

## 직진성이 보장되지 않는 조건에서 지상항법시스템의 속도계를 이용한 보정항법 알고리즘

# Aided Navigation Algorithm for Land Navigation System Using VMS with Indirect Drive Condition

김형수

국방과학연구소

**Hyungsoo Kim**

Agency for Defense Development, Daejeon 34060, Korea

### [요 약]

관성항법시스템(INS; inertial navigation system)은 센서 오차에 의해 유발되는 항법오차 보정을 위해 보정시스템이나 보정센서를 사용한다. 위성항법시스템(GNSS; global navigation satellite system), 속도계(VMS; velocity measurement sensor), 레이더는 INS를 보정하기 위해 일반적으로 사용되는 장치이다. 터널을 지나거나 전파 방해를 받아 GNSS를 사용할 수 없는 환경에서 지상항법시스템(LNS; land navigation system)이 주로 사용하는 보정센서는 속도계이다. 속도계는 진행방향의 속도성분만 존재하고 횡축 및 종축 속도성분이 없기 때문에 속도계 보정항법을 수행할 때 직진주행이 요구된다. 국내는 고속도로라도 원활히 속도계 보정항법을 할 수 있는 구간이 드문데, 이는 국토 형상 및 도로 건설 조건이 속도계 보정에 필요한 직진성 유지에 적합하지 않기 때문이다. 본 논문은 직진성이 보장되지 않는 환경에서 LNS의 속도계를 사용한 보정항법을 수행할 때, 측정치의 필터 갱신 조건을 두어 성능을 개선하는 알고리즘을 제안하였다. 또한 차량탐재 시험결과를 제시하여 알고리즘의 성능을 입증하였다.

### [Abstract]

Inertial navigation system (INS) has used aided systems and sensors to compensate navigation error. Global navigation satellite system (GNSS), velocity measurement sensor (VMS), and radar are commonly used to aid INS. Land navigation system (LNS) also mainly uses VMS when GNSS cannot be used such as at tunnel or on jammed scenario. A straight drive is required when VMS-aided navigation is used, because there is only speed of straight direction whereas no crossways and vertical directions. In local environment, even an expressway has lack of straight drive which is constraint of VMS-aided navigation algorithm. This paper proposes an enhanced VMS-aided navigation algorithm for LNS with indirect drive by restricting filter update condition. Also, there is a result of vehicle test to prove performance of the proposed algorithm.

**Key word :** Inertial navigation system, Land navigation system, Velocity measurement sensor, Odometer, Filter.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2016.20.4.314>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Received** 5 August 2016; **Revised** 5 August 2016  
**Accepted (Publication)** 12 August 2016 (30 August 2016)

**\*Corresponding Author; Hyungsoo Kim**

**Tel:** +82-42-821-4243

**E-mail:** hs\_kim@add.re.kr

## 1. 서 론

관성항법시스템(INS; inertial navigation system)은 관성측정장치(IMU; inertial measurement unit)로부터의 출력 값을 이용하여 항법정보를 계산하는 시스템을 일컫는다[1],[2]. IMU는 자이로스코프(gyroscope) 센서와 가속도계 센서로 구성되어 각 속도 및 가속도를 출력한다. INS은 이 관성량을 이용하여 자세, 속도, 위치의 항법정보를 연산한다. INS은 외부요인과 상관없이 동작한다는 장점을 가지지만 IMU의 오차 성분이 적분과정에서 누적되어 사용시간에 따라 항법정보의 오차가 커진다는 단점을 가진다.

INS의 단점을 보완하기 위해 다양한 보정시스템과 보정센서를 사용한다. 무선통신 기술의 발전과 함께 급속하게 발전한 위성항법시스템(GNSS; global navigation satellite system)은 사용시간과 상관없이 위치 오차가 일정하여 널리 사용되는 항법시스템이다. 하지만 무선통신 기술에 기반을 둔 GNSS는 터널, 빌딩숲이나 산지같이 위성으로부터 전파 수신에 용이하지 않은 환경에서 기능을 상실하거나 항법오차가 커진다. 특히 전파 방해나 기만 신호에 취약하여 GNSS만으로는 우주, 항공, 군사 분야같이 높은 안정성과 신뢰성을 요구하는 체계를 만족시킬 수 없고 INS의 보정센서로 사용된다.

