT에 장착되면 항법 좌표계에 대한 하우징의 자세 DCM  $C_{\text{box}}^N$ 을 알게 된다. 그리고 관성항법장치가 항법을 수행하게 되면 항법 좌표계에 대한 관성 센서축의 자세 DCM  $C_b^N$ 을 계산하게 된다.

$$C_{\text{box}}^b = C_N^b C_{\text{box}}^N \tag{2}$$

그러면, 식 (2)으로 부터 관성 센서와 하우징에 의한 자세 정보를 계산할 수 있게 된다.  $C_{\text{box}}^b$ 는 두 축의 미소 각이므로 Euler 각 즉, 3개의 각 변수로 관성항법장치의 일정 메모리에 저장한다. 이렇게 저장된 정보는 관성항법장치가 다시 항법을 수행하면 식 (1)과 같이 보상하여 출력함으로써 관성항법장치의 자세 출력을 하우징 기준으로 제공하게 된다.

예를 들어, 관성항법장치가 항법 좌표계에 대해서 아래와 같이 놓여 있을 경우,

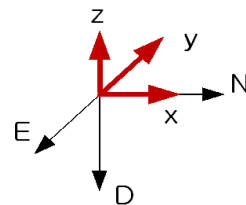


Fig. 4. Example of INS installation

하우징에 대한 항법 좌표계는  $C_{\text{box}}^N = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$  이

고, 항법을 수행하여 출력하는  $C_b^N = \begin{pmatrix} C_0 & C_1 & C_2 \\ C_3 & C_4 & C_5 \\ C_6 & C_7 & C_8 \end{pmatrix}$  이면,

식 (2)로 부터  $C_{box}^b$  을 계산하고, DCM  $C_{box}^b$  로부터 Euler각으로 표시된 비정렬을 계산할 수 있게 된다.

나. 회전을 이용하는 방법

1) 수평축 비정렬 측정 방법(방법 2))

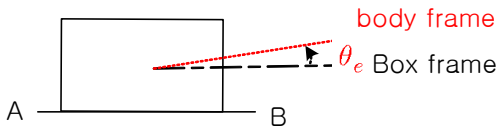


Fig. 5. Definition of level misalignment

위 그림과 같이 하우징에 대해서 센서축이  $\theta_e$  만큼 틀어져 있다고 가정하고, 이  $\theta_e$ 를 구하는 과정을 알아 보자. 관성항법장치를 정반 위에 위치시키고, 여기서 관성항법장치의 Box frame이 바닥면 AB에 대해서 평행하다고 가정하고(Box frame의 수평면을 바닥면으로 설정하였으므로), 정반은 평면도를 유지한다고 가정하면 다음 Fig. 6, 7과 같이 회전에 의해서  $\theta_e$ 을 계산할 수 있다. 이때 관성항법장치의 바닥면 AB는 장착되는 면으로 비정렬을 최소가 되게 하기 위해 실제적으로 평면도를 정밀한 가공을 하게 된다.

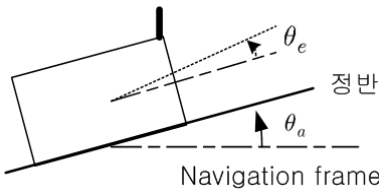


Fig. 6. Before rotating(a)

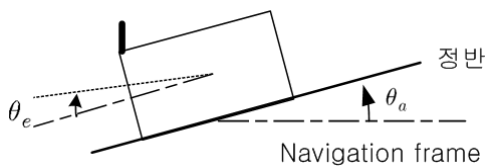


Fig. 7. After rotating(b)

관성항법장치는 항법을 수행하면 Navigation frame에 대해서 측정하는 각은  $\theta_{ma}$ 으로

$$\theta_{ma} = \theta_e + \theta_a$$

여기서,  $\theta_a$ 는 정반이 기울어짐을 나타낸다. 이런 상태에서 관성항법장치를 평면도가 일정한 정반에서 회전을 수행하면, Navigation frame에 대해서  $\theta_{mb} = \theta_e - \theta_a$ 을 측정하게 된다.

