

차량용 INS/GPS 결합시스템의 가관측성 분석 및 다중 차수 필터 설계

Observability Analysis and Multi-Dimensional Filter Design of the INS/GPS Integrated System for Land Vehicles

조 성 윤*
(Seong Yun Cho)

Abstract : In this paper, the observability of the INS/GPS integrated system for a land vehicle is analyzed on measurements and different filters with respect to the measurements are designed. In the stationary case, it is shown that horizontal accelerometer biases and vertical attitude errors and gyro biases are unobservable. An 8-state filter is designed based on the observability analysis. When GPS signal is available, a 15-state filter is used with position and velocity measurements. To estimate the INS errors even in the case that GPS signal is blocked a filter is designed in consideration of the non-holonomic constraints of a land vehicle. In this case, the horizontal position and velocity errors and vertical attitude error are unobservable. However, a 12-state filter including the velocity states is designed to estimate the accelerometer biases. When GPS signal recovers, a 9-state filter is used excluding the sensor biases. This paper presents a multi-dimensional filter that switches the four filters according to the usable measurements and maneuver environments. A simulation is carried out to verify the performance of the proposed filter.

Keywords : INS/GPS, measurement, observability, multi-dimensional filter, constrained INS filter

I 서론

항행 및 군용 유도무기의 핵심 기술로 사용되던 항법장치(navigation system)는 텔레매틱스(telematics)/LBS 기술의 필요성과 시장이 형성되면서부터 차량용/보행자용 항법장치를 위한 기술로 연구되어 오고 있다[1-3]. 현재 민용 항법장치로는 주로 GPS가 사용되고 있으며 터널/도심(dense urban)지역에서 연속적인 차량용 항법정보 제공을 위해 단일 GPS 수신기에서 GPS 정보의 외삽법(extrapolation)/지도 정합법(map matching)을 사용하는 방법과 DR(Dead Reckoning) 장치와 GPS 수신기를 결합하는 방법 등이 이용되고 있다. DR은 항체(vehicle)의 속도와 방위각 정보를 사용하여 연속적으로 변하는 위치 정보를 계산하는 추측 항법장치로 속도계, 가속도계, 지자계 센서, 자이로 등을 사용하여 구현될 수 있다[4]. 차량용 DR 장치는 BM(Before Market)용으로 속도계와 지자계 센서/자이로를 사용하여 구현될 수 있으며 최근 AM(After Market)용으로 가속도계와 자이로로 구성된 관성측정장치(IMU: Inertial Measurement Unit)를 사용하는 방법이 연구되고 있으며, 이 기술은 항행 및 군용에서 사용되는 INS(Inertial Navigation System)와 동일하다. 하지만 가격 및 크기 등의 이유로 IMU를 저가의 MEMS형 관성센서로 구성하는 것이 추세이다. MEMS형 IMU를 사용하는 INS의 성능 향상을 위한 연구가 약 10년 전부터 중요 연구 테마로 자리잡고 있으며, 차량용 INS/GPS 결합시스템이 그 연구 중심에 위치하고 있다[1,5,6].

INS와 GPS는 서로 다른 특성을 가지고 있으며, 상호 보완

성을 고려하여 특정 필터를 사용하여 결합된다. 비선형성을 갖는 두 시스템의 특성상 EKF(Extended Kalman Filter), SPKF(Sigma Point Kalman Filter) 등 비선형 필터가 사용되고 있다[7-10]. INS/GPS에서 SPKF는 계산량이 EKF보다 많으므로 실시간 구현을 위해 현재 EKF가 더 많이 사용되고 있다. 필터는 추정될 상태변수와 사용 가능한 측정치에 따라 설계된다. 일반적으로 INS/GPS 결합시스템에서는 3D 항법해 제공을 위해 15차 모델이 사용되며, 2D를 위해 수직축 오차를 제외한 12차 모델이 사용되기도 한다[11]. 필터의 성능은 가관측성(observability)에 의존하며 주로 운항 궤적에 따라 다르게 나타나는 가관측성을 분석하여 항법 성능을 향상시키기 위한 운항 궤적을 설정하는 등의 연구가 수행되었다[12,13]. 또한 정지 상태에서 가관측성 향상을 위해 자세를 임의로 변경하는 연구 결과도 발표되었다[14]. 그리고 정지 상태의 0속도 보정 시 관측 가능한 상태변수 및 상태변수 조합을 찾아내는 연구도 이루어졌다[15,16]. 본 논문에서는 정지 상태 가관측성 분석을 통해 관측 가능한 8개의 상태변수로 구성된 필터를 설계한다.

GPS 신호를 사용할 수 없는 구간에서는 단독 INS만 사용하거나 차량의 전진방향에 수직된 두 축 방향으로 속도는 0이라는 조건(non-holonomic constraints)을 사용하여 제약된 INS 필터(CIF: Constrained INS Filter)를 구성할 수 있다[17,18]. CIF는 차량용 항법을 위해 사용되어온 필터이기는 하지만 아직 가관측성 분석을 통해 관측 가능한 상태변수를 파악하는 연구는 발표되지 않았다. 본 논문에서는 공분산 해석과 몬테칼로 시뮬레이션을 통해 CIF의 가관측성을 분석한다.

