

# 실험실 시험 장착오차를 고려한 관성측정장치 오차 모델링

論 文  
48A-4-11

## Modelling of IMU Error with Setting Misalignment in Laboratory Test

成相萬\* · 李達鎬\*\* · 李章揆\*\*\*  
(Sang-Man Seong · Dal-Ho Lee · Jang-Gyu Lee)

**Abstract** - The errors of IMU(Inertial Measurement Unit) can be divided into deterministic and random errors. Since the required accuracy of the IMU is very high, the errors must be compensated by using an accurate error model. In this paper, we present a method to get a more accurate error model in a laboratory test. This was done by considering the setting misalignment in the laboratory test in the IMU error model. We considered here the IMU which consists of DTG(dynamically tuned gyroscope) and pendulum type accelerometer. First, it was shown that the estimation result from the model which does not contain the setting misalignment gives considerable estimation error at the validation test. Second, a new model considering the setting misalignment was derived. Finally, by validation test using the estimation results from new model the validity of it was proved.

**Key Words** : IMU, error model, laboratory test, setting misalignment, estimation error

### 1. 서 론

관성측정장치는 항법시스템의 주센서로서 자이로 및 가속도계와 주변 전자장치로 구성되어 있으며 항체의 각속도 및 가속도 정보를 항법시스템에 제공하는 장치이다. 자이로 및 가속도계의 측정치는 오차를 포함하고 있으므로 정확한 각속도 및 가속도 정보를 제공하기 위해서는 오차보상 과정이 필요하다. 만약 오차가 제대로 제거되지 않으면 항법시스템은 심각한 성능 저하를 일으키므로 이 과정은 매우 중요하다.

오차보상을 위해서는 오차모델을 설정하고 시험에 의하여 그 계수를 추정하는 것이 선행되어야 하는데 본 논문에서 다루고자 하는 동조자이로 및 가속도계 관한 연구로서 참고문헌 [1]~[5] 등이 있다. 참고문헌 [1][2]에서는 동조자이로에서 각 오차항들이 발생하는 원인을 설명하고 이로부터 수학적 모델식을 구하였다. 참고문헌[3]에서는 동조자이로(dynamically tuned gyro) 및 가속도계 오차모델의 정적 및 동적 오차 계수를 시험을 통하여 결정하는 방법을 제시하였다. 시험은 일정한 각속도를 인가하는 레이트시험(rate test), 지구자전각속도와 중력을 이용하는 다위치시험(multiposition test), 그리고 동적시험으로 구분되었다. 이러한 시험 방법으로 실제 시험을 수행하는 과정 및 결과가 참

고문헌 [4]에 제시되었다. 참고문헌 [5]에서는 자이로의 경우 회전축(spin axis)에 관계없이 대부분의 입력항에 의해 오차가 유발되는 오차모델 형태에 대해 다루었다.

실험실 시험에서 관성측정장치의 오차를 추정하고자 하는 경우에 각속도 및 가속도를 인가할 수 있는 장치가 필요한데 이를 위해 흔히 레이트테이블이 사용된다. 레이트테이블은 테이블 위에 장착된 센서의 각 축으로 각속도를 인가하고 또한 일정한 자세를 유지함으로써 중력가속도 및 지구자전각속도 입력을 이용할 수 있는 장치로서 정확한 추정을 위해서는 높은 정밀도를 요구한다. 그런데 만약 센서 즉 관성측정장치를 테이블 위에 장착할 때 레이트테이블의 축과 정확히 일치하지 않는다면 시험에서 가하는 입력에 오차가 발생하게 되어 결과적으로 추정오차를 유발하게 된다. 참고문헌[1]~[5]에 제시된 모델을 그대로 사용하면 장착오차가 큰 경우에는 이를 고려하지 않고 추정한 경우에 추정오차가 유발될 수 있는데 이를 해결하기 위하여 본 논문에서는 장착오차를 고려한 새로운 오차모델을 구성하고 그 타당성을 검증한다. 대상으로 하는 관성측정장치는 Litton사의 LP-81로서 2자유도 동조자이로 2개와 진자형 가속도계 3개로 구성되어 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서 장착오차를 고려하지 않은 모델식으로서 시험에 의한 오차계수 추정을 한 결과는 검증시험에서 무시할 수 없는 오차를 유발시켰음을 보였고, 3장에서는 장착오차를 모델에 추가함으로써 새로운 오차식을 구하였다. 4장에서 장착오차를 고려한 새로운 모델식으로 계수추정한 결과에 대한 검증시험으로 제시된 오차모델의 타당성을 검증하였으며, 끝으로 5장에서 결론이 제시되었다.

\* 正 會 員 : 서울대 工大 電氣工學部 博士課程

\*\* 正 會 員 : 暎園大 工大 電子工學科 助教授 · 工博

\*\*\* 正 會 員 : 서울대 工大 電氣工學部 教授 · 工博

接受日字 : 1998年 11月 4日

最終完了 : 1999年 2月 19日

2. 장착오차를 고려하지 않은 모델에 의한 추정 및 검증

본 장에서는 장착오차를 고려하지 않은 오차모델을 사용하여 계수를 추정하고 그 결과를 검증시험을 통하여 검증한다. 오차모델 및 계수추정 방법은 참고문헌[3]이 대표적이므로 이를 따른다. 본 연구에서 사용한 레이트테이블은 Acutronics사의 ACT-2000으로 자세오차  $10^{-4}$ [deg], 각속도 오차  $10^{-3}$ [deg/sec] 정도의 정확도를 지니고 있는 2축 레이트테이블이다.