따라서,

$$\theta_e = \frac{(\theta_{ma} + \theta_{mb})}{2} \quad (3)$$

로 계산할 수 있다.

위와 같은 방법을 통해 수평면의 오차는 계산할 수 있으나, 수직축 오차는 수평면 회전으로 Navigation frame의 측정치와 오차가 분리되지 않으므로 위와 같은 회전으로는 계산을 할 수 없다.

2) 수직축 비정렬 측정 방법 1(방법 3))

Fig. 8은 수직축 비정렬을 나타내며, CD는 관성항법장치의 하우징의 후면을 나타낸다.

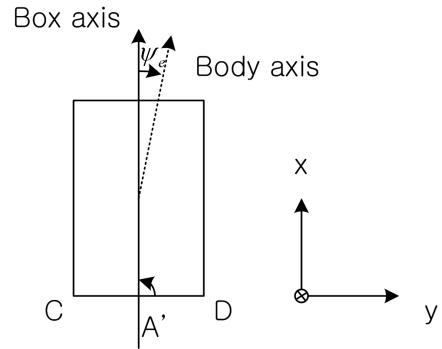


Fig. 8. Definition of vertical misalignment

관성항법장치를 수직으로 세워, 아래와 같이 위치시키면 관성항법장치의 heading 출력  $\psi_{ma} = \psi_m$ 을 측정한다.

이 상태에서 정반에서 관성항법장치를 평면도를 유지하면서 회전을 하게 되면, 회전 후의 측정치  $\psi_{mb} = \psi_m + 2\psi_e$ 을 측정한다.

$$\psi_e = -\frac{(\psi_{ma} - \psi_{mb})}{2} \quad (4)$$

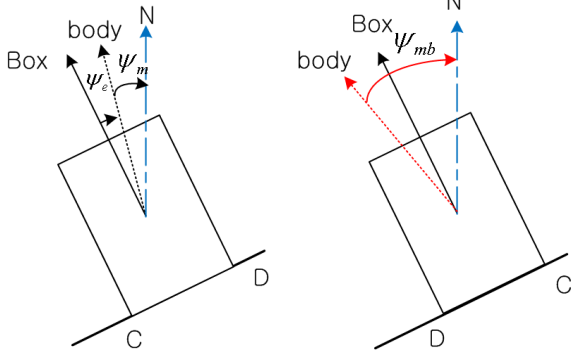


Fig. 9. Before rotating(a)      Fig. 10. After rotating(b)

여기서, 고려해야 할 사항으로는 관성항법장치를 세웠을 경우의 바닥면이 되는 CD, 즉 뒷면과 관성항법장치의 중심축이 직각을 이루어야 한다고 가정해야 한다는 점이다. 예를 들어 너비가 20cm인 관성항법장치가 A'D 10cm 면에 대해서 0.1mm의 오차가 있으면  $0.1/100 * (180/\pi) = 0.057\text{deg}$ 의 오차가 발생하고 이 오차는 0.01deg/hr 급 자이로의 초기 수직축 자세 오차에 해당되는 큰 양이다. 실제적으로 하우징의 뒷면이 관성센서의 중심축과 수직이 되도록 기계적 가공을 하지 않으므로 위의 방법을 이용하기는 어렵다.

3) 수직축 비정렬 측정 방법 (방법 4))

실제적으로 관성항법장치의 중심축과 뒷면이 수직이 되게 가공하기 어려운 상황에서 관성항법장치를 유도탄에 장착하고, 롤축 회전을 통해 피치와 수직축 비정렬 구하는 방법에 있을 수 있다. 이 방법에서 유도탄에 관성항법장치의 바닥면 AB를 이용하여 장착된 상황에서 측정하며, 유도탄의 중심축이 하우징의 중심축과 동일하다는 가정하에 이루어진다.