지상항법시스템(LNS; land navigation system)은 차량이나 지상 이동체가 사용하는 항법시스템으로서 INS를 기반으로 GNSS를 보정시스템으로 많이 사용한다. 속도계(VMS; velocity measurement sensor)도 대표적인 LNS의 보정센서이다. 속도계는 바퀴의 회전으로 이동하는 차량의 회전축에 엔코더를 설치하여 회전을 전기펄스 신호로 바꾸어 출력하고, 기준시간 대비 펄스 수를 세어 차량의 속도 및 이동거리를 계산하는 장치이다. 하지만 타이어 마모로 바퀴 직경의 변화가 생기거나 차량에 실린 중량의 변화 혹은 도로 표면의 특성에 따라서 속도계의 출력이 변하고 주행 중에 마찰계수가 작은 표면을 지나거나 급제동에 의하여 바퀴가 미끄러지면 속도계에 반영되지 않아 보정항법의 항법오차가 커진다. 반면에 차량과 속도계의 특성을 파악하고 차량이 원활히 주행할 수 있는 도로에서 직진성을 유지 할 경우 높은 신뢰성의 항법정보를 산출한다. 또한, 시간에 따른 오차누적이 생기지 않고 외부 요인으로부터 기능을 상실하지 않는 장점이 있기 때문에 LNS는 위성으로부터 전파 수신이 원활하지 않거나 전파 방해를 받는 환경에서 GNSS 대신 속도계를 보정항법에 사용한다.

LNS는 속도계 외에도 차량의 정지 상태를 감지하여 오차 보정을 하는 영속도보정(ZUPT; zero velocity update)과 차량의 직진방향과 수직인 중축과 횡축의 속도 성분이 없다고 가정하는 NHC(non-holonomic constraint)를 이용한 보정항법을 사용한다. 본 논문에서는 속도계의 속도성분을 계측하여 진행방향 필터의 측정치로 사용하고 직교성분인 횡축은 NHC 구속조건을 적용하여 측정방정식을 세웠다[3],[4]. 이 경우 진행방향의 속도 오차 및 직교성분의 속도 오차 추정이 보다 용이해진다.



그림 1. 속도계 엔코더  
Fig. 1. VMS encoder.

다만, 차량의 직진성이 유지되지 않고 회전을 하면 직교성분으로 센서 오차가 부유하기 때문에 이에 대한 필터 갱신 조건에 대한 개선된 기법을 제시하였다. 또한, 이를 구현하여 탑재시험을 통해 성능을 입증하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장은 본 논문에 제안하고자 하는 시스템과 알고리즘에 대해서 서술한다. 2-1절에서 속도계가 적용된 LNS를 수학적으로 모델링한다. 본 논문에서는 LNS에 대한 모든 부분에 대해서 서술하지 않고 속도계에 주안점을 두고 수식을 이용한 모델링을 한다. 2-2절에서 본 논문이 제안하는 알고리즘에 대해 설명한다. 마지막으로 3장에서 제안한 알고리즘을 적용한 차량탑재 시험결과를 서술한다. 3-1절에서 제안한 알고리즘을 최적화하는 시험결과를 서술한다. 3-2절에서 최적화된 알고리즘을 적용한 차량탑재 시험을 통해 제안한 알고리즘의 성능을 입증한다. 마지막으로 결론에서 본 논문을 요약하고 추가적으로 수행되어야 할 연구에 대해 언급하고 마무리한다.

## II. 속도계를 이용한 지상항법시스템의 보정항법

### 2-1 시스템 모델링

속도계는 일종의 엔코더(encoder)로서 차량의 이동에 따라 회전하는 구동축의 움직임을 전기펄스 신호로 변환하여 LNS로 전달하는 역할을 한다. 본 논문에서는 그림 1의 BEI사 엔코더를 차량의 구동축에 설치하였다. 차량의 진행방향 속도  $v^{VMS}$ 를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$v^{VMS} = \frac{v_{SF}}{1 + \delta v_{SF}} v_{pulse} \quad (1)$$

수식 (1)에서  $v_{SF}$ 는 환산계수(SF; scale factor)로서 타이어

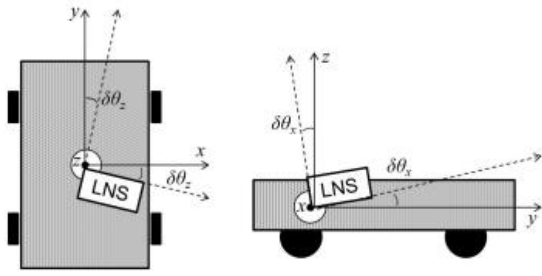


그림 2. 플랫폼의 축과 지상항법시스템과 비정렬각  
 Fig. 2. Axes of platform and misalignment with LNS.