가속도계 및 자이로의 시험 위치를 선정하기 위하여 항법 좌표계, 레이트테이블좌표계, 관성측정장치좌표계, 센서좌표계 등이 필요한데 그 정의는 그림 1과 같다. 그림 1에서 tilt 축과 table 축은 레이트테이블의 2축을 의미하는데 전자는 외부에서 회전하는 축이고 후자는 외부 축에 의해 회전된 상태에서 회전을 가하는 내부 축이다. 여기서  $n$ 은 항법좌표계(ENU),  $m$ 은 관성측정장치좌표계,  $t_0$ 는 레이트테이블 초기 좌표계로 항법좌표계의 ENU와 일치하며,  $t$ 는 레이트테이블 위에 고정된 좌표계로 초기에는  $t_0$ 와 일치하는 좌표계를 의미한다. 장착오차를 고려하지 않은 모델은 관성측정장치좌표계  $m$ 과 레이트테이블 고정 좌표계  $t$  사이에 오차가 없다고 가정하는 것이므로 일치한다.

먼저 가속도계 모델로서 각축의 가속도를 독립적으로 측정하기 위하여 1자유도 진자형 가속도계 3개가 서로 수직이 되도록 배치되었다고 가정한다. 이 때 관성측정장치좌표계의 3축을  $x, y, z$  라고 한다면 오차모델은 식 (1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} K_x V_x \\ K_y V_y \\ K_z V_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & 1 & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_x a_x^2 \\ n_y a_y^2 \\ n_z a_z^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기에서 사용된 기호의 정의 및 단위는 다음과 같다.

- $K_{i,i}$ -축 환산계수[g]  $V_{i,i}$ -축 가속도계 출력
- $\epsilon_{ij}$ -가속도계 비정렬  $a_i$ - $i$ -축 입력 가속도[g]
- $n_{i,i}$ -축 가속도계 제공항 계수[g/g<sup>2</sup>]  $b_{i,i}$ -축 바이어스[g]

$\epsilon_{ij}$ 는 가속도계 센서 축과 관성측정장치 축과의 비정렬(misalignment) 오차를 반영하는 부분으로서 두 축사이의

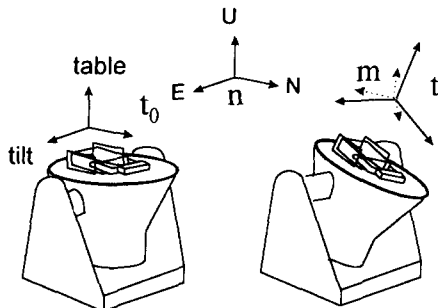


그림 1 실험실 시험시 좌표계정의  
Fig. 1 Definition of coordinates

좌표변환행렬에 대한 미소각 근사에 의하여 모델링 한다. 비정렬 오차가 없는 이상적인 경우에는 단위행렬이 된다. 바이어스 항은 랜덤오차가 포함된 항으로서 정규오차에서는 상수로 가정한다.

가속도계 계수 추정은 한 축에 대하여 추정해야 할 계수가 5개이므로 최소자승법을 사용하기 위해서는 5가지 이상의 독립적인 측정치를 얻어야 한다. 여기서는 사용된 2축 레이트테이블에 적합한 16가지 독립된 위치를 선정하였는데 표 1에서 그 8가지 위치(시험위치번호 1~8)를 나타내었다. 나머지 8가지 위치(시험위치번호 9~16)는 표 1과 다른 점이 tilt를 225° 회전하는 것으로 이때 z축 가속도 입력은 부호가 반대가 된다. 계수 추정방법은 다른 두 축에 대해서도 유사하므로 x축의 경우에 대해서만 설명한다. 16위치에서 가속도를 측정하고 2위치를 적절하게 선정하여 차분을 해주면 가속도계 제공항과 바이어스가 제거되고 다음과 같이 8개의 측정치 개수가 있는 측정식 (2)를 얻을 수 있다.

$$Y = HX + v$$

$$\begin{bmatrix} V_x(1) - V_x(13) \\ M \\ V_x(8) - V_x(16) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \sqrt{2}g & \sqrt{2}g \\ & M & \\ -g & g & \sqrt{2}g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/K_x \\ \epsilon_{xy}/K_x \\ \epsilon_{xz}/K_x \end{bmatrix} + v \quad (2)$$

여기에서 사용된 기호의 정의는 다음과 같다.