가관측성 분석을 통해 정지상태 필터, INS/GPS 15차 필터, CIF, 그리고 GPS 신호 사용이 불가능한 상황에서 가능한 상황으로 바뀌는 지역에서 사용되는 INS/GPS 9차 필터를 설계한다. 그리고 상황에 따라 4개의 필터를 스위칭하는 다중 차수

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2007. 6. 21., 채택확정 : 2008. 5. 1.

조성윤 : 한국전자통신연구원 융합기술연구부팀 텔레매틱스연구부 (sycho@etri.re.kr)

※ 본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 IT 신성장동력핵심기술 개발사업의 일환으로 수행하였음. [2007-F-040-01, 실내의 연속측위 기술 개발]

필터(MDF: Multi-Dimensional Filter)를 설계한다.

본 논문의 2장에서는 저급 관성센서로 구성된 차량용 INS의 오차 모델을 설정하고, 각 모델에 대한 가관측성을 3장에서 분석한다. 4장에서는 다중 차수 필터를 설계하고 그 결과를 시뮬레이션을 통해 5장에서 확인한다. 그리고 6장에서 결론을 맺는다.

II. 저급 관성센서로 구성된 차량용 INS의 오차 모델

INS는 초기 오차와 관성센서 오차의 누적에 의하여 시간에 따라 점점 커지는 오차 특성을 갖는다. 따라서 저급 INS를 단독으로 사용하는 경우 항법 솔루션의 신뢰도는 짧은 시간 안에 떨어지게 된다. 그러나 INS 오차는 특정 모델을 갖고 증가하므로 이 모델 기반으로 GPS 정보를 사용하여 INS의 오차를 추정할 수 있다[10]. 본 장에서는 EKF를 사용한 약결합 방식으로 INS와 GPS를 결합하기 위한 시스템 모델과 측정치 모델을 정의한다.

1. 시스템 모델

EKF는 INS의 오차 모델을 사용하여 INS의 오차를 추정하므로 정확한 오차 모델을 사용해야 한다. 일반적으로 INS 계산식의 섭동(perturbation)을 통해 오차식을 유도한 다음 오차 모델을 구성한다[10]. 이때 저급 관성센서를 사용하여 구성된 INS를 차량에 사용하는 경우 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$\frac{\partial R_m}{\partial L} = 0, \quad \frac{\partial R_l}{\partial L} = 0, \quad \delta\omega_{ie}^n = 0, \quad \delta\omega_{en}^n = 0 \quad (1)$$

여기서 L 은 위도, R_m 과 R_l 는 각각 지구 타원체의 위도방향 반지름과 경도방향 반지름을 의미한다. 그리고 ω_{ie}^n 은 지구자전 각속도를 항법좌표계 상으로 나타낸 것이며, ω_{en}^n 은 속도에 의해 발생하는 항법좌표계의 회전각속도이다.

따라서 본 논문에서 사용하게 되는 기본 오차 모델은 15차 모델로 저급 관성센서를 사용하는 차량용 INS를 가정하여 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{INS}(t) &= F(t)x(t) + G(t)w(t), \quad w \sim N(0, Q) \\ &= \begin{bmatrix} F_{pp} & F_{pv} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & \Omega_1 & f^n \times & C_b^n & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & \Omega_2 & 0_{3 \times 3} & -C_b^n \\ & & 0_{6 \times 15} & & \end{bmatrix} x(t) \\ &\quad + \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ C_b^n & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & C_b^n \\ 0_{6 \times 3} & 0_{6 \times 3} \end{bmatrix} w(t) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 오차 상태변수는 위치오차, 속도오차, 자세오차, 가속도계 바이어스 및 자이로 바이어스로 다음과 같다.

$$x = [\delta L \quad \delta l \quad \delta h \mid \delta V_N \quad \delta V_E \quad \delta V_D \mid \phi_N \quad \phi_E \quad \phi_D \mid \nabla_x \quad \nabla_y \quad \nabla_z \mid \varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z]^T \quad (3)$$

그리고 오차 모델 구성요소는 [21]에서 획득할 수 있다.

2. 측정치 모델

INS/GPS 시스템에서 측정치 모델은 결합 방식과 차량의 운항 정보, 그리고 GPS 신호 사용 유무에 따라 다르게 설계될 수 있다. 본 논문에서는 약결합 INS/GPS 시스템을 기본으로 하며 차량의 정지상태, 운항 중 GPS 신호 사용 유무에 따라 각각 다음과 같이 측정치 모델을 설계할 수 있다.