관성항법장치를 유도탄에 장착한 상태에서 항법을 수행하면 유도탄 축 Mb에 대해서 관성항법장치의 body 축 ba의 회전 전 출력은 각각 다음과 같다.

$$\theta_{ma} = \theta + \theta_e, \quad \psi_{ma} = \psi + \psi_e$$

회전 후 출력은 각각 다음과 같다.

$$\theta_{mb} = \theta - \theta_e, \quad \psi_{mb} = \psi - \psi_e$$

따라서,

$$\begin{aligned} \theta_e &= (\theta_{ma} - \theta_{mb})/2 \\ \psi_e &= (\psi_{ma} - \psi_{mb})/2 \end{aligned} \quad (5)$$

위와 같이 피치축 및 수직축 비정렬을 계산할 수 있다.

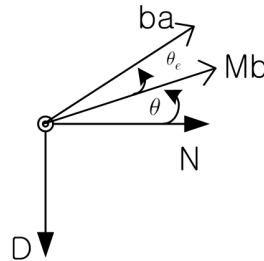


Fig. 11. Before rotating (a) : Pitch

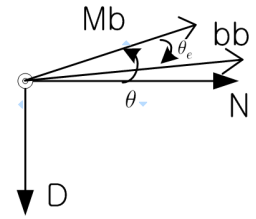


Fig. 12. After rotating(b) : Pitch

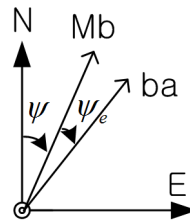


Fig. 13. Before rotating (a) : Yaw

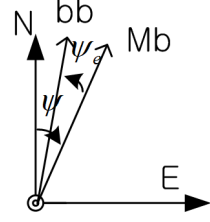


Fig. 14. After rotating(b) : Yaw

다. 비정렬의 물리적 의미

위와 같이 측정된  $C_{\text{box}}^b$  에서 계산한 미소 Euler 각  $\phi_e, \theta_e, \psi_e$ 의 물리적 의미를 생각해 보자.

예를 들어,  $C_b^N$ 에서 Roll-Pitch-Yaw을 RPY(321) convention으로 구한 Euler 각은 항법 좌표계를  $Y \rightarrow P \rightarrow R$ 로 돌리면 body frame과 일치된다는 것을 의미한다. 즉  $Y \rightarrow P \rightarrow R$  순서로 body가 항법 좌표계로부터 격리되어 있다는 것을 뜻한다.

그러면, 마찬가지로  $C_{\text{box}}^b$ 에서 계산된 Euler 각  $\phi_e, \theta_e, \psi_e$ 는 box frame이 body로부터 미소각 만큼 격리되어 있다는 것을 의미한다. 미소각이므로 순서는 의미가 없어진다. 이 물리적 의미가 중요한 이유는 하우징 회전에 의해서 계산한 비정렬각과 회전을 이용하여 계산한 미소각의 의미가 서로 반대를 나타내기 때문이다.

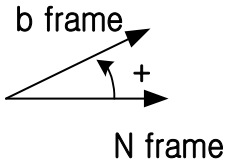


Fig. 15.  $C_b^N$

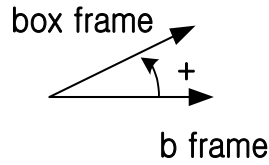


Fig. 16.  $C_{box}^b$

즉, 위와 같이 회전을 이용하여 각을 구한 것은 box가 body에 대해서 틀어진 각을 +로 정의한 것이므로 위의 Rate Table은 body가 box에 대해서 틀어진 각을 + 정의하여 계산한 결과가 되므로 부호가 반대로 나타나게 된다. 회전을 이용한 비정렬각 찾기는 결국 하우징을 기준으로 회전을 시키므로 하우징으로 부터의 각을 + 방향으로 정의하여 계산하였으므로 DCM을 이용하여 보상할 때, 부호를 반대로 구성하여 수행하여야 한다.

#### 4. 검증 시험

시험 대상 관성항법장치는 ‘2.가’의 예에서든 성능 급이고, 바닥면만 정밀 가공이 이루어 졌으며, 수직축 비정렬을 회전에 의해서 구하기 위한 뒷면의 가공 오차는 자이로 성능에 비해 훨씬 큰 것으로 판단 되어 수직축 비정렬 측정 방법 4)로 측정하여 위에 제시한 방법의 유효성을 검증한다.