- $V_x(n)$ :  $n$ 번째 위치에서의 x축 가속도계출력( $n=1,2,\dots,16$ )
- $g$ : 중력
- $v$ : 측정잡음

계수벡터를 다음과 같이 최소자승법으로 추정할 수 있다.

$$\hat{X} = (H^T H)^{-1} H^T Y$$

이와 같은 방법으로 추정된 계수에 대하여 검증시험을 수행하여 모델의 타당성을 확인한다. 검증시험은 계수를 추정하는 시험과 같은 방법으로 하며 이번에는 역으로 추정된 계수로서 입력 가속도를 구한다. 식 (3)은 시험위치 1과 13의 데이터로부터 입력을 계산하는 예이다.

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/K_x & \epsilon_{xy}/K_x & \epsilon_{xz}/K_x \\ \epsilon_{yx}/K_y & 1/K_y & \epsilon_{yz}/K_y \\ \epsilon_{zx}/K_z & \epsilon_{zy}/K_z & 1/K_z \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_x(1) - V_x(13) \\ V_y(1) - V_y(13) \\ V_z(1) - V_z(13) \end{bmatrix} \quad (3)$$

시험위치 1과 13에서의 검증시험 결과를 그림 2-a에 도시하였다. 가속도계 데이터로서 가속도 입력을 계산하여 그 오차를 구한 것으로 총 5회의 반복시험 결과를 도시하였다. +는 매시험에서의 오차를 나타내는데 그림에서 알 수 있듯이 장착오차를 고려하지 않은 경우는 편향된(biased) 오차를 보여주고 있으므로 모델이 타당하지 않음을 알 수 있다.

다음은 자이로에 대하여 살펴보자. 하나의 자이로는 회전축이 z축이며 x, y축 각속도를 측정하고, 나머지 하나의 자이로는 회전축이 x축이며 y, z축의 각속도를 측정한다고 가정한다. 이 경우 자이로 오차모델은 식 (4)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \bar{K}_x \bar{V}_x \\ \bar{K}_y \bar{V}_y \\ \bar{K}_z \bar{V}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \bar{\epsilon}_{xy} & \bar{\epsilon}_{xz} \\ \bar{\epsilon}_{yx} & 1 & \bar{\epsilon}_{yz} \\ \bar{\epsilon}_{zx} & \bar{\epsilon}_{zy} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} DM_{xx} a_x + DM_{yy} a_y \\ DM_{yx} a_x + DM_{yy} a_y \\ DM_{zy} a_x + DM_{zz} a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{n}_x a_x a_z \\ \bar{n}_y a_y a_z \\ \bar{n}_z a_z a_x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{b}_x \\ \bar{b}_y \\ \bar{b}_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_x \dot{\omega}_x \\ A_y \dot{\omega}_y \\ A_z \dot{\omega}_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_x \omega_x \omega_z \\ C_y \omega_y \omega_z \\ C_z \omega_z \omega_x \end{bmatrix} + d_j \begin{bmatrix} mc_x \omega_x \\ mc_y \omega_y \\ mc_z \omega_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기에서 기호의 정의 및 단위는 다음과 같다.

- $\bar{K}_i$  :  $i$ -축 환산계수 [rad/s ec]
- $\bar{V}_i$  :  $i$ -축 자이로 출력
- $\bar{\epsilon}_{ij}$  : 자이로 비정렬
- $DM_{ij}$  : 질량 불균형 [rad/sec/g]
- $a_i$  :  $i$ -축 입력가속도 [g]
- $\omega_i$  :  $i$ -축 입력각속도 [rad/sec]
- $\bar{n}_i$  :  $i$ -축 비등탄성 (anisotropy) 항 계수 [rad/sec/g<sup>2</sup>]
- $\bar{b}_i$  :  $i$ -축 바이어스 [rad/sec]
- $A_j$  :  $i$ -축 각가속도항 계수 [sec]
- $C_i$  :  $i$ -축 관성불균형 (anisotropy) 항 계수 [1/rad/sec]
- $\dot{\alpha}$  : 모터위상각  $mc_i$  :  $i$ -축 모터커플링

자이로 비정렬, 질량 불균형, 비등탄성 항 계수, 바이어스는 정적오차이다. 질량불균형은 입력 가속도에 영향을 받는 항으로서 자이로의 회전축 외에 나머지 두 축에만 관계 있는 것으로 모델링 한다. 바이어스는 가속도계와 마찬가지로 랜덤성분이 포함된 항으로서 상수로 가정한다. 한편 각가속도 항 계수, 관성불균형 항 계수는 동적오차 부분이다. 각가속도 항은 입력축에 각가속도가 인가되는 경우에 발생하며, 관성 불균형 항 계수는 회전축과 입력축 동시에 각속도가 인가되는 경우에 발생한다. 모터위상각 및 모터커플링에 관계된 항은 자이로 회전축에 각속도를 인가하는 경우에 발생하는 미끄럼(slip) 현상에 기인하는 것으로 입력 각속도가 0.5Hz~2Hz 이상에서 영향을 미친다[2]

