

# NHC/ZUPT의 장착 비정렬 추정 칼만필터 설계 및 성능분석

## Design and Performance Analysis of NHC/ZUPT Kalman Filter with Mounting Misalignment Estimation

박 영 범\*                      김 갑 진\*                      박 준 표\*  
 Young-Bum Park              Kap-Jin Kim                  Jun-Pyo Park

### Abstract

NHC means that the velocity of the vehicle in the plane perpendicular to the forward direction is almost zero. The main error source of NHC is the mounting misalignment which is the difference between the body frame of a land vehicle and the sensor frame of an inertial measurement unit. This paper suggests new NHC algorithm that can reduce position errors by real-time estimation of mounting misalignment. Then NHC/ZUPT integrated land navigation system is designed and its performances are analyzed by simulations with van test data. Simulation results show that the proposed NHC/ZUPT land navigation system improves navigation accuracy regardless of misalignment angle and is very useful when SDINS operates stand-alone for land vehicle navigation with large mounting misalignment.

Keywords : Non Holonomic Constraints(운동제한조건), Mounting misalignment(장착 비정렬), Zero Velocity Update(영속도보정), Land Navigation System(지상항법시스템)

### 1. 서론

스트랩다운 관성항법장치(SDINS : Strap-Down Inertial Navigation System)는 관성센서인 자이로와 가속도계의 정보를 이용하여 동체의 위치, 속도 및 자세를 제공하는 장치이다. SDINS는 동적특성이 우수하고 짧은 시간동안의 정확도가 높으며, 주위 환경에 관계없이 연

속적인 항법이 가능하여 다양한 무기체계의 기본 항법시스템으로 이용되고 있다. 그러나 적분연산에 의한 항법계산과정에서 관성센서 오차와 중력오차가 누적되어 동작시간에 따라 수평축 위치오차는 슬러 주기를 가지고 증가하며, 고도오차는 기하급수적으로 증가하는 특성을 가지고 있다. 이러한 SDINS의 단점을 보완하기 위해 GPS(Global Positioning System)와 속도계(Odometer) 등과 같은 보조센서를 SDINS와 결합한 보정항법 시스템을 구성하는 것이 일반적이다.

SDINS를 이용하여 지상항법시스템을 구성하는 경우에는 지상에서 이동하는 차량의 운동특성을 이용하면

† 2009년 5월 22일 접수~2009년 8월 31일 게재승인

\* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 박영범(ybpark@add.re.kr)

별도의 외부센서 도움 없이 SDINS의 성능을 개선할 수 있다. 대표적인 방법이 영속도 보정(ZUPT : Zero velocity UPdaTe)이다<sup>[1]</sup>. ZUPT는 차량이 정지했을 때 SDINS의 속도정보를 이용하여 항법오차를 보상하는 방법으로 비교적 쉽게 구현할 수 있으며, SDINS의 정지상태와 관련된 특정한 오차가 보상되므로 그 용도가 다양하다 할 수 있다. 그러나 일정수준의 항법정확도를 확보하기 위해서는 주기적으로 차량을 정지해야 하는 운용상의 제약이 따른다.

지상항법 시스템에서 외부센서의 도움 없이 SDINS의 항법성능을 개선하는 또 다른 방법의 하나는 차량의 운동조건을 이용하는 운동제한 조건(NHC : Non-Holonomic Constraints) 기반 오차추정 방법이다<sup>[1~4]</sup>. NHC는 지상에서만 운동하는 차량의 운동특성으로부터 차량이 지상의 굴곡면에 의하여 점프운동을 하거나 도로의 사정으로 미끄러지는 경우를 제외하고는 차량의 진행방향에 수직인 평면의 속도는 영(zero)에 가깝다는 제한조건을 이용하여 진행축을 제외한 다른 축에서 발생하는 SDINS의 속도를 오차로 설정하고 보정하는 방법이다. NHC를 이용한 보정항법의 대표적인 오차요소는 차량의 진행방향과 SDINS의 동체좌표축이 일치하지 않는 장착 비정렬(mounting misalignment)에 의한 오차와 차량의 운행 중 발생하는 미끄러짐이나 점프 등에 의해 NHC 축 방향으로 나타나는 속도 등이 있다. 이러한 오차는 NHC 칼만필터 측정치의 불확실성을 증가시키게 되는데, 특히 큰 속도로 주행하는 경우 적지 않은 측정모델 오차를 유발 시킬 수 있으며 이로 인해 칼만필터의 안정성과 추정성능이 저하될 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 측정치 잉여값(residue)을 이용하여 측정잡음 분산값을 실시간으로 추정하는 적응필터(adaptive filter)를 적용하기도 한다<sup>[4]</sup>.