2.1 정지상태

차량이 정지한 상태에서 측정 가능한 확실한 정보는 차량의 속도정보이다. 즉 차량의 모든 방향으로의 속도는 0이므로 다음과 같이 측정치 모델을 구성할 수 있다.

$$\begin{aligned} z(t) &= V_{INS} - [0 \quad 0 \quad 0]^T \\ &= Hx(t) + v(t) \\ H &= [0_{3 \times 3} \quad I_{3 \times 3} \quad 0_{3 \times 9}] \end{aligned} \quad (4)$$

2.2 운항 중 GPS 신호 사용 가능

차량이 운항하는 중 GPS 신호를 사용할 수 있는 구간에서는 GPS 수신기에서 계산된 위치와 속도 정보를 측정치로 사용할 수 있다. 위치 정보만을 사용하는 경우와 위치와 속도를 모두 사용하는 경우의 차이는 다음 장에서 공분산 해석을 통해 확인할 수 있다. 측정치 모델은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} z(t) &= \begin{bmatrix} P_{INS} \\ V_{INS} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P_{GPS} \\ V_{GPS} \end{bmatrix} \\ &= Hx(t) + v(t) \\ H &= [I_{6 \times 6} \quad 0_{6 \times 9}] \end{aligned} \quad (5)$$

2.3 운항 중 GPS 신호 사용 불가

차량이 운항하는 중 터널 및 도심에서 GPS 신호가 차단되는 경우 단독 INS를 수행하거나 제약된 차량의 움직임을 고려한 제약된 INS 필터(CIF)를 구동할 수 있다. 즉 차량이 도로면에서 미끄러지는 운동을 하지 않는 한 차량의 동체좌표계 상에서 전진방향(x축)에 수직된 두 방향(y축, z축)으로 속도는 0이 된다. 따라서 이런 제약된 조건을 사용하여 다음과 같이 측정치 모델을 구성할 수 있다[18].

$$\begin{aligned} z(t) &= ((C_b^n)^T V_{INS})_{2,3,:} - [0 \quad 0]^T \\ &= Hx(t) + v(t) \\ H &= \left[0_{2 \times 3} \mid (C_b^n)^T_{2,3,:} \mid \left(-(C_b^n)^T (V^n \times) \right)_{2,3,:} \mid 0_{2 \times 6} \right] \\ &= \left[0_{2 \times 3} \mid \begin{array}{ccc|ccc} c_{12} & c_{22} & c_{32} & -c_{22}V_D + c_{32}V_E & & \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & -c_{23}V_D + c_{33}V_E & & \\ c_{12}V_D - c_{32}V_N & -c_{12}V_E + c_{22}V_N & & & & \\ c_{13}V_D - c_{33}V_N & -c_{13}V_E + c_{23}V_N & & & & \end{array} \mid 0_{2 \times 6} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 측정잡음은 차량의 진동 등에 의해 발생한다. c_{ij} 는 좌표변환행렬(C_b^n)의 i 행 j 열 구성요소이며, $(\cdot)_{2,3,:}$ 는 행렬의 2행과 3행만을 나타내는 것을 의미한다.

III. 가관측성 분석

상태변수 추정 필터의 주요성능 중 하나가 가관측성이다. 즉 특정 측정치를 통해 상태변수 추정 가능성을 나타내는 지

표이다. 모든 상태변수가 관측 가능한 경우 완전 가관측 (complete observable)하다고 하며 측정치 및 시스템의 운용 환경에 따라 부분적인 상태변수 및 상태변수의 조합이 가능하기도 한다. 상태변수의 완전 가관측성은 가관측 행렬의 계수 검사(rank test)를 통해 확인할 수 있다[19]. 상태변수가 관측 가능한 경우에도 가관측성 정도(degree of observability)가 다를 수 있으며, 이를 공분산 해석을 통해 확인할 수 있다[20]. 본 절에서는 차량용 INS/GPS 시스템의 가관측성을 정지상태와 운항 중 상태(GPS 신호 사용 여부)로 나누어서 분석한다.

1. 정지상태

차량이 출발 전 또는 신호대기 등에 의하여 정지하는 경우가 발생한다. 정지상태에서 GPS 신호를 수신할 수 있는 경우, 도심지역에서는 주위 환경에 의해 오차를 갖는 항법정보를 GPS 수신기로부터 획득할 수도 있으므로 GPS 정보를 사용하지 않는 것으로 한다. 정지상태에서 획득할 수 있는 확실한 측정치는 0-속도 정보이다. 이 경우 위치오차는 추정 불가능하므로 (2)와 (5)에서 정의한 시스템/측정치 모델에서 위치오차 부분을 제외한 다음과 같은 12차 모델을 사용하여 가관측성을 분석한다.

$$\begin{aligned}
 x &= [\delta V_N \quad \delta V_E \quad \delta V_D \quad \phi_N \quad \phi_E \quad \phi_D \\
 &\quad \nabla_x \quad \nabla_y \quad \nabla_z \quad \varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z]^T \\
 F &= \begin{bmatrix} \bar{\Omega}_1 & \bar{f}^n \times & \bar{C}_b^n & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & \bar{\Omega}_2 & 0_{3 \times 3} & -\bar{C}_b^n \\ & & 0_{6 \times 12} & \end{bmatrix} \\
 H &= [I_{3 \times 3} \quad 0_{3 \times 9}]
 \end{aligned} \tag{7}$$

여기서 $\bar{C}_b^n = I_{3 \times 3}$ 으로 가정하고, 나머지 구성요소는 [16]에서 획득할 수 있다.