자이로 오차계수 추정에는 가속도계에 비하여 추정하여야 할 계수가 많고 가속도 및 각속도를 동시에 인가하여야 하므로 모든 계수를 한번에 추정하는 것은 용이하지 않다. 그러므로 레이트시험과 다위치시험으로 정적계수를 추정하고 동적시험에 의하여 각가속도항 및 관성불균형항 계수를 추정한다. 본 논문에서는 장착오차의 영향을 살펴보는 것이 목적이므로 검증시험에 필요한 환산계수 및 비정렬 부분만을 추정하면 된다. 레이트시험으로 두 가지 종류의 계수를 모두 구할 수 있으므로 이에 대해 설명한다. 레이트시험은 일정한 레이트를 자이로에 가하여 각속도 입력과 관계된 계수인 환산계수 및 자이로 비정렬을 추정한다. 2축 레이트테이블에 적합한 12가지의 독립적인 시험위치를 표 2와 같이 설정한다. 적절한 2위치를 차분을 한 다음 입력 레이트에 해당하는 주기만큼 적분을 수행하면 다른 항들은 소거되고 자이로 비정렬 및 환산계수만으로 표현되는 추정식을 얻을 수 있다.  $x$ 축에 대한 추정식은 식 (5)와 같다.

$$\frac{1}{T} \int_0^T \begin{bmatrix} \bar{V}_x(2) - \bar{V}_x(1) \\ \bar{V}_x(4) - \bar{V}_x(3) \\ \bar{V}_x(5) - \bar{V}_x(6) \\ \bar{V}_x(8) - \bar{V}_x(7) \\ \bar{V}_x(10) - \bar{V}_x(9) \\ \bar{V}_x(12) - \bar{V}_x(11) \end{bmatrix} dt = 2\omega_{bl} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/\bar{K}_x \\ \bar{\epsilon}_{yx}/\bar{K}_x \\ \bar{\epsilon}_{zx}/\bar{K}_x \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서  $\bar{V}_x(n)$ 은  $n$ 번째 실험에서의  $x$ 축 자이로 출력,  $\omega_{bl}$ 은 자이로에 가한 입력 각속도,  $T$ 는 자이로 출력을 얻는 시간을 나타낸다.

주어진 추정식에 최소자승법을 적용하여 환산계수, 비정렬을 추정한다. 추정된 환산계수, 자이로 비정렬 계수를 검증하기 위하여 레이트시험과 같은 방법으로 검증시험을 수행하여 역으로 입력된 각속도를 구하였다. 식 (6)은 시험위치 1과 2의 데이터로부터 입력을 계산하는 예이다.

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/\bar{K}_x & \bar{\epsilon}_{yx}/\bar{K}_x & \bar{\epsilon}_{zx}/\bar{K}_x \\ \bar{\epsilon}_{yx}/\bar{K}_y & 1/\bar{K}_y & \bar{\epsilon}_{yz}/\bar{K}_y \\ \bar{\epsilon}_{zx}/\bar{K}_z & \bar{\epsilon}_{zy}/\bar{K}_z & 1/\bar{K}_z \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{V}_x(2) - \bar{V}_x(1) \\ \bar{V}_y(2) - \bar{V}_y(1) \\ \bar{V}_z(2) - \bar{V}_z(1) \end{bmatrix} \quad (6)$$

각 시험에 대하여 실제 인가한 각속도와 추정된 계수들을 이용하여 계산된 각속도와 차를 구하여 그림 3-a에 도시하였다. 시험위치 1과 2의 데이터로서 각속도 입력을 계산하여 그 오차를 구한 것으로 총 20회의 반복시험 결과를 도시하였다. 입력 각속도의 크기에 대한 영향을 보기 위하여 1~5번 시험은 레이트테이블에 5[deg/sec] 입력을 가한 경우이고 다음 5회씩 마다 2[deg/sec]씩 증가시켰다. 결과를 살펴보면 편향된 오차를 보여주고 있고 또한 입력 각속도 크기가 증가함에 따라 오차가 동시에 증가하므로 각속도와 관련된 항의 모델이 타당하지 않음을 알 수 있다.

### 3. 장착오차를 고려한 새로운 모델링

장착오차를 고려한 새로운 모델링을 위해서는 이를 반영하는 좌표변환행렬을 정의하여 장착오차를 고려하지 않은 모델식에 포함시키는 방법을 사용하자. 즉, 관성측정장치 좌표계  $m$ 과 레이트테이블 고정 좌표계  $l$  사이에 오차가 존재한다고 가정하여  $l$ 좌표계에서  $m$ 좌표계로의 좌표변환행렬을 다음과 같이 정의한다.

$$C_l^m \Delta = \begin{bmatrix} e_{xx} & e_{xy} & e_{xz} \\ e_{yx} & e_{yy} & e_{yz} \\ e_{zx} & e_{zy} & e_{zz} \end{bmatrix}$$

그러면  $l$ 좌표계 각축으로의 각속도 입력  $\omega_l$ 와 가속도 입력  $a_l$ 는 다음과 같다.

$$\omega_l = C_l^m \omega_m + \omega_{bl}, \quad a_l = C_l^m a_m \quad (7)$$

여기에서  $\omega_m = [\Omega_N \ 0 \ \Omega_D]^T$ 는 지구자전에 의한 각속도로  $\Omega_N$ 은  $N$ 축(North axis) 방향,  $\Omega_D$ 는  $D$ 축(Down axis) 방향의 값을 의미하며,  $a_m = [0 \ 0 \ 0]^T$ 는 중력에 의한 가속도,  $\omega_{bl}$ 은 레이트테이블 명령각속도이다. 그리고 최종적으로 관성측정장치에 전달되는 가속도 입력  $a_m = [a_x \ a_y \ a_z]^T$ 은 다음과 같다.