차량과 SDINS 사이의 장착 비정렬은 항법장치를 차량의 좌표축과 정확히 일치시켜 장착할 수 없기 때문에 항상 존재하게 되는데, 이러한 장착 비정렬에 의해 SDINS의 진행축에 수직인 두 축에는 장착 비정렬 각의 크기와 차량의 주행속도에 비례하여 실제 속도가 나타나게 되며 NHC는 장착 비정렬에 의해 나타나는 실제 속도를 영(zero)으로 강제함으로써 그 크기만큼의 속도오차가 생기고 결과적으로 위치오차를 유발하게 된다. 따라서 장착 비정렬 각을 적절히 보상할 수 있다면 NHC를 이용한 보정항법의 위치정확도를 크게 향상시킬 수 있다.

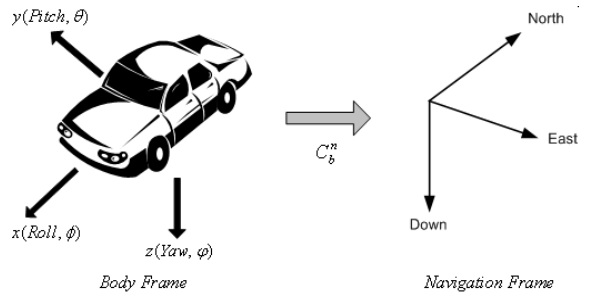


Fig. 1. 시스템 좌표축 정의

본 논문에서는 SDINS의 장착 비정렬을 NHC 칼만필터의 상태변수에 추가하여 실시간으로 추정하는 기법을 제시한다. 또한 별도의 외부센서 없이 SDINS 단독으로 항법정확도를 향상시킬 수 있는 NHC와 ZUPT가 결합된 지상항법 칼만필터를 구성하고 차량 주행시험을 통하여 획득된 raw data를 이용한 시뮬레이션을 통해 항법성능을 분석한다.

## 2. 장착 비정렬을 고려한 NHC 칼만필터 구성

### 가. NHC 칼만필터 측정방정식

Fig. 1은 시스템의 좌표축을 나타낸 것으로 동체좌표계(body frame)는 SDINS의 x, y, z축을, 항법좌표계(navigation frame)는 항법계산의 기준이 되는 북, 동, 수직(north, east, down)축을 의미한다.

NHC는 차량의 진행방향인 x축에 수직인 평면의 속도는 영(zero)이라는 다음의 운동제한조건을 이용한다<sup>[2]</sup>.

$$v_y^b \approx v_y^n \approx 0, \quad v_z^b \approx v_z^n \approx 0 \quad (1)$$

여기서, 윗첨자  $b, v$ 는 각각 SDINS의 동체좌표와 차량의 동체좌표를 의미하며 장착 비정렬이 없을 경우 두 좌표는 일치한다. 그리고  $v_y^b, v_z^b$ 는 SDINS의 y축 및 z축의 속도이고  $v_y^n, v_z^n$ 는 차량의 y축 및 z축의 속도이다.

SDINS의 동체좌표계 속도( $v^b = [v_x \ v_y \ v_z]^T$ )는 항법좌표계 속도( $v^n = [v_N \ v_E \ v_D]^T$ )와 좌표변환행렬( $C_b^n$ )의 곱으로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다<sup>[3,4]</sup>.

$$\hat{v}^b = \hat{C}_b^n \hat{v}^n = [\hat{C}_b^n]^T \hat{v}^n \quad (2)$$

여기서, 기호  $\hat{\cdot}$ 는 SDINS에서 계산된 값을 의미하며 식 (2)에서 y축과 z축 성분의 속도는 식 (1)의 NHC 조건에 의해 SDINS에서 유발된 속도오차이다. 식 (2)로부터 동체좌표계에서의 속도오차는 식 (3)과 같으며, 식 (1)과 (3)으로부터 NHC의 측정방정식은 식 (4)와 같다.

$$\delta v^b \approx C_n^b \delta v^n - C_n^b (v^n \times) \epsilon^n \quad (3)$$

$$z_1 = \begin{bmatrix} \delta v_y^b \\ \delta v_z^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{12} & c_{22} & c_{32} \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta v_N \\ \delta v_E \\ \delta v_D \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -c_{22}v_D + c_{32}v_E & c_{12}v_D - c_{32}v_N & -c_{12}v_E + c_{22}v_N \\ -c_{23}v_D + c_{33}v_E & c_{13}v_D - c_{33}v_N & -c_{13}v_E + c_{23}v_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_N \\ \epsilon_E \\ \epsilon_D \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \nu_y \\ \nu_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서,  $(a \times)$ 는 벡터  $a$ 의 왜대칭행렬을 나타내며  $c_{ij}$ 는  $C_n^b$ 의 원소이다.  $\delta v^n = [\delta v_N \ \delta v_E \ \delta v_D]^T$ 은 항법 좌표계에서의 SDINS 속도오차,  $\epsilon^n = [\epsilon_N \ \epsilon_E \ \epsilon_D]^T$ 은 SDINS의 자세오차이며,  $\nu_y, \nu_z$ 는 측정오차로  $\sigma_y^2, \sigma_z^2$ 의 분산을 가지는 영 평균 백색잡음으로 가정한다.