RT를 이용하는 방법은 RT의 제한사항으로 인해 roll이 180°, pitch 및 heading은 0°으로 회전된 상태에서 비정렬을 측정한다(Fig. 4의 예).

Table 1은 RT를 이용한 측정결과를 보여준다. 보상은 비정렬 보상전 항법을 수행하여 획득된 자세이며, 보상 후는 측정된 비정렬을 메모리에 저장하고, 다시 전원 인가 후 항법을 수행하여 얻은 결과이다. 비정렬값은 이 때 메모리에 저장된 3개의 비정렬 값을 나타낸다.

Table 1. Method using RT(Method 1)

	보상 전	보상 후	비정렬
Roll	179.9229	179.9986	0.07670
Pitch	-0.0922	0.0015	-0.0922
Heading	-0.11668	-0.0255	-0.1170

RT를 이용한 비정렬 측정방법으로 계산된 비정렬을 보상한 후 출력된 자세 중 수평축 자세는 가속도계 오차 수준의 차이만 존재하는 것을 알 수 있다.

Table 2는 관성항법장치를 정반에 위치시키고, 관성항법장치를 Yaw 축으로 180° 회전시켜 수평축 비정렬을 측정한 결과이다. 이는 위에서 기술한 것과 같이 반대 부호로 나타나며, 방법 1)과 비교하여 보면 두 방법에 의한 차이가 가속도계의 바이어스 오차 이내임을 알 수 있다.

Table 2. Method using level rotation(Method 2)

	회전 전	회전 후	비정렬
Roll	-0.0800	-0.0748	-0.0774
Pitch	0.0907	0.0854	0.0880
Heading	5.4408	-178.5594	-

Table 3은 유도탄에 장착된 상태에서 방법 4)에 의해 측정된 결과이다.

Table 3. Method 2 for vertical misalignment(Method 4)

	회전 전	회전 후	비정렬
Roll	-0.0107	179.9252	-
Pitch	0.0820	-0.1480	0.1150
Heading	-31.8010	-32.1360	0.1670

방법 4) 역시 방법 1)과 비교하였을 때 센서의 바이어스 오차 이내임을 알 수 있다.

Table 4. The difference between each method

	방법 1)- 방법 2	방법 1)- 방법 4	방법 2)- 방법 4
Roll	0.0007	-	-
Pitch	0.0042	0.0228	0.0270
Head	-	0.0500	-

Table 4는 세가지 방법에 측정 비정렬의 오차를 나타내며 각 결과는 가속도계 및 자이로 오차에 이내이며, 3가지 방법 모두 비정렬 측정에 유효한 방법으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 유도탄에 자세 정보를 제공하는 관성항법장치의 관성센서 축과 하우징 축 사이의 비정렬을 측정 보상하는 방법을 제시하였다. 3개의 Euler 각으로 표현되는 비정렬을 동시에 측정할 수 있는 RT를 이용한 방법과 각기 다른 2개의 비정렬을 회전에 의한 측정 방법을 비교하여 각각의 방법이 유효함을 보였다. 그리고 각각의 방법이 측정할 수 있는 비정렬의 종류 및 고려해야할 가정들을 살펴보았다. 이 비정렬을 최소화함으로써 유도에 의한 종말 오차 향상을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

## References

- [1] 이성만, 이수창, 오현식, 성덕용, “탑재비행 시험을 이용한 유도무기탑재 장비의 시험평가”, Vol. 35. No1, pp 72~78, 한국항공우주학회지.
- [2] G. M. Siouirs, “Aerospace Avionics Systems, A Modern Synthesis”, Academic Press, 1993.
- [3] Kenneth R. Britting, Sc.d., Inertial Navigation Systemes Analysis, Wiley-Interscience, 1971.
- [4] Oleg S. Salychev, “Inertial Systems in Navigation and Geophysics”, Bauman MSTU Press, Moscow, 1998.
- [5] Robert M. Rogers, Applied Mathematics in Integrated Navigation Systems 2nd Ed., AIAA, 2003.