$$a_m = C_l^m a_l \quad (8)$$

또한 각속도 입력  $\omega_m = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$  은 다음과 같다.

$$\underline{\omega}_m = C_i^m \underline{\omega}_i \quad (9)$$

이제 장착오차를 고려한 새로운 모델은 식 (8), (9)와 같이 표현된 관성측정장치 축으로 전달되는 최종적인 각속도, 각속도 입력을 기존의 모델식에 대입함으로써 쉽게 구할 수 있다. 먼저 각속도계의 모델식은 식 (8)을 식 (1)에 대입하면 식 (10)으로 표현된다

$$\begin{bmatrix} K_x \bar{V}_x \\ K_y \bar{V}_y \\ K_z \bar{V}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{d}_{xx} & \bar{d}_{xy} & \bar{d}_{xz} \\ \bar{d}_{yx} & \bar{d}_{yy} & \bar{d}_{yz} \\ \bar{d}_{zx} & \bar{d}_{zy} & \bar{d}_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{ix} \\ a_{iy} \\ a_{iz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2n_x e_{xx} e_{xy} & 2n_x e_{xy} e_{yz} & 2n_x e_{xz} e_{zx} \\ 2n_y e_{yx} e_{yy} & 2n_y e_{yy} e_{yz} & 2n_y e_{yz} e_{zx} \\ 2n_z e_{zx} e_{xz} & 2n_z e_{xz} e_{zx} & 2n_z e_{zx} e_{zx} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{ix} a_{iy} \\ a_{iy} a_{iz} \\ a_{iz} a_{ix} \end{bmatrix} + (\text{차분에 의해 소거되는 항}) \quad (10)$$

여기에서  $\{a_{ij}\}$  의 정의는 다음과 같다.

$$\{a_{ij}\} \triangleq \{\varepsilon_{ij}\} C_i^m$$

차분에 의해 소거되는 항은 각속도 계급항과 바이어스 항이다. 새로운 각속도계 모델에서는 식 (2)의 차분에 의해서도 소거되지 않는  $a_{ix} a_{iy}$  와 관계된 항이 새로이 추가되었다.

다음은 자이로 모델로서 식 (9)를 식 (4)에 대입하여 식 (11)로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \bar{K}_x \bar{V}_x \\ \bar{K}_y \bar{V}_y \\ \bar{K}_z \bar{V}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{d}_{xx} & \bar{d}_{xy} & \bar{d}_{xz} \\ \bar{d}_{yx} & \bar{d}_{yy} & \bar{d}_{yz} \\ \bar{d}_{zx} & \bar{d}_{zy} & \bar{d}_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{ix} \\ \omega_{iy} \\ \omega_{iz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_x e_{xx} e_{xz} & C_x e_{xy} e_{yz} & C_x e_{xz} e_{zx} \\ C_y e_{yx} e_{yz} & C_y e_{yy} e_{yz} & C_y e_{yz} e_{zx} \\ C_z e_{zx} e_{xz} & C_z e_{zy} e_{yz} & C_z e_{zx} e_{zx} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{ix}^2 \\ \omega_{iy}^2 \\ \omega_{iz}^2 \end{bmatrix} + (\text{레이트시험에서 차분 및 적분에 의해 소거되는 항}) \quad (11)$$

여기에서  $\{\bar{d}_{ij}\}$  의 정의는 다음과 같다.

$$\{\bar{d}_{ij}\} \triangleq \{\bar{\varepsilon}_{ij}\} C_i^m$$

레이트시험에서 소거되는 항은 차분이 가해지는 시험 위치에서 상수가 제거되고 또한 적분 구간이 테이블 회전 각속도의 한 주기를 설정함으로써 제거되는 항들로만 구성된다. 새로운 자이로 모델에서도 각속도계와 유사하게 식 (5)의 차분에 의해서도 소거되지 않는  $\omega_{ij}^2$  항이 새로이 추가되었다.

#### 4. 새로운 모델에 의한 추정 및 검증

본 장에서는 장착오차를 고려한 모델로서 계수를 추정하고 검증시험을 통하여 그 타당성을 검토한다. 방법은 각속도계, 자이로 모두 2 장에서와 같은데 다만 장착오차로 인하여 추정식이 달라지게 된다.

각속도계의 경우 식 (2)와 유사하게 추정식을 구하면 식 (12)와 같다.

$$\begin{bmatrix} V_x(1) - V_x(13) \\ \vdots \\ V_x(8) - V_x(16) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \sqrt{2}g & \sqrt{2}g & 0 & g^2 & 0 \\ & & & \vdots & & \\ -g & g & \sqrt{2}g & 0 & g^2/\sqrt{2} & -g^2/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_{xx}/K_x \\ d_{yy}/K_y \\ d_{zz}/K_z \\ 2n_x e_{xx} e_{xy} \\ 2n_x e_{xy} e_{yz} \\ 2n_x e_{xz} e_{zx} \end{bmatrix} + v \quad (12)$$

식 (2)와 비교하면 장착오차를 포함하는  $d_{ij}/K_x$  가  $\varepsilon_{ij}/K_x$  대신 사용되었고 각속도 곱항  $a_i a_j$  와 관계된 항  $2n_x e_{xx} e_{xy}$  가 추가되었다.