나. 장착 비정렬에 의한 SDINS 동체좌표계 속도

장착 비정렬( $\zeta_x, \zeta_y, \zeta_z$ )은 Fig. 2와 같이 SDINS의 동체좌표와 차량의 동체좌표 사이의 각으로 정의되며, 비정렬각을 미소각(small angle)으로 정의하면 두 좌표 사이의 변환행렬( $C_v^b$ )은 식 (5)와 같으며, SDINS의 동체 속도와 차량의 속도는 식 (6)의 관계를 갖는다.

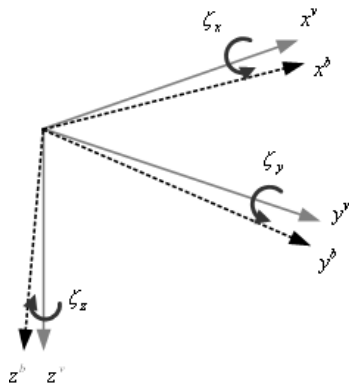


Fig. 2. 장착 비정렬 정의

$$C_v^b \approx \begin{bmatrix} 1 & \zeta_z & -\zeta_y \\ -\zeta_z & 1 & \zeta_x \\ \zeta_y & -\zeta_x & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$v^b = C_v^b v^v \quad (6)$$

차량 동체좌표의 y축 및 z축의 속도는 식 (1)의 운동제한조건에 의해 영(zero)이므로 SDINS의 동체속도는 식 (5)와 (6)으로부터 다음과 같이 된다.

$$\begin{cases} v_x^b = v_x^v \\ v_y^b = -\zeta_z v_x^v \\ v_z^b = \zeta_y v_x^v \end{cases} \quad (7)$$

식 (7)은 장착 비정렬에 의해 SDINS의 y축과 z축으로 차량의 진행속도와 장착오차의 크기에 비례하는 속도가 나타남을 보여주는 것으로 식 (4)와 같이 장착 비정렬이 없는 것으로 가정하여 NHC 칼만필터를 구현할 경우 실제 y축과 z축에 나타나는 속도를 영으로 강제함으로써 오히려 y축과 z축으로 속도오차와 위치오차가 유발됨을 알 수 있다.

다. 장착 비정렬을 고려한 NHC 측정방정식

장착 비정렬을 고려한 NHC 칼만필터의 측정값은 식 (2)의 SDINS에서 계산된 동체좌표계의 속도와 식 (7)의 장착 비정렬에 의해 실제 SDINS에 나타나는 속도의 차이로 다음과 같이 표현된다.

$$z_2 = \begin{bmatrix} \hat{v}_y^b - v_y^b \\ \hat{v}_z^b - v_z^b \end{bmatrix} \quad (8)$$

식 (8)의 측정값에 대한 측정행렬은 장착 비정렬 오차( $\delta\zeta_y, \delta\zeta_z$ )를 칼만필터의 상태변수에 포함시키고 식 (2)와 (7)로부터 유도하면 다음과 같다.

$$z_2 = \begin{bmatrix} \delta v_y^b \\ \delta v_z^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{12} & c_{22} & c_{32} \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta v_N \\ \delta v_E \\ \delta v_D \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -c_{22}v_D + c_{32}v_E & c_{12}v_D - c_{32}v_N & -c_{12}v_E + c_{22}v_N \\ -c_{23}v_D + c_{33}v_E & c_{13}v_D - c_{33}v_N & -c_{13}v_E + c_{23}v_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_N \\ \epsilon_E \\ \epsilon_D \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -v_x^b & 0 \\ 0 & v_x^b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\zeta_z \\ \delta\zeta_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \nu_y \\ \nu_z \end{bmatrix} \quad (9)$$

### 3. NHC/ZUPT 지상항법시스템 구성

Fig. 3은 실시간으로 장착 비정렬을 추정하는 NHC와 ZUPT가 결합된 지상항법시스템의 구성도를 나타내는 것으로 차량이 정지상태인 경우에는 ZUPT를 수행하고 차량이 주행중인 경우 NHC 보정을 수행하도록 구성하였다. 오차보정을 위한 칼만필터는 항법오차를 상태변수로 정의하는 간접(indirect)방식으로 설계하고 지상항법장치의 장시간 운용환경을 고려하여 추정된 항법오차를 시스템으로 되먹임(feedback)하는 방법으로 구현되었으며 필터 구성에 필요한 시스템 오차모델과 측정 오차모델은 다음과 같다.