틀레 길이를 타이어 한 바퀴 회전 시 엔코더에서 출력되는 펄스의 수로 나눈 값을 정의하며  $\delta v_{SF}$ 는 환산계수 추정 오차이다. 타이어 마모상태, 타이어 공기압의 변화, 화물중량의 변동에 따라 환산계수가 변화하므로 이를 지속적으로 추정하여 반영해야 한다.  $v_{pulse}$ 는 엔코더에서 나오는 펄스의 속도로서 기준시간  $T$  동안 출력되는 펄스의 수로 정의된다.

플랫폼의 축을 그림 2와 같이 정의하고 LNS와 비정렬각 (misalignment)을  $\delta\theta_x, \delta\theta_z$ 라 했을 때, 플랫폼의 속도  $v_x^p, v_y^p, v_z^p$ 를 LNS로 측정된 속도  $v_x^b, v_y^b, v_z^b$ 로 표현하면 수식 (2), (3), (4)와 같다.

$$v_x^p = v_x^b \cos(\delta\theta_z) + v_y^b \sin(\delta\theta_z) \tag{2}$$

$$v_y^p = -v_x^b \sin(\delta\theta_z) + v_y^b \cos(\delta\theta_z) - v_z^b \sin(\delta\theta_x) \tag{3}$$

$$v_z^p = -v_y^b \sin(\delta\theta_x) + v_z^b \cos(\delta\theta_x) \tag{4}$$

정교한 기구적 설계를 바탕으로 LNS를 플랫폼에 설치하여 비정렬각을 최소화하고 수식 (2), (3), (4)를 테일러 급수 전개하여 간략화하면 다음과 같다.

$$v_x^p \approx v_x^b + v_y^b \delta\theta_z \tag{5}$$

$$v_y^p \approx v_y^b - v_x^b \delta\theta_z - v_z^b \delta\theta_x \tag{6}$$

$$v_z^p \approx v_z^b - v_y^b \delta\theta_x \tag{7}$$

LNS의 속도와 비정렬각의 추정 오차 성분을 고려하여 플랫폼의 속도  $\hat{v}_x^p, \hat{v}_y^p, \hat{v}_z^p$ 를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\hat{v}_x^p \approx \hat{v}_x^b + \hat{v}_y^b \hat{\delta}\theta_z \approx (v_x^b + \delta v_x^b) + (v_y^b + \delta v_y^b)(\delta\theta_z - \delta\delta\theta_z) \tag{8}$$

$$\hat{v}_y^p \approx \hat{v}_y^b - \hat{v}_x^b \hat{\delta}\theta_z - \hat{v}_z^b \hat{\delta}\theta_x \approx (v_y^b + \delta v_y^b) - (v_x^b + \delta v_x^b)(\delta\theta_z - \delta\delta\theta_z) - (v_z^b + \delta v_z^b)(\delta\theta_x - \delta\delta\theta_x) \tag{9}$$

$$\hat{v}_z^p \approx \hat{v}_z^b - \hat{v}_y^b \hat{\delta}\theta_x \approx (v_z^b + \delta v_z^b) - (v_y^b + \delta v_y^b)(\delta\theta_x - \delta\delta\theta_x) \tag{10}$$

측정치 식을 구성하기 위하여 LNS를 통해 계산된 속도와

속도계를 통해 측정된 직진방향 속도를 이용하여 다음과 같이 선정한다.

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{v}_x^p - v_x^p \\ \hat{v}_y^p - v_y^{VMS} \\ \hat{v}_z^p - v_z^p \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \hat{v}_x^b + \hat{v}_y^b \hat{\delta}\theta_z - v_x^p \\ \hat{v}_y^b - \hat{v}_x^b \hat{\delta}\theta_z + \hat{v}_z^b \hat{\delta}\theta_x - \hat{v}_y^{VMS} \\ \hat{v}_z^b - \hat{v}_y^b \hat{\delta}\theta_x - v_z^p \end{bmatrix} \tag{11}$$

여기서 NHC를 가정하여 횡축과 종축의 속도인  $v_x^p$ 와  $v_z^p$ 가 0이라고 가정한다면 수식 (11)은 다음과 같다.

$$\mathbf{z} \approx \begin{bmatrix} \hat{v}_x^b + \hat{v}_y^b \hat{\delta}\theta_z \\ \hat{v}_y^b - \hat{v}_x^b \hat{\delta}\theta_z + \hat{v}_z^b \hat{\delta}\theta_x - v_y^{VMS} \\ \hat{v}_z^b - \hat{v}_y^b \hat{\delta}\theta_x \end{bmatrix} \tag{12}$$