추정된 계수로서 검증시험을 수행하여 2 장에서의 식 (3)과 같이 각속도 입력을 계산하는데 차분에 의해 없어지는 항은 여기에서도 필요치 않으나 각속도 곱항은 알고있는 입력값을 대입하였다. 그 결과를 그림 2-b에 도시하였다. 장착오차를 고려하지 않은 그림 2-a와 비교하면 편향된 오차가 없으므로 새로운 각속도계 모델 설정과 이에 의한 계수 추정이 타당함을 알 수 있다.

다음은 자이로 모델로서 식 (5)와 유사한 방법으로 추정식을 구하는데 각속도 입력을 계산할 때는 식 (7)과 같이 레이트테이블에 의한 입력과 지구자전 각속도에 의한 입력이 분리되어야 한다. 즉, 레이트테이블 입력은  $C_i^l$  변환행렬과는 관계가 없음에 주의해야 한다. 시험위치 1에서의 입력의 예는 다음과 같다

$$\omega_{ix} = -\Omega_N \sin(\omega_{bt}t), \quad \omega_{iy} = -\Omega_N \cos(\omega_{bt}t), \quad \omega_{iz} = -\omega_{bt} + \Omega_D \\ a_{ix} = 0, \quad a_{iy} = 0, \quad a_{iz} = -g$$

이와 같은 방법으로 입력을 계산하여 추정식을 구하면 식 (13)과 같다.

$$\frac{1}{T} \int_0^T \begin{bmatrix} \bar{V}_x(2) - \bar{V}_x(1) \\ \bar{V}_x(4) - \bar{V}_x(3) \\ \bar{V}_x(5) - \bar{V}_x(6) \\ \bar{V}_x(8) - \bar{V}_x(7) \\ \bar{V}_x(10) - \bar{V}_x(9) \\ \bar{V}_x(12) - \bar{V}_x(11) \end{bmatrix} dt = 2\omega_{bt} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{d}_{xx}/\bar{K}_x \\ \bar{d}_{yy}/\bar{K}_y \\ (\bar{d}_{zz} + 2C_x e_{xx} e_{zz} \Omega_D)/\bar{K}_z \\ (\bar{d}_{zz} - 2C_x e_{xx} e_{zz} \Omega_D)/\bar{K}_z \end{bmatrix} \quad (13)$$

식 (5)와 비교하면 장착오차를 포함하는  $\bar{d}_{ij}/\bar{K}_x$  가  $\bar{\varepsilon}_{ij}/\bar{K}_x$  대신 사용되었고 각속도 계급항과 관계된 항  $2C_x e_{xx} e_{zz} \Omega_D$  가  $\bar{d}_{zz}/\bar{K}_z$  에 더해지거나 빼주는 항으로서 추가되었다.

추정된 계수로서 검증시험을 수행하여 2 장에서의 식 (6)과 같이 각속도 입력을 계산하는데 각속도 계급은 알고있는 입력값을 대입하였다. 그 결과는 그림 3-b에 도시하였다. 장착오차를 고려하지 않은 결과인 그림 3-a와 비교하면 편향된 오차가 없고 또한 입력 각속도 크기가 증가함에 따라 오차가 동시에 증가하는 경향이 현저히 감소했음을 알 수 있다. 이로부터 자이로의 경우도 장착오차를 모델에 포함시키고 추정하는 방법이 타당함을 확인할 수 있다.

본 장에서는 계수 추정 및 검증시험을 통하여 장착오차는 무시할 수 없는 계수 추정오차를 유발하므로 이를 포함시킨 오차모델이 필요함을 확인하였다. 앞으로 더욱 연구되어야 할 부분은 장착오차를 반영하는 행렬의 각 요소를 추정된

계수로부터 분리하는 문제와 레이트시험에서는 소거되었던 항들을 포함하여 다른 오차계수를 추정하는 문제이다.

5. 결 론

본 논문에서는 가속도계 및 동조자이로로 구성된 관성측정장치의 오차계수를 실험실 수준의 시험으로 추정하는 경우에 장착오차로 인해 발생하는 추정오차를 해결하기 위하여 새로운 오차모형을 구성하고 그 타당성을 검증하였다.

실험실 시험에서 관성측정장치를 테이블 위에 장착할 때 레이트테이블의 축과 정확히 일치하지 않는다면 시험에서 가하는 입력에 오차가 발생하게 되어 결과적으로 추정오차를 유발하게 된다. 이를 살펴보기 위하여 장착오차를 고려하지 않은 모델로서 계수 추정 및 검증시험을 수행한 결과를 제시하였는데 가속도계의 경우에는 일정한 편향된 오차가 나타남을 알 수 있었고 자이로의 경우에는 편향 오차 뿐만 아니라 입력각속도 크기가 증가함에 따라 오차가 동시에 증가함을 알 수 있었다.