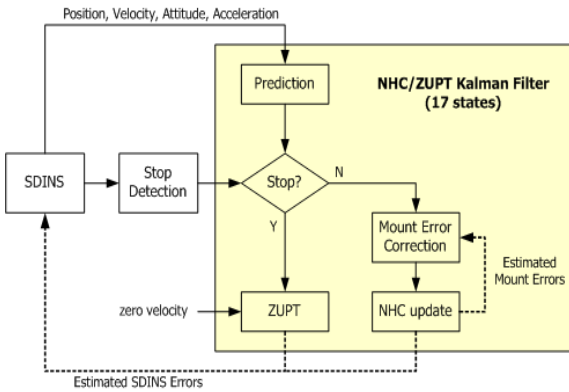


Fig. 3. NHC/ZUPT 지상항법 구성도

#### 가. 시스템 오차모델

시스템 오차모델은 SDINS 오차, 자이로 및 가속도 오차, 차량에 대한 SDINS의 장착오차를 포함한 17차로 구성하였다. SDINS 오차모델은 자세오차의 정의에 따라 여러 가지 모델이 구해질 수 있는데, 본 논문에서는 항법좌표계에서의 비틀림각(tilt angle)으로 정의되는 자세오차에 대해 위도오차, 경도오차, 고도오차 및 항법좌표계에서의 속도오차를 포함하여 9차로 모델링하였다<sup>5)</sup>. 자이로 및 가속도계 오차는 주 오차요소인 바이어스오차만 포함하여 1차 마코프 프로세스로 모델링 하였고, 차량에 대한 SDINS의 장착 비정렬은 고정된 값이므로 랜덤상수로 모델링하였다.

#### 나. ZUPT 측정 오차모델

차량이 정지한 경우 SDINS의 항법 속도출력은 오차를 의미하므로 ZUPT 측정 오차모델은 다음과 같다.

$$z_{ZUPT} = \begin{bmatrix} \hat{v}_N \\ \hat{v}_E \\ \hat{v}_D \end{bmatrix} + \nu_{ZUPT} = \begin{bmatrix} \delta v_N \\ \delta v_E \\ \delta v_D \end{bmatrix} + \nu_{ZUPT} \quad (10)$$

여기서,  $\nu_{ZUPT}$ 는 측정오차로  $\sigma_{ZUPT}^2$ 의 분산을 가지는 영 평균 백색잡음으로 가정한다.

#### 다. NHC 측정 오차모델

장착 비정렬을 고려한 NHC 측정 오차모델은 앞에서 유도된 식 (9)와 같으며, 장착 비정렬이 고려되지 않은 경우는 식 (4)와 같다.

#### 라. 정지판단

ZUPT는 차량이 정지된 상태에서 SDINS의 출력속도를 모두 오차로 가정하고 보정을 하는 것이므로 차량의 정지상태를 정확히 판단한 후 ZUPT를 수행하여야 한다. 정지상태의 판단은 차량의 움직임을 감지하는 센서인 SDINS의 자이로와 가속도계의 정보를 이용하여 이루어지는데 수평축 속도와 자이로 출력을 이용하는 방법<sup>6)</sup>, 가속도 정보와 자이로의 zero-crossing 비율을 이용하는 방법<sup>7)</sup>등 다양한 방법이 있다.

본 연구에서는 자이로의 평균과 가속도계의 분산을 이용하여 정지상태를 판단한다. 정지판단은 정지상태에서 자이로와 가속도계의 측정값은 각각 지구자전각 속도와 중력가속도이며 주행상태에 비해 정지상태에서 출력값의 변화가 작다는 사실을 이용한다. Fig. 4는 정지판단 흐름도를 나타낸 것으로 먼저 정지상태에서 차량의 진동에 의한 영향을 감소시키기 위해 저역통과필터와 이동평균 등 신호처리를 수행하고 식 (11), (12)와 같이 각속도 평균값과 가속도 분산값을 비교하여 정지상태를 판단한다. 또한, 정지상태에서 승하차, 바람 또는 주위 주행차량에 의한 흔들림 등 외란에 의해 센서 출력이 임계치를 벗어나는 경우가 있으므로 카운터를 이용하여 외란에 의한 순간적인 변화와 주행에 의한 연속적인 변화를 구별하여 안정적으로 ZUPT가 수행되도록 하였다.