LNS의 축 방향으로 측정된 속도를 항법좌표계의 ENU 축 속도로 변환하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \hat{v}_x^b \\ \hat{v}_y^b \\ \hat{v}_z^b \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} v_x^b \\ v_y^b \\ v_z^b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta v_x^b \\ \delta v_y^b \\ \delta v_z^b \end{bmatrix} = \mathbf{C}_b^T \left\{ \begin{bmatrix} v_E \\ v_N \\ v_U \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta v_E \\ \delta v_N \\ \delta v_U \end{bmatrix} \right\} \\ &= \mathbf{C}_b^T [\mathbf{I} + \boldsymbol{\Psi}] \left\{ \begin{bmatrix} v_E \\ v_N \\ v_U \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta v_E \\ \delta v_N \\ \delta v_U \end{bmatrix} \right\} \\ &= \mathbf{C}_n \begin{bmatrix} v_E \\ v_N \\ v_U \end{bmatrix} + \mathbf{C}_n \boldsymbol{\Psi} \begin{bmatrix} v_E \\ v_N \\ v_U \end{bmatrix} + \mathbf{C}_n \begin{bmatrix} \delta v_E \\ \delta v_N \\ \delta v_U \end{bmatrix} + \mathbf{C}_n \boldsymbol{\Psi} \begin{bmatrix} \delta v_E \\ \delta v_N \\ \delta v_U \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{13}$$

수식 (13)의 마지막 항은 0에 근사한다고 가정하고 이를 수식 (12)에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{z} &\approx \begin{bmatrix} \hat{v}_x^b + \hat{v}_y^b \hat{\delta}\theta_z \\ \hat{v}_y^b - \hat{v}_x^b \hat{\delta}\theta_z + \hat{v}_z^b \hat{\delta}\theta_x - \hat{v}_y^{VMS} \\ \hat{v}_z^b - \hat{v}_y^b \hat{\delta}\theta_x \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} v_x^b \\ v_y^b \\ v_z^b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{21} & c_{31} \\ c_{12} & c_{22} & c_{32} \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -\psi_U & \psi_N \\ \psi_U & 0 & -\psi_E \\ -\psi_N & \psi_E & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_E \\ v_N \\ v_U \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} c_{11} & c_{21} & c_{31} \\ c_{12} & c_{22} & c_{32} \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta v_E \\ \delta v_N \\ \delta v_U \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{v}_y^b \hat{\delta}\theta_z \\ -\hat{v}_x^b \hat{\delta}\theta_z + \hat{v}_z^b \hat{\delta}\theta_x - \hat{v}_y^{VMS} \\ -\hat{v}_y^b \hat{\delta}\theta_x \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} v_x^b \\ v_y^b \\ v_z^b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{21} & c_{31} \\ c_{12} & c_{22} & c_{32} \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & v_U & -v_N \\ -v_U & 0 & v_E \\ v_N & -v_E & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_E \\ \psi_N \\ \psi_U \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} c_{11} & c_{21} & c_{31} \\ c_{12} & c_{22} & c_{32} \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta v_E \\ \delta v_N \\ \delta v_U \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{v}_y^b (\delta\theta_z - \delta\delta\theta_z) \\ -\hat{v}_x^b (\delta\theta_z - \delta\delta\theta_z) + \hat{v}_z^b (\delta\theta_x - \delta\delta\theta_x) - \hat{v}_y^{VMS} \\ -\hat{v}_y^b (\delta\theta_x - \delta\delta\theta_x) \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{14}$$

$$\approx \begin{bmatrix} -c_{21}v_U + c_{31}v_N & c_{11}v_U - c_{31}v_E & -c_{11}v_N + c_{21}v_E \\ -c_{22}v_U + c_{32}v_N & c_{12}v_U - c_{32}v_E & -c_{12}v_N + c_{22}v_E \\ -c_{23}v_U + c_{33}v_N & c_{13}v_U - c_{33}v_E & -c_{13}v_N + c_{23}v_E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_E \\ \psi_N \\ \psi_U \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{21} & c_{31} \\ c_{12} & c_{22} & c_{32} \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta v_E \\ \delta v_N \\ \delta v_U \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\hat{v}_y^b \delta \delta \theta_z \\ \hat{v}_x^b \delta \delta \theta_z - \hat{v}_z^b \delta \delta \theta_x - \hat{v}_y^b \delta v_y^{VMS} (1 + \delta v_y^{VMS}) \\ \hat{v}_y^b \delta \delta \theta_x \end{bmatrix}$$