이를 해결하기 위하여 장착오차를 모델에 추가하여 새로운 오차식을 구하고 이를 사용하여 오차계수를 추정하였다. 장착오차를 고려한 새로운 모델링을 위해서는 관성측정장치 좌표계와 레이트테이블 고정 좌표계 사이에 오차가 존재한다고 가정하여 그 사이의 좌표변환행렬을 정의하고 장착오차를 고려하지 않은 모델식에 포함시켰다.

새로운 모델식으로 계수 추정 한 결과에 대한 검증시험으로 제시된 오차모델의 타당성을 검증하였다. 검증시험은 계수를 추정하는 시험과 같은 방법으로 시험하여 역으로 추정된 계수를 사용하여 입력을 계산하고 이를 실제로 가한 입력과의 차이를 비교하는 방법을 사용하였다. 결과를 살펴보면 가속도계 및 자이로의 모두 편향되어 나타나는 오차가 제거되고 또한, 자이로의 경우 입력 각속도 크기가 증가함에 따라 오차가 동시에 증가하는 경향이 현저히 감소했음을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 실험실 수준의 시험으로 관성측정장치의 오차계수를 추정하는 경우에 장착오차는 추정오차를 유발함을 확인할 수 있으며 이를 해결하기 위한 하나의 방법으로서 장착오차를 고려한 새로운 모델을 구성하는 방법은

표 1 가속도계 시험위치

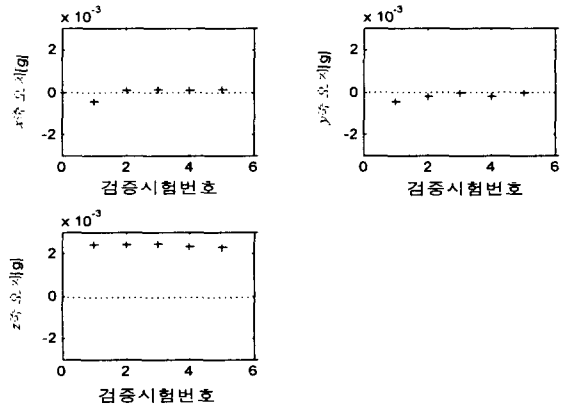
Table 1 Position for accelerometer test

시험 위치 번호	t좌표계 입력가속도	레이트테이블 회전축 및 회전 방향	
	$a_x, a_y, a_z$	tilt 축	table 축
1	$0, g/\sqrt{2}, g/\sqrt{2}$	$45^\circ$	$0^\circ$
2	$g/2, g/2, g/\sqrt{2}$	$45^\circ$	$45^\circ$
3	$g/\sqrt{2}, 0, g/\sqrt{2}$	$45^\circ$	$90^\circ$
4	$g/2, -g/2, g/\sqrt{2}$	$45^\circ$	$135^\circ$
5	$0, -g/\sqrt{2}, g/\sqrt{2}$	$45^\circ$	$180^\circ$
6	$-g/2, -g/2, g/\sqrt{2}$	$45^\circ$	$225^\circ$
7	$-g/\sqrt{2}, 0, g/\sqrt{2}$	$45^\circ$	$270^\circ$
8	$-g/2, g/2, g/\sqrt{2}$	$45^\circ$	$315^\circ$

표 2 레이트시험 시험위치

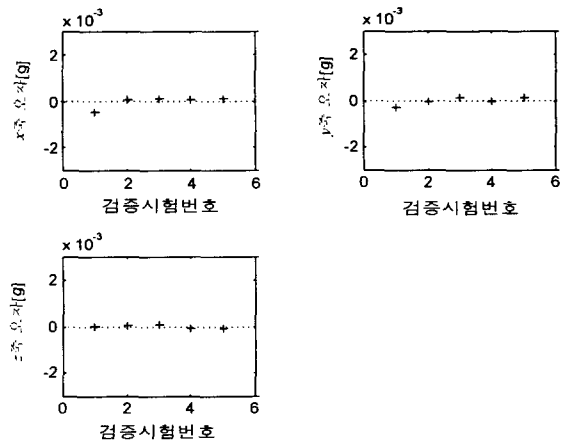
Table 2 Position for rate test

시험 위치 번호	t좌표계 각속 초기 방향	레이트테이블 회전축 및 회전 방향
	$t_x, t_y, t_z$	
1	$t_{0y}, t_{0x}, -t_{0z}$	$t_{0z}$
2	$t_{0y}, t_{0x}, -t_{0z}$	$-t_{0z}$
3	$-t_{0y}, t_{0x}, t_{0z}$	$-t_{0x}$
4	$-t_{0y}, t_{0x}, t_{0z}$	$t_{0x}$
5	$t_{0y}, -t_{0x}, t_{0z}$	$t_{0z}$
6	$t_{0y}, -t_{0x}, t_{0z}$	$-t_{0z}$
7	$t_{0x}, t_{0z}, -t_{0y}$	$-t_{0x}$
8	$t_{0x}, t_{0z}, -t_{0y}$	$t_{0x}$
9	$t_{0y}, -t_{0x}, t_{0z}$	$t_{0x}$
10	$t_{0y}, -t_{0x}, t_{0z}$	$-t_{0x}$
11	$-t_{0x}, -t_{0y}, t_{0z}$	$t_{0x}$
12	$-t_{0x}, -t_{0y}, t_{0z}$	$-t_{0x}$