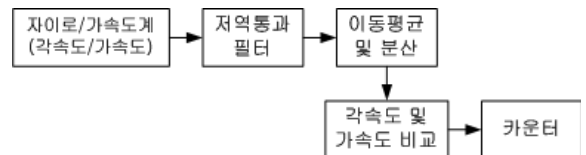


Fig. 4. 정지판단 흐름도

$$\left| \sqrt{\overline{\omega_x^2} + \overline{\omega_y^2} + \overline{\omega_z^2}} - \Omega_{ER} \right| < THR_{Rate} \quad (11)$$

$$Var\left(\sqrt{\overline{a_x^2} + \overline{a_y^2} + \overline{a_z^2}}\right) < THR_{Acc} \quad (12)$$

여기서,  $\overline{x}$ 는 저역통과 및 이동평균된 값이고  $\Omega_{ER}$ 는 지구자전 각속도,  $THR_{Rate}$ ,  $THR_{Acc}$ 는 각각 각속도 평균과 가속도분산에 대한 정지판단 임계치이다.

#### 4. 차량시험 및 성능분석

제시된 알고리즘의 성능을 분석하기 위하여 차량시험을 수행하고 후처리 시뮬레이션에 필요한 센서데이터를 획득하였다. 차량시험은 0.1deg/hr급 자이로와 100  $\mu$ g급 가속도계가 장착된 관성항법장치와 1mil급 정밀 관성항법장치를 차량에 탑재하고 주행하면서 200Hz마다 관성항법장치의 자이로 및 가속도계 정보를 획득하였고 5Hz마다 정밀관성항법장치의 항법데이터를 획득하여 항법오차 분석의 기준정보로 사용하였다. Fig. 5는 차량시험의 주행궤적을 나타낸 것으로 약 2300초 동안 약 29km를 주행하였으며, 주행 간에 4회 ZUPT가 수행되도록 하였고 초기정렬을 위해 주행 전에 약 900초간 정지상태를 유지하였다.

시뮬레이션은 ZUPT 단독항법, 장착 비정렬을 고려하지 않은 NHC/ZUPT, 장착 비정렬을 고려한 NHC/ZUPT의 3가지로 나누어 수행하고 각각의 위치오차를

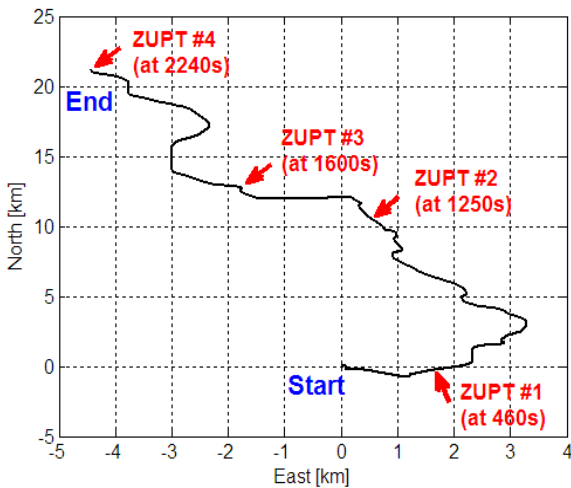


Fig. 5. 차량시험 주행궤적

비교하였다. 그리고 장착 비정렬 각의 크기에 따른 항법정확도를 비교하기 위해 임의로 수평축 장착 비정렬 각을 추가하여 시뮬레이션을 수행하고 결과를 분석하였다.

#### 가. NHC/ZUPT 성능분석

Fig. 6, 7과 Table 1은 NHC/ZUPT 구성에 따른 수평 위치오차와 고도오차를 비교한 것이다. 결과를 살펴보면 ZUPT 단독항법의 경우 ZUPT 사이의 주행구간에서 주행시간에 비례하여 위치오차가 서서히 증가하고 정지시에 ZUPT를 통해 위치오차가 감소되는 ZUPT의 일반적인 특성을 확인할 수 있다.

NHC와 ZUPT가 결합된 경우의 수평위치오차는 주행구간에서 NHC를 통해 항법오차의 보정이 이루어지므로 ZUPT 단독항법에 비해 오차가 크게 감소되며, 장착 비정렬을 고려한 NHC/ZUPT의 항법성능이 장착 비정렬을 고려하지 않은 경우 보다 더 우수함을 확인할 수 있다.