수식 (14)를 이용하여  $H_k$ 를 구하면 다음과 같다.

$$H_k = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{1 \times 3} & c_{11} & c_{21} & c_{31} & c_{31}v_N - c_{21}v_U & c_{11}v_U - c_{31}v_E & c_{21}v_E - c_{11}v_N \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & c_{12} & c_{22} & c_{32} & c_{32}v_N - c_{22}v_U & c_{12}v_U - c_{32}v_E & c_{22}v_E - c_{12}v_N \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & c_{13} & c_{23} & c_{33} & c_{33}v_N - c_{23}v_U & c_{13}v_U - c_{33}v_E & c_{23}v_E - c_{13}v_N \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{0}_{1 \times 3} & 0 & 0 & -\hat{v}_y^b & 0 \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{0}_{1 \times 3} & 0 & -\hat{v}_z^b & \hat{v}_x^b & -\hat{v}_y^b v_y^{VMS} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{0}_{1 \times 3} & 0 & \hat{v}_y^b & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

수식 (15)를 이용한 오차 추정 필터는 위치 오차 3차, 속도 오차 3차, 자세 오차 3차, 가속도계 및 자이로 바이어스 각각 3차, 시간 지연 1차, 중·횡축 비정렬각 오차 2차, 속도계 환산계수 오차 1차를 고려하여 총 19차로 설계하였다[4]-[6].

## 2-2 알고리즘

본 논문에서는 직진성이 보장되지 않는 주행 환경을 고려해야 한다. 하지만 속도계를 이용한 보정항법 내내 NHC를 적용시키면 실제 환경에서 횡축으로의 이동 및 속도와 모순되어 오차가 발생하게 된다. 따라서 LNS에서 속도계를 이용한 보정항법을 수행할 때, 속도계 측정치의 갱신 조건에 제한을 두고 이를 반영하는 알고리즘을 설계하여 모순되는 상황을 최소화해야 한다.

갱신 조건에 방위각 변화율과 진행방향의 속도를 반영하여 알고리즘을 설계하였다. 앞서 설명하였듯이 방위각 변화율이 작을수록 직진성이 높다고 판단 할 수 있기 때문이다. 추가로 진행방향의 속도를 감지하여 측정치 갱신 조건에 반영하여 알고리즘을 설계하였다. 진행방향의 속도가 작을 경우 직진을 하더라도 도로의 상태에 따라 횡축으로 미끄러지거나 도로 굴곡에 의하여 차량의 방위각 변화 없이 횡축으로 이동하게 되어 차량의 직진성이 떨어지기 때문이다. 따라서 이 두 값에 대하여 기준점(threshold)를 설정하여 관찰 값이 기준점에 대한 조건을 만족하면 속도계 측정치의 갱신이 수행되는 알고리즘을 설계하였다.

1) 방위각 변화율  $\Delta\psi^{TH}$ : 속도계 측정치 갱신 주기에 맞추어 LNS에서 계산되어 출력되는 차량의 방위각 변화를 지속적으로 관찰해야 한다. 본 논문에서는 속도계를 이용한 보정항법의 측정치 갱신 주기를 1 Hz로 설정하였다. 따라서 초당 방위각 변화량의 기준점을 설정해 두고 1 Hz마다 이를 확인해야 한다.

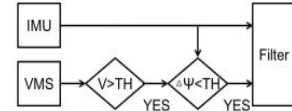


그림 3. 방위각 변화율과 진행방향 속도 기준점을 반영한 측정치 갱신 알고리즘

Fig. 3. Filter update algorithm with threshold of velocity and yaw rate.

$$\Delta\psi^{TH} = |\psi[t] - \psi[t-1]| \quad (16)$$

2) 진행방향 속도  $v_y^{p,TH}$ : 진행방향의 속도를 알기 위해서 LNS의 진행방향 속도를 살펴볼 수 있다. 하지만 비정렬각에 의한 오차 때문에 이를 보상해야 하고 잔존 오차가 남아 있기 때문에 진행방향의 속도만을 보기가 어렵다. 또한 구동 시간에 따라 오차가 누적되어 측정치에 대한 신뢰성이 변한다. 따라서 비정렬각에 의한 오차를 보상할 필요도 없고 시간에 따라 측정값에 대한 신뢰성이 변하지 않는 속도계에서 출력되는 진행방향의 속도를 관찰하였다. 속도계 엔코더에서 출력되는 전기 펄스 신호를 LNS에서 1 Hz의 주기로 속도로 변환한다. 이는 속도계 측정치 갱신 주기와 일치하므로 매 갱신 주기마다 속도계로 측정된 속도를 갱신 조건 기준점과 비교하도록 설정하였다. 이를 반영한 구조를 간략히 도식화하면 그림 3과 같다.

$$v_y^{p,TH} = |v_y^{VMS}| \quad (17)$$

## III. 차량탐재 시험결과

### 3-1 최적화 시험결과

방위각 변화율과 진행방향 속도를 관찰하여 갱신 조건에 제한을 두기위해 기준점을 최적화하려면 차량의 특성을 반영해야 한다. 차량마다 특성이 다르기 때문에 여러 차례 시험을 반복하여 시험결과를 분석하여 최적의 기준점을 설정할 필요가 있다.