a 장착오차 고려 않은 경우

a The case not considering setting misalignment

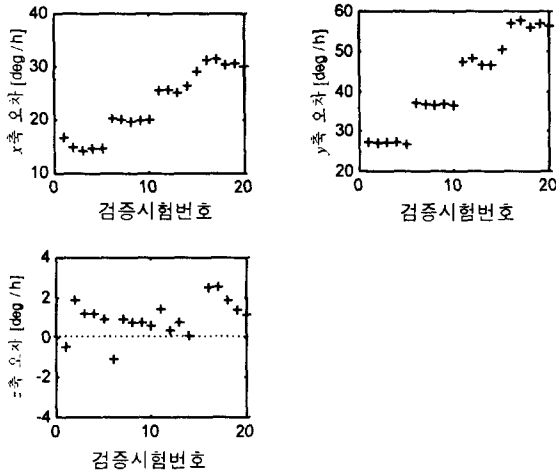


b 장착오차 고려한 경우

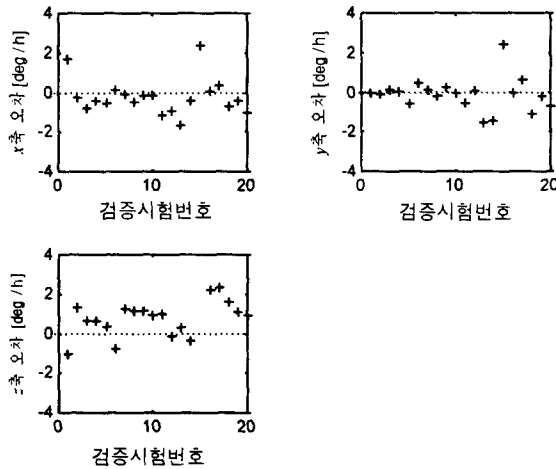
b The case considering setting misalignment

그림 2 가속도계 검증시험 결과

Fig. 2 Result of validation test for accelerometer



a 장착오차 고려 않은 경우  
a The case not considering setting misalignment



b 장착오차 고려한 경우  
b The case considering setting misalignment

그림 3 자이로 검증시험 결과  
Fig. 3 Result of validation test for gyro

타당하다고 판단된다. 앞으로 더욱 연구되어야 할 부분은 장착오차 행렬의 요소 및 나머지 오차계수를 각각 추정, 분리하는 문제이다.

**감사의 글**

본 연구는 국방과학연구소 및 서울대 자동제어특화연구센터의 연구비 지원에 의한 연구 결과입니다.

**참 고 문 헌**

[1] R. J. G. Craig, "Theory of Errors of a Multigimbal, Elastically Supported, Tuned Gyroscope," IEEE Trans. On Aerospace and Electronic Systems, Vol.

AES-8, No. 3, May, 1972.  
[2] R. J. G. Craig, "Dynamically Tuned Gyros in Strapdown Systems," Proceeding of North Atlantic Treaty Organization Advisory Group for Aerospace research and Development Conference, Florence Italy, 2-5, Oct., 1972.  
[3] U. Krogmann, "Identification Procedures for Strapdown Sensor Parameters by Laboratory Testing," DGON-Symposium Gyro Technology, Bochum, Germany, 1978.  
[4] D. K. Joos, "Determination and Evaluation of Strapdown-Sensor-Parameters from System-Test-Data," Conference-Symposium Gyro Technology, Bochum, Germany, 1978.  
[5] 이장규, 박찬국, 강태삼, 김일선, "스트랩다운 관성측정장치 오차계수 추정 및 평가," 국방과학연구소 연구보고서 MSRD-417-90235, 1990.

**저 자 소 개**



**성 상 만(成 相 萬)**  
1970년 8월 16일 생. 1993년 서울대 제어계측공학과 졸업. 1995년 동 대학원 석사졸업. 1995년~현재 서울대 전기공학부 대학원 박사과정

Tel : (02) 872-8190  
E-mail : ssm@asrign3.snu.ac.kr



**이 달 호(李 達 鎬)**  
1959년 7월 20일 생. 1982년 서울대 제어계측학과 졸업. 1992년 동 대학원 졸업(공학). 1992년~현재 경원대학교 조교수. 1997년~1998년 USC 교환교수.

Tel : (0342) 750-5320  
E-mail : dhlee@mail.kyungwon.ac.kr



**이 장 규(李 章 揆)**  
1946년 3월 28일 생. 1971년 서울대 전기공학과 졸업. 1977년 피츠버그대학교 대학원 졸업(공학). 1982년~현재 서울대학교 전기공학부 교수

Tel : (02) 880-7308  
E-mail : jgl@asri.snu.ac.kr