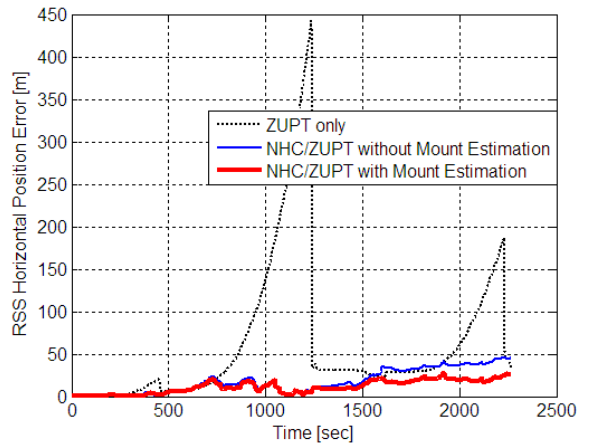


Fig. 6. NHC/ZUPT 구성에 따른 수평위치오차

Table 1. NHC/ZUPT 구성에 따른 위치오차 비교

구분		ZUPT only	NHC/ZUPT	
			장착비정렬 미고려	장착비정렬 고려
수평위치 오차[m]	평균값	66.4	18.9	12.2
	최대값	442.7	46.5	27.6
고도오차 [m]	평균값	8.61	87.7	3.9
	최대값	41.0	214.5	7.2

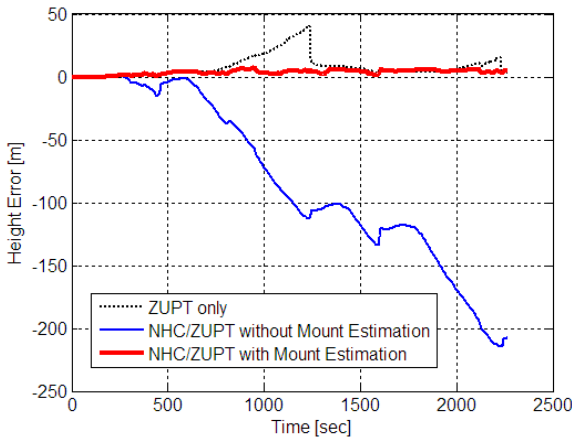


Fig. 7. NHC/ZUPT 구성에 따른 고도오차

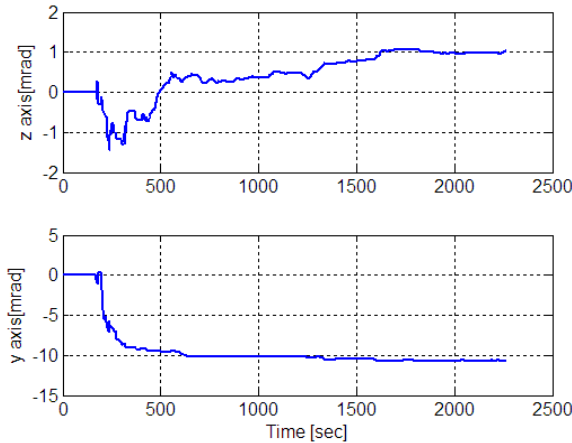


Fig. 8. NHC/ZUPT에서 추정된 장착 비정렬

고도오차는 장착 비정렬을 고려한 NHC/ZUPT의 오차가 가장 작으며, 장착 비정렬을 고려하지 않은 NHC/ZUPT 항법의 고도오차는 ZUPT 단독항법에 비해 매우 크게 유발되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 NHC에서 장착 비정렬의 영향을 단적으로 보여주는 것으로 장착오차에 의해 주행 중 SDINS의 수직축으로 나타나는 실제 속도가 NHC에 의해 영(zero)으로 강제됨으로써 오히려 속도오차와 고도오차를 유발하게 된다. Fig. 8은 장착 비정렬을 고려한 NHC/ZUPT에서 추정된 비정렬 각의 크기를 나타낸 것으로 추정된 값은 SDINS를 차량에 장착할 때 자연적으로 생기는 장착 비정렬 각을 의미한다. Fig. 8에서 수직축(y축 장착 비정렬)으로 약 -10.7mrad의 장착 비정렬에 의해 장착 비정렬을 고려하지 않은 NHC/ZUPT의 고도오차

가 크게 유발되었음을 알 수 있으며, 장착 비정렬을 고려하는 경우 추정된 장착오차를 실시간으로 보상함으로써 주행 중에도 매우 정밀한 고도정보를 획득할 수 있음을 알 수 있다.