진행방향의 속도에 대한 최적화 시험은 도로사정 및 현실적인 문제로 수행하지 않았다. 진행방향의 속도에 대해서 시험하기 위해서는 충분한 거리를 동일한 속도와 동일한 패턴으로 주행해야 한다. 하지만 도로 여건 상 시험을 수행할 수 있는 곳이 마땅치 않았으며 더욱이 동일한 가속도로 높은 속도에 도달하여 이를 유지한 채 반복적으로 차량을 주행하는 것은 현실적으로 불가능하다. 대신에 진행방향 속도에 대한 기준점을 두기 위해 차량의 속도에 따른 모습을 관찰하였고, 미끄러짐이나 의도하지 않은 횡축 이동이 잘 관찰되지 않는 최저 속도인 5 m/s를 기준점으로 설정하였다.

방위각 변화율에 대한 최적의 기준점을 설정하기 위해서

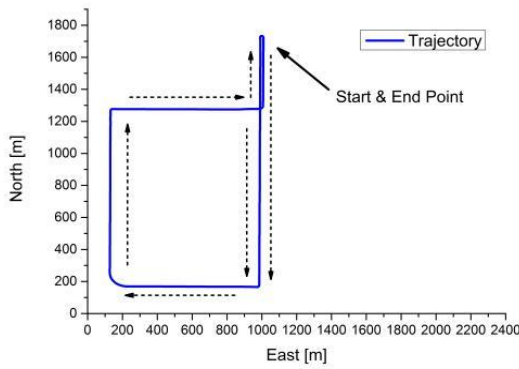


그림 4. 최적화 차량시험 주행 궤적  
Fig. 4. Trajectory of optimization test.

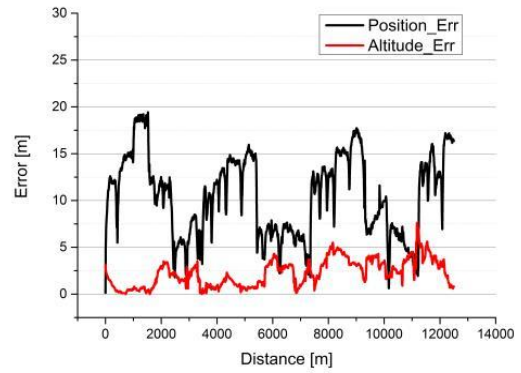


그림 7. 위치 및 고도 오차 (방위각 변화율 기준점 1.50 °/s)  
Fig. 7. Position & altitude error (yaw rate under 1.50 °/s).

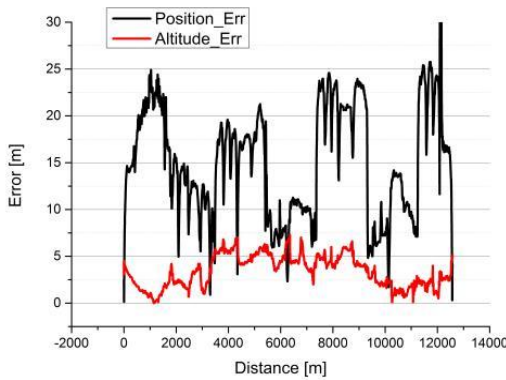


그림 5. 위치 및 고도 오차 (방위각 변화율 기준점 1.00 °/s)  
Fig. 5. Position & altitude error (yaw rate under 1.00 °/s).

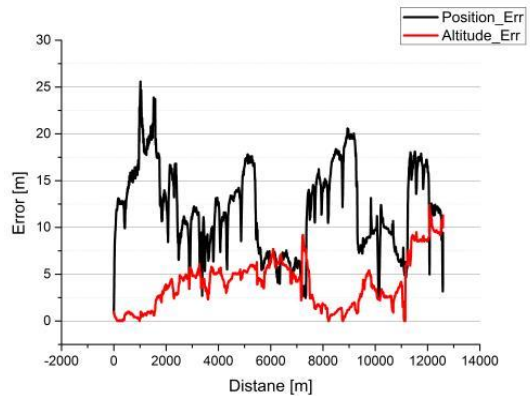


그림 8. 위치 및 고도 오차 (방위각 변화율 기준점 1.75 °/s)  
Fig. 8. Position & altitude error (yaw rate under 1.75 °/s).