이 시스템은 시불변(time-invariant)이므로 다음과 같이 기본 가관측 행렬을 통해 완전 가관측성을 분석한다.

$$\begin{aligned}
 Q &= [H^T \quad (HF)^T \quad \dots \quad (HF^{n-1})^T]^T \\
 &= \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & \bar{f}^n \times & \bar{C}_b^n & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & (\bar{f}^n \times) \bar{\Omega}_2 & 0_{3 \times 3} & -(\bar{f}^n \times) \bar{C}_b^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{8}$$

여기서 가관측 행렬은 행렬계수에 영향을 미치지 않는 열 연산(row manipulation)을 통해 이루어진 것이다.

컴퓨터 시뮬레이션을 통해 이 시스템의 계수가 8이라는 것을 알 수 있다. 따라서 정지상태에서 12차 상태변수는 완전 가관측 하지 않다. 상태변수 중 관측 가능한 상태변수 및 상태변수 조합은 Qx 연산을 통해 다음과 같음을 알 수 있다.

$$\begin{aligned}
 &\delta V_N, \delta V_E, \delta V_D \\
 &g\phi_E + \nabla_x, -g\phi_N + \nabla_y, \nabla_z \\
 &-\Omega_D \phi_N + \Omega_N \phi_D - \varepsilon_y, -\Omega_D \phi_E + \varepsilon_x
 \end{aligned} \tag{9}$$

앞에서 가정한 것과 같이 항법좌표계와 동체좌표계가 일치하는 경우 속도 오차와 Z축 가속도계 바이어스는 추정 가

능하며, Z축 자이로 바이어스는 추정 불가능하다. 나머지 상태변수는 조합으로 가관측하게 된다. 관측 불가능한 상태변수를 분리해 내기 위해 가관측성 정도가 약한 상태변수를 분석한다. 정지상태 정렬 시 상태변수 오차 공분산을 분석해보면 Z축 자세 오차, X축 Y축 가속도계 바이어스, 그리고 Z축 자이로 바이어스의 가관측성 정도가 나쁜 것을 알 수 있다[16]. 따라서 가관측하지 않은 Z축 자이로 바이어스 추정 오차와 가관측성 정도가 나쁜 X축, Y축 가속도계 바이어스와 D축 자세 오차를 상태변수에서 제거하면 (9)에서 8개의 관측 가능한 상태변수를 찾을 수 있다. 즉 정지상태에서 속도 오차(N, E, D), 자세오차(N, E), 가속도계 바이어스(Z), 그리고 자이로 바이어스(X, Y)만 상태변수로 설정하고 필터를 구동하면 8개 상태변수 모두 추정 가능함을 알 수 있다. 그러나 관측 불가능한 가속도계 바이어스에 의하여 자세오차 추정에 오차를 갖게 되며 그 크기는 다음과 같음을 (9)에서 추정할 수 있다.

$$\phi_N = \nabla_y / g, \quad \phi_E = -\nabla_x / g \tag{10}$$

2. 운항 중 GPS 신호 사용 가능

GPS 신호를 사용할 수 있는 구간에서 운항 중 정렬 시 가관측성 분석은 많은 연구 결과가 발표되었다. 차량이 운항하는 중 필터의 시스템은 시변(time-varying)이기 때문에 정지상태에서 수행한 기본 가관측 행렬만으로 상태변수의 완전 가관측성을 분석할 수 없다. 대신 시스템을 시구간 시불변 시스템(piece-wise constant system)으로 모델링하여 TOM(Total Observability Matrix)/SOM(Stripped Observability Matrix)을 사용하여 완전 가관측성을 분석할 수 있다[19]. INS/GPS 시스템은 운항 하면서 운항 방향 및 가감속, 회전 등을 통해 시스템이 점점 완전 가관측하게 된다[12,13]. 그리고 공분산 해석을 통해 운항 궤적에 따른 가관측성 정도의 변화에 대한 연구 결과도 많이 발표되어 있다[12].