나. 수평축 장착비정렬 크기에 따른 항법오차 비교

장착 비정렬의 크기에 따른 항법오차와 장착 비정렬의 추정성능을 검증하기 위해 임의로 수평축(z축 장착 비정렬)에 장착 비정렬 각을 추가하여 시뮬레이션을 수행하였다. 장착 비정렬이 추가된 관성센서 데이터는 차량시험에서 획득된 관성센서의 데이터를 임의로 추가된 수평축 장착 비정렬에 해당하는 좌표변환 행렬을 통해 변환하여 생성하였다. 추가된 장착 비정렬의 크기는 차량시험에 이용된 SDINS의 초기 방위각 정렬 정확도의 1σ와 3σ에 해당하는 10mrad과 30mrad으로 설정하였다. 따라서 10mrad과 30mrad의 수평축 장착 비정렬 각을 임의로 추가한 후의 실제 장착 비정렬각은 Fig. 8에서 추정된 자연적으로 유발된 비정렬 각인 1mrad이 더해져서 각각 11mrad과 31mrad이 된다.

Fig. 9는 장착 비정렬이 고려되지 않은 NHC/ZUPT의 수평축 비정렬각 크기에 따른 수평위치오차를 나타낸 것으로 그림에서 +0mrad, +10mrad, +30mrad은 차량시험 데이터에 추가된 수평축 장착 비정렬 각의 크기를 의미한다. 결과를 살펴보면 비정렬각의 크기가 커질수록 위치오차가 증가하며, 장착 비정렬이 클 경우 ZUPT 단독항법에 비해 항법성능이 저하됨을 볼 수 있다. 또한 NHC과 ZUPT가 결합되어 정지상태에서 ZUPT를 수행하여도 주행 중 증가된 위치오차가 감소되지 않는 것을 볼 수 있는데, 이는 장착 비정렬이 칼만필터에 모델링 되지 않았기 때문에 장착 비정렬에 의해 유발된 위치오차를 ZUPT에서 추정하지 못하기 때문이다.

Fig. 10은 장착 비정렬이 고려된 NHC/ZUPT의 수평축 장착 비정렬 크기에 따른 수평위치오차를 나타낸 것으로 추가된 비정렬각의 크기에 관계없이 정확도는 거의 동일함을 볼 수 있는데, 이는 Fig. 11에 나타낸 바와 같이 장착 비정렬이 고려된 NHC/ZUPT 칼만필터에서 장착 비정렬을 정확히 추정하였기 때문이다. Fig. 11에서 10mrad과 30mrad의 수평축 장착 비정렬각이 추가된 경우에 임의의 값이 추가되지 않았을 때의 비정렬각인 1mrad이 더해져서 각각 11mrad과 31mrad으로 장착 비정렬각의 추정결과가 수렴함을 볼 수 있다.

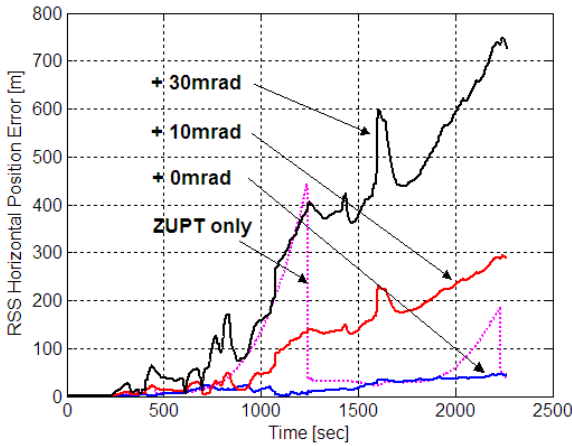


Fig. 9. 수평축 비정렬 크기에 따른 위치오차 비교 (장착 비정렬이 고려되지 않은 NHC/ZUPT)

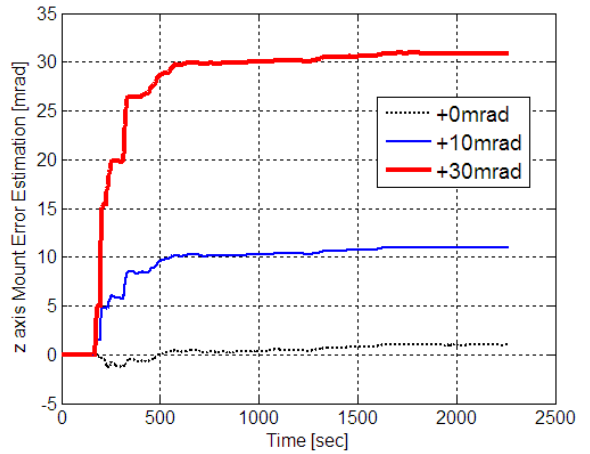


Fig. 11. 수평축 장착 비정렬 추정결과 (장착 비정렬이 고려된 NHC/ZUPT)