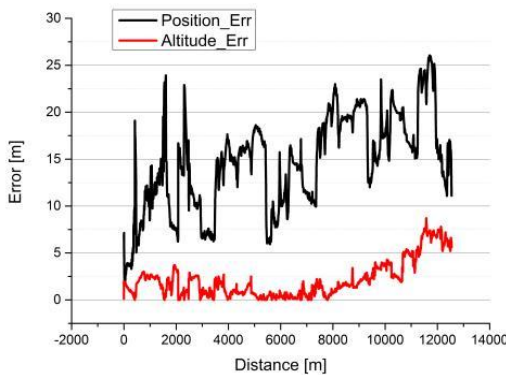


그림 6. 위치 및 고도 오차 (방위각 변화율 기준점 1.25 °/s)  
Fig. 6. Position & altitude error (yaw rate under 1.25 °/s).

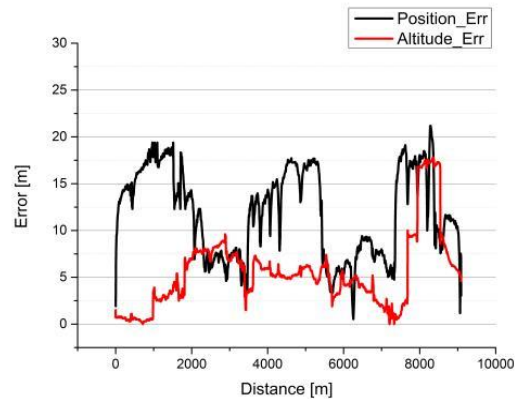


그림 9. 위치 및 고도 오차 (방위각 변화율 기준점 2.00 °/s)  
Fig. 9. Position & altitude error (yaw rate under 2.00 °/s).

다양한 값을 설정해보고 차량탐재 시험을 수행하였다. 탐재 시험을 위한 주행 경로는 그림 4에 나타내었다. 본 논문에서는 방위각 변화율 기준점을 1 ~ 2 %/s 범위에서 0.25 %/s의 변화를 주어 일반도로를 2 ~ 3바퀴 주행한 시험결과를 그림 5-9에 차례대로 나열하였다. 각 그래프는 이동거리에 따른 위치 및 고도 오차를 나타내고 있으며 오차를 계산하기 위해서 GNSS

의 위치를 기준으로 하였다. 시험결과를 살펴보면 오차가 커졌다가 작아지는 것을 알 수 있다. 이는 출발점으로 되돌아오는 왕복에 대한 보상 효과이다. 기준점이 커질수록 위치 오차는 작아지는 경향을 보이다가 다시 커지는 것을 알 수 있다. 반면에 고도 오차는 커지는 것을 알 수 있는데 이는 회전 혹은 횡방향 이동 시 수직 방향으로 직진 성분이 사영되는 것에 대

표 1. 최적화 차량탑재 시험결과

Table 1. Result of test for optimization.

Threshold [°/s]	Distance [m]	Position Error[m]	Altitude Error[m]	Position Err[DT%]	Altitude Err[DT%]
1.00	12576	34	7.6	0.27	0.06
1.25	12542	26	8.7	0.21	0.07
1.50	12499	19.4	8	0.16	0.06
1.75	12590	25.6	12.6	0.20	0.10
2.00	9090	21.2	17.7	0.23	0.19

표 2. 성능검증 차량탑재 시험결과

Table 2. Result of test for performance evaluation.

Threshold [°/s]	Distance [km]	Position Error[m]	Altitude Error[m]	Position Err[DT%]	Altitude Err[DT%]
1.50	120.28	77.9	363.9	0.06	0.30

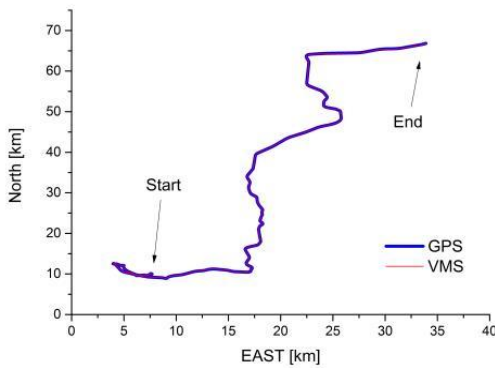


그림 10. 성능 검증 시험 주행궤적  
Fig. 10. Trajectory of performance test.