그림 2와 3은 운항 중 정렬 시 상태변수 오차 공분산 값을 나타낸 것이다. 이때 운항 궤적은 그림 1과 같다. 그림 2는 GPS 수신기로부터 획득되는 위치정보만 측정치로 사용하는 경우이며 그림 3은 위치와 속도정보를 모두 측정치로 사용

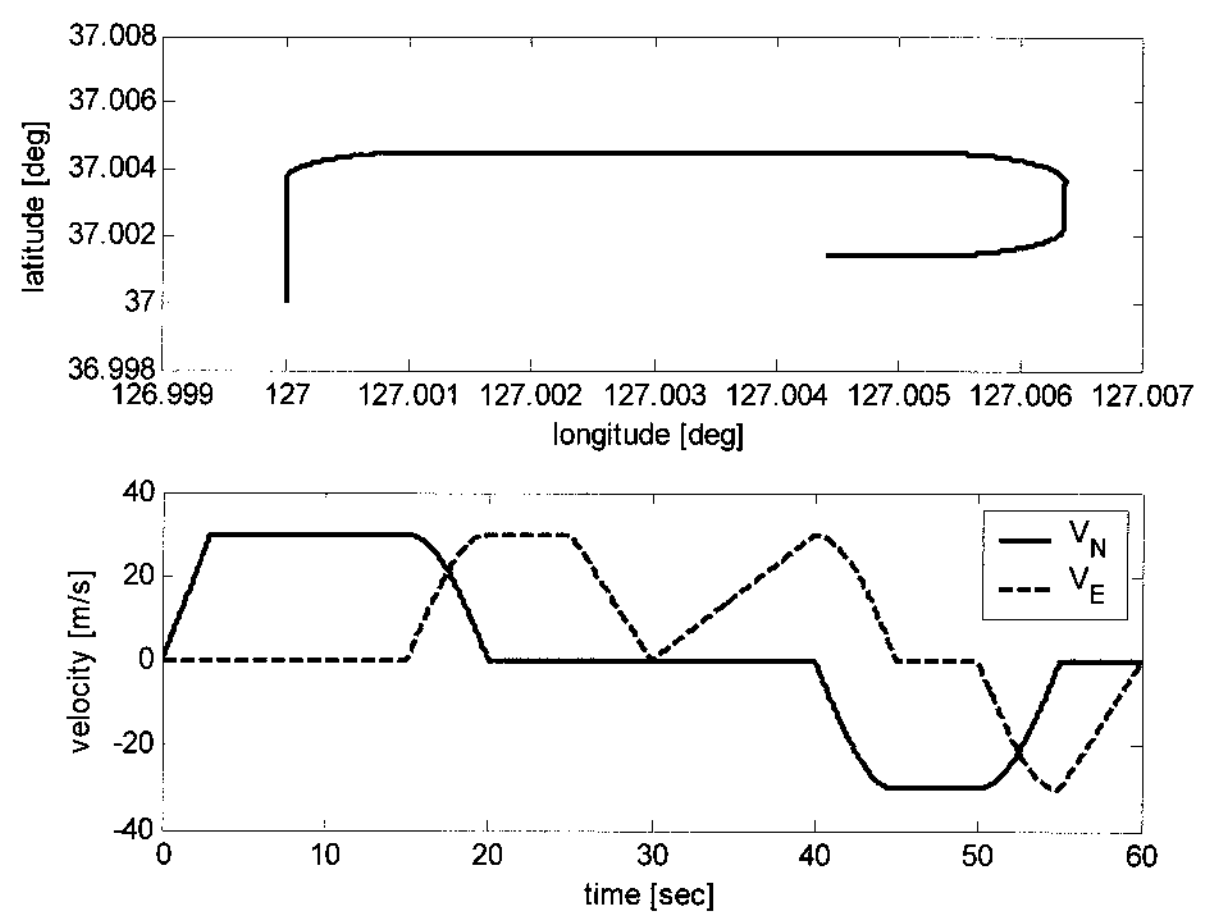
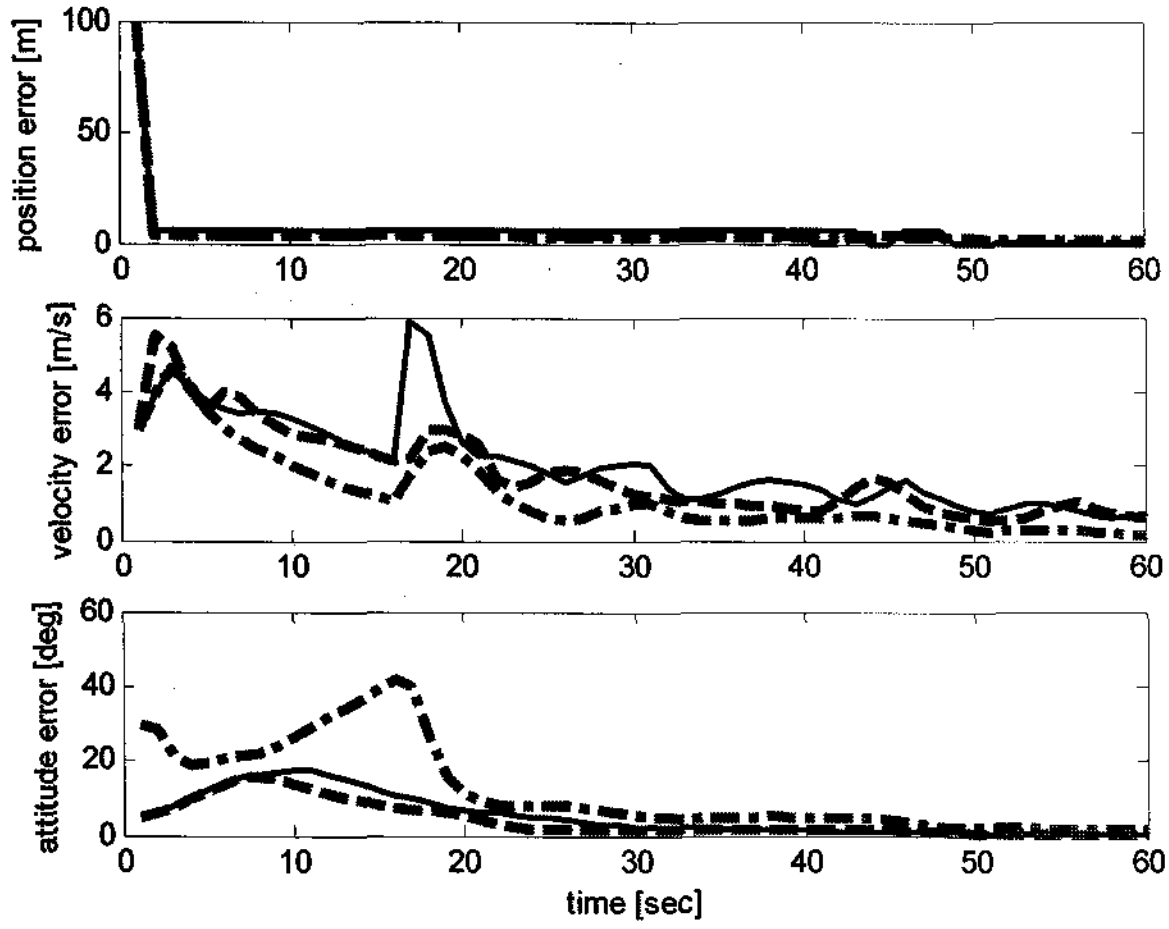
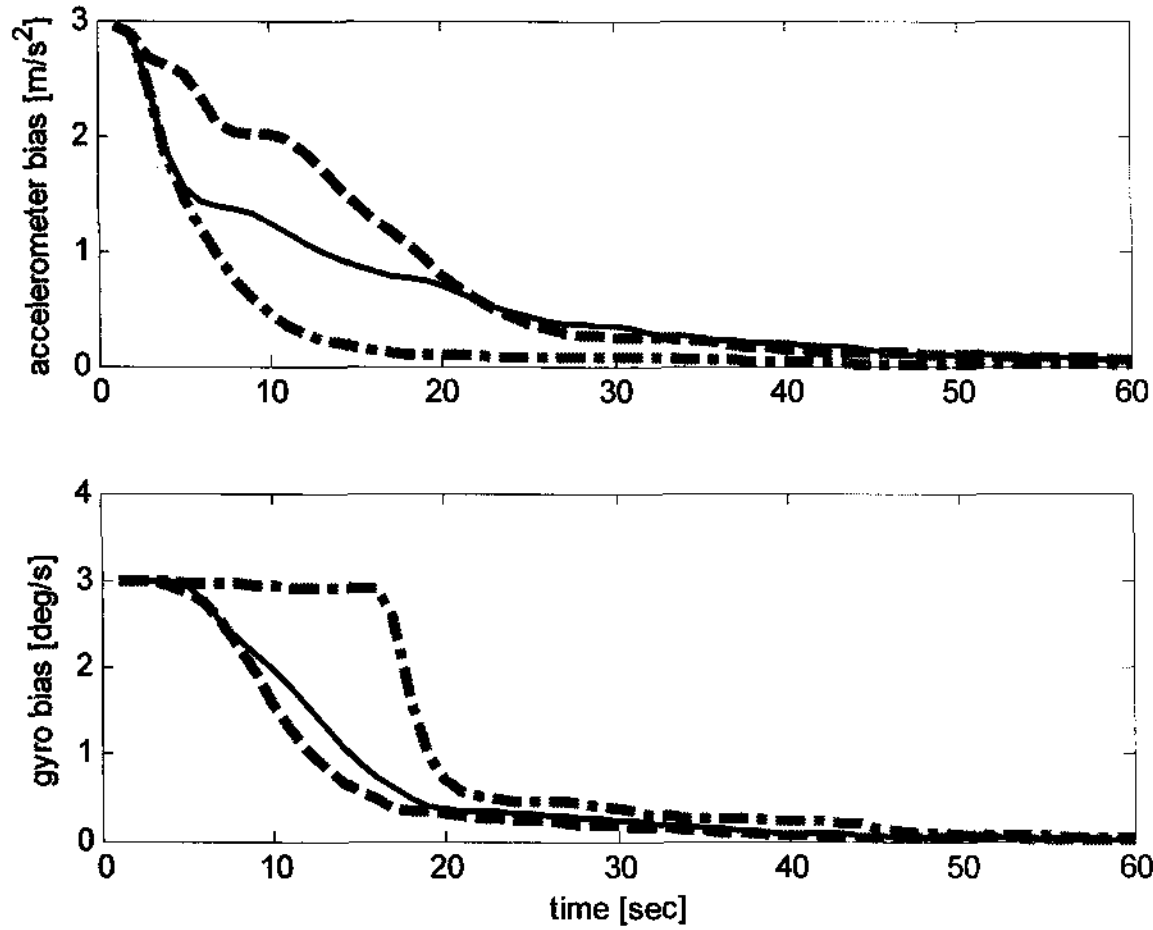


그림 1. 운항 궤적 1.
Fig. 1. Moving trajectory 1.



(a) 위치 오차, 속도 오차, 자세 오차



(b) 센서 바이어스 추정 오차

그림 2. 위치 측정치인 경우 상태변수 오차 공분산.

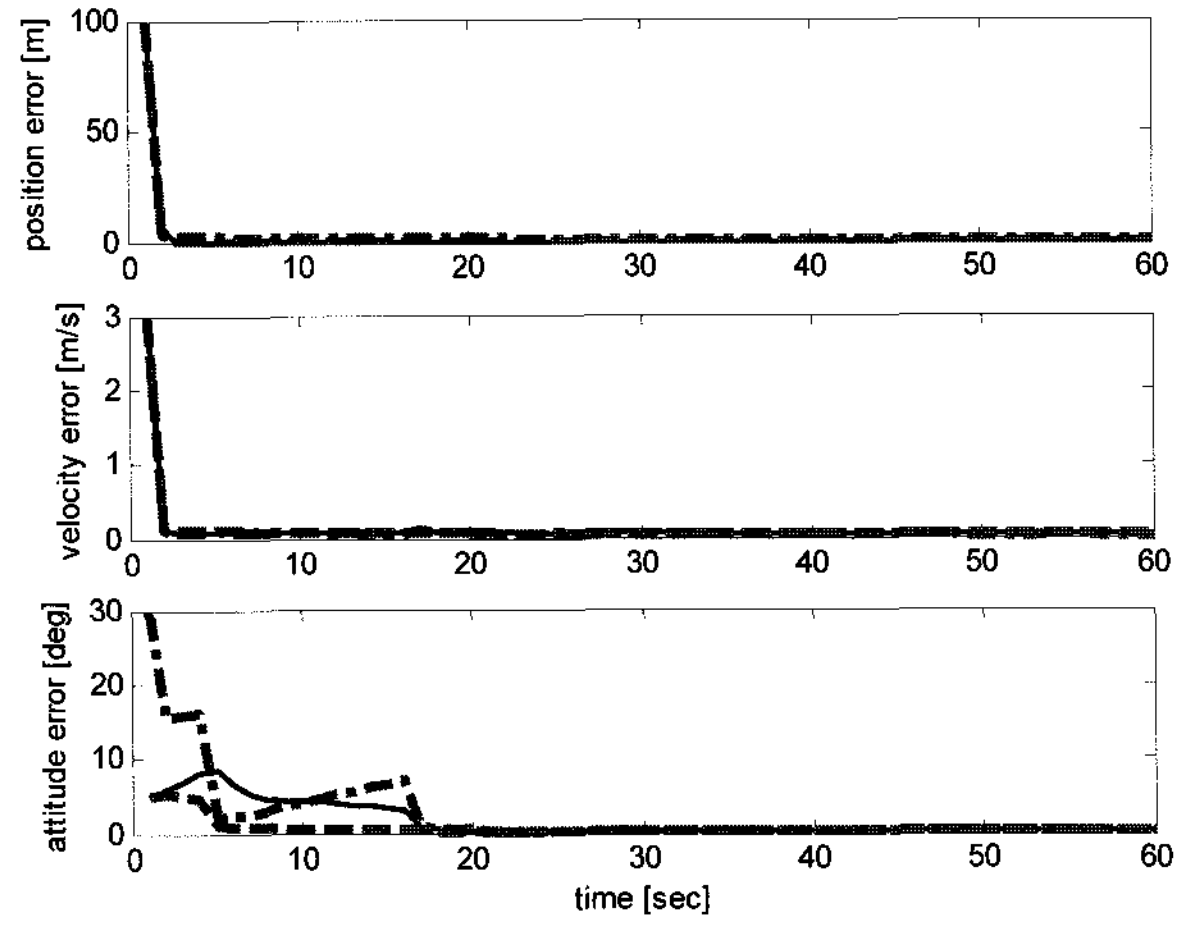
Fig. 2. Error covariance values of the state variables with position measurement (in-flight alignment).

하는 경우이다. 이 결과들을 통해 운항을 하면서 운항 궤적에 따라 점점 상태변수의 가관측성 정도가 향상되는 것을 볼 수 있다.

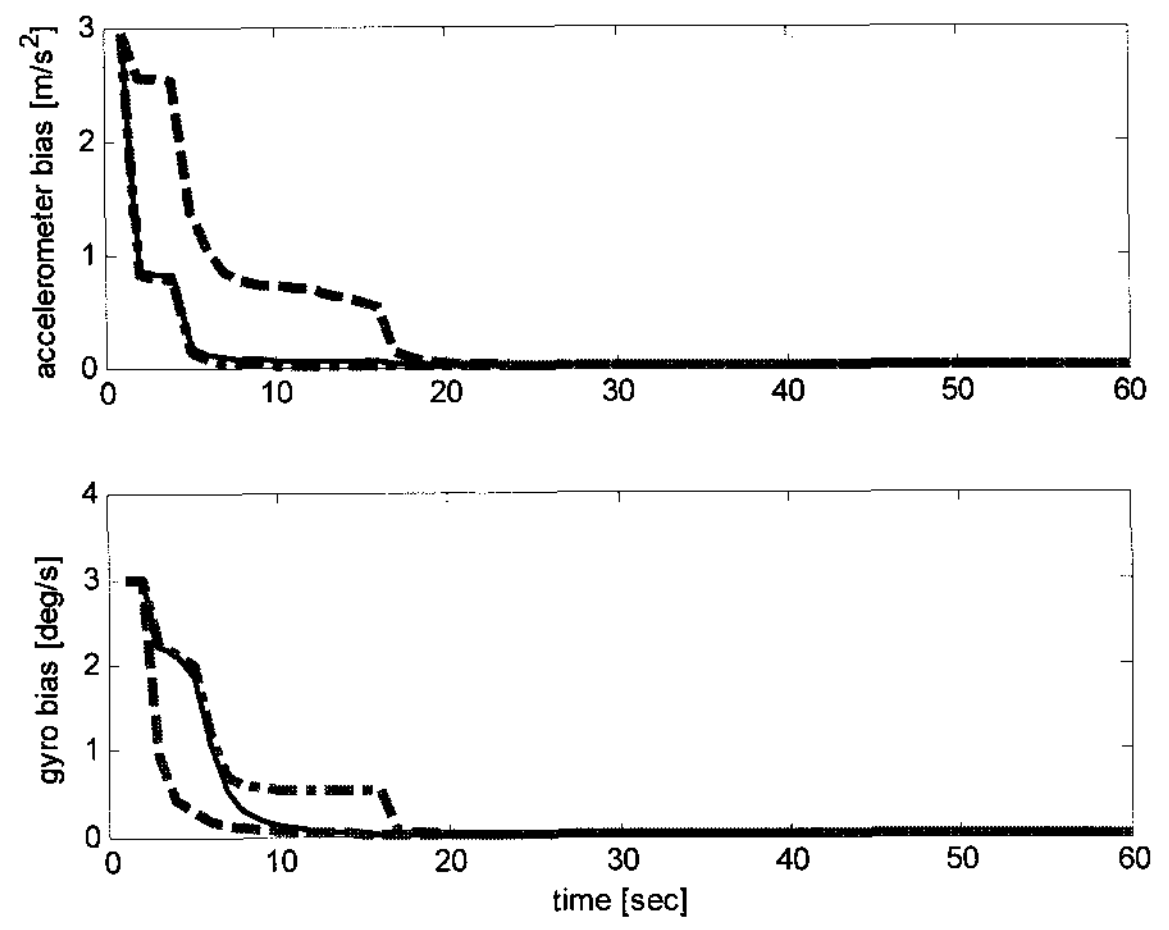
특히 D축 자세 오차와 Z축 자이로 바이어스는 차량이 회전을 하면서 가관측성 정도가 크게 향상되는 것을 알 수 있다. 위치만 측정치로 사용하는 경우 속도 오차의 추정에 다소 불안정한 경향을 보이며 센서 바이어스 추정이 느린 것을 알 수 있다. 이에 반해 위치와 속도를 모두 측정치로 사용하는 경우 상대적으로 빠르게 추정치가 수렴하는 것을 알 수 있다.

3. 운항 중 GPS 신호 사용 불가

차량이 운항 중 GPS 신호를 사용할 수 없는 구간에서는 단독 INS만으로 항법해를 제공하거나 차량의 제한된 움직임을 고려한 CIF를 구동할 수 있다. CIF는 획득할 수 있는 측정치를 사용하여 필터를 구동하므로 단독 INS보다 오차가 작은 항법해를 계산할 수 있다. CIF는 속도 정보를 사용하여 구성된 필터이므로 위치 오차는 관측 가능하지 않다. 따라서 위치 오차를 제외한 12차 오차 모델을 사용하여 가관측성을 분석한다. 이때 측정 행렬은 다음과 같다.



(a) 위치 오차, 속도 오차, 자세 오차



(b) 센서 바이어스 추정 오차

그림 3. 위치/속도 측정치인 경우 상태변수 오차 공분산.

Fig. 3. Error covariance values of the state variables with position/velocity measurement (in-flight alignment).