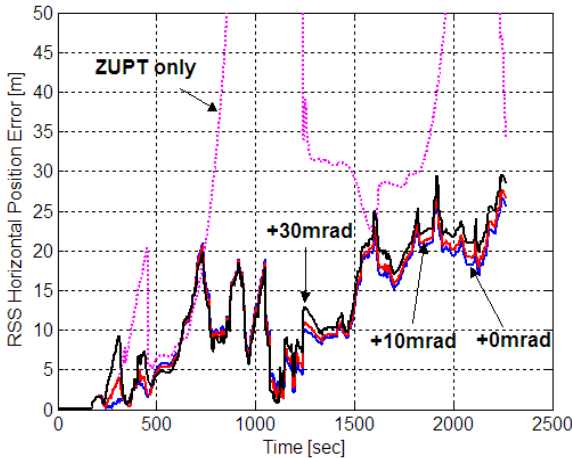


Fig. 10. 수평축 비정렬 크기에 따른 위치오차 비교 (장착 비정렬이 고려된 NHC/ZUPT)

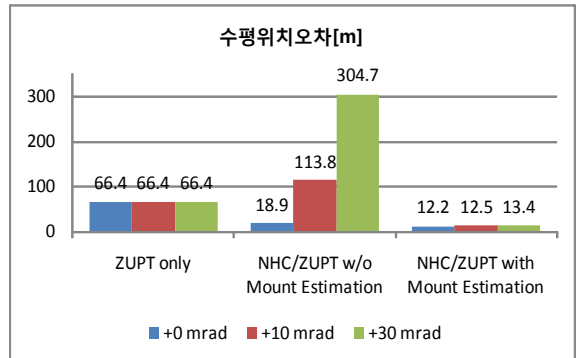


Fig. 12. 수평축 장착 비정렬에 따른 위치오차 비교

Fig. 12는 NHC/ZUPT 구성방법과 장착 비정렬의 크기에 따른 수평위치오차의 평균값을 비교한 것으로 장착 비정렬의 추정을 고려한 NHC/ZUPT로 지상항법장치를 구성할 경우 차량과 SDINS 사이의 장착 비정렬 크기에 관계없이 항상 정확한 항법성능을 얻을 수 있음을 볼 수 있다.

### 5. 결론

본 논문에서는 외부 센서의 도움 없이 SDINS 단독

으로 지상항법성능을 향상시킬 수 있는 방법으로 장착 비정렬의 실시간 추정을 포함한 NHC/ZUPT 칼만 필터를 제시하였다. 차량주행시험에서 얻은 데이터를 이용한 시뮬레이션을 통해 성능을 분석한 결과, 장착 비정렬을 추정하는 NHC/ZUPT는 장착 비정렬을 고려하지 않은 경우에 비해 위치정확도를 크게 향상시키며, 외부 센서의 도움 없이 SDINS 단독으로 매우 정밀한 지상항법이 가능한 것으로 나타났다. 제시된 필터는 GPS와 속도계 등의 보조센서와 결합된 지상항법장치의 구현 시 GPS 신호단절 또는 보조센서의 고장상태에서 장시간 동안 항법성능을 유지하는데 유용할 것이며, 관성센서가 포함된 민수용 차량항법장치와 같이 사용자가 임의로 항법장치를 장착하여 큰 장착 비정렬이 유발되는 경우에 매우 유용할 것으로 판단된다.

## Reference

- [1] 이태규, 신용진, 송기원, “ZUPT/NHC 연합형 칼만 필터를 가지는 지상항법용 SDINS 성능분석”, 2006년도 한국군사과학기술학회 종합학술대회논문집, pp. 355~358, 2006. 8.
- [2] Gamini Dissanayake et al., “The Aiding of a Low-Cost Strapdown Inertial Measurement Unit Using Vehicle Model Constraints for Land Vehicle Applications”, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 17, No. 5, pp. 731~747, October 2001.
- [3] E. H. Shin, “Accuracy Improvement of Low Cost INS/GPS for Land Applications”, ION NTM 2002, pp. 146~157, January 2002.
- [4] K. J. Kim, C. G. Park, and M. J. Yu, “Adaptive Kalman Filter for the Navigation System with Virtual Velocity Measurement”, Proceedings of the European Control Conference, pp. 2207~2212, July 2007.
- [5] 박홍원, “스트랩다운 관성항법장치의 영속도보정 칼만필터 구성 및 성능분석”, 공학석사 학위논문, 서울대학교, 1988.
- [6] D. A. Grejner-Brzezinska, “Bridging GPS Gaps in Urban Canyons : Can ZUPT Really Help?”, ION GPS 2001, pp. 3139~3148, 2001.
- [7] J. Collin, “Unaided MEMS-Based INS Application in a Vehicular Environment”, ION GPS 2001, pp. 1343~1348, 2001.