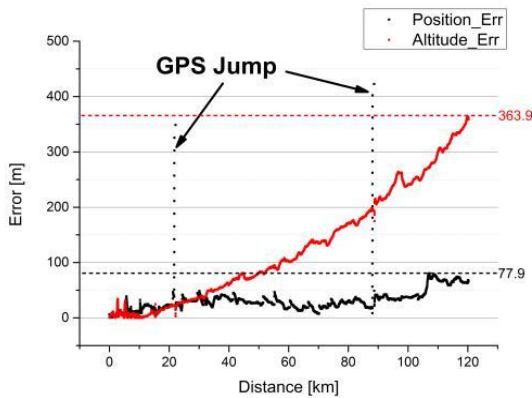


그림 11. 성능검증 시험결과 오차  
Fig. 11. Error of performance test.

한 제한이 헛수가 적어지기 때문이다. 시험결과를 표 1에 정리하여 비교해보면 기준점을 1.50 %/s 로 설정 하였을 때 가장 좋은 성능을 나타내는 것을 알 수 있다.

### 3-2 성능검증 시험결과

3-1절에서 수행한 최적화 시험결과에 따라 기준점을 각각

1.50 %/s와 5 m/s로 설정하여 설계한 알고리즘을 LNS에 적용하였다. 성능을 입증하기 위해 고속도로 위주로 120 km 주행을 하였고 궤적은 그림10과 같다.

시험결과인 표2와 그림 11을 보면 최대 오차는 위치 DT 0.06%, 고도 DT 0.30%임을 알 수 있다. 여기서 DT는 “주행거리 대비”를 의미한다. 최적화 시험결과와 달리 위치 오차에서 높은 성능을 보이는데 고속도로에서 대부분 주행하였기 때문이다. 다만 고도 오차는 큰 경향이 있는데 추후 경사면에 대해 보다 나은 모델링 기법을 개발하면 고도 오차가 줄어들어 항법 성능이 개선될 것이라 기대한다.

## IV. 결 론

LNS의 속도계를 이용한 보정항법은 위성항법이 불가능한 경우 요긴하게 사용할 수 있다. 본 논문에서는 직진성이 보장되지 않는 환경에서 속도계를 이용한 보정항법의 오차를 감소시키기 위해서 회전이나 횡축 이동을 감지하여 속도계 측정치 갱신에 대한 제한을 두어 선택적으로 속도계 보정항법을 수행하는 알고리즘을 제안하였다. 이를 구현하여 차량탑재 시험을 통해 성능분석을 하였다. 향후 고도 오차에 대한 성능 개선이 필요할 것으로 보인다.

## 참고 문헌

- [1] D. H. Titterton and J. L. Weston, *Strapdown Inertial Navigation Technology*, London, UK: Peter Peregrinus Ltd, 1997.
- [2] P. D. Groves, *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*, 2nd ed. Norwood, MA: Artech House, 2013.
- [3] G. Dissanayake, S. Sukkarieh, E. Nebot, and H. Durrant-Whyte, “The aiding of a low-cost strapdown inertial measurement unit using vehicle model constraints for land vehicle applications,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 17, No. 5 pp. 731-747, Oct. 2001.
- [4] E. Shin and N. El-Sheimy, “Navigation Kalman filter design for pipeline pigging,” *The Journal of Navigation*, Vol. 58, No. 2, pp. 283-295, May. 2005.
- [5] J. Seo, H. Lee, J. Lee, and C. Park, “Lever arm compensation for GPS/INS/odometer integrated system,” *International Journal of Control, Automation, and Systems*, Vol. 4, No. 2 pp. 247-254, Apr. 2006.
- [6] E. M. Hemerly, and V. R. Schad, “Implementation of a GPS/INS/odometer navigation system,” *ABCMS Symposium Series in Mechatronics*, Vol. 3, No. 1, pp. 519-524, Nov. 2008.



**김형수 (Hyungsoo Kim)**

2007년 8월 : 한국정보통신대학교 전자통신공학과 (공학사)

2009년 8월 : 한국과학기술원 정보통신공학과 (공학석사)

2009년 9월 ~ 2013년 3월 : 엘지이노텍 주임연구원

2014년 9월 ~ 현재 : 국방과학연구소 연구원

※ 관심분야 : 관성항법시스템, 위성항법시스템, 칼만필터, 복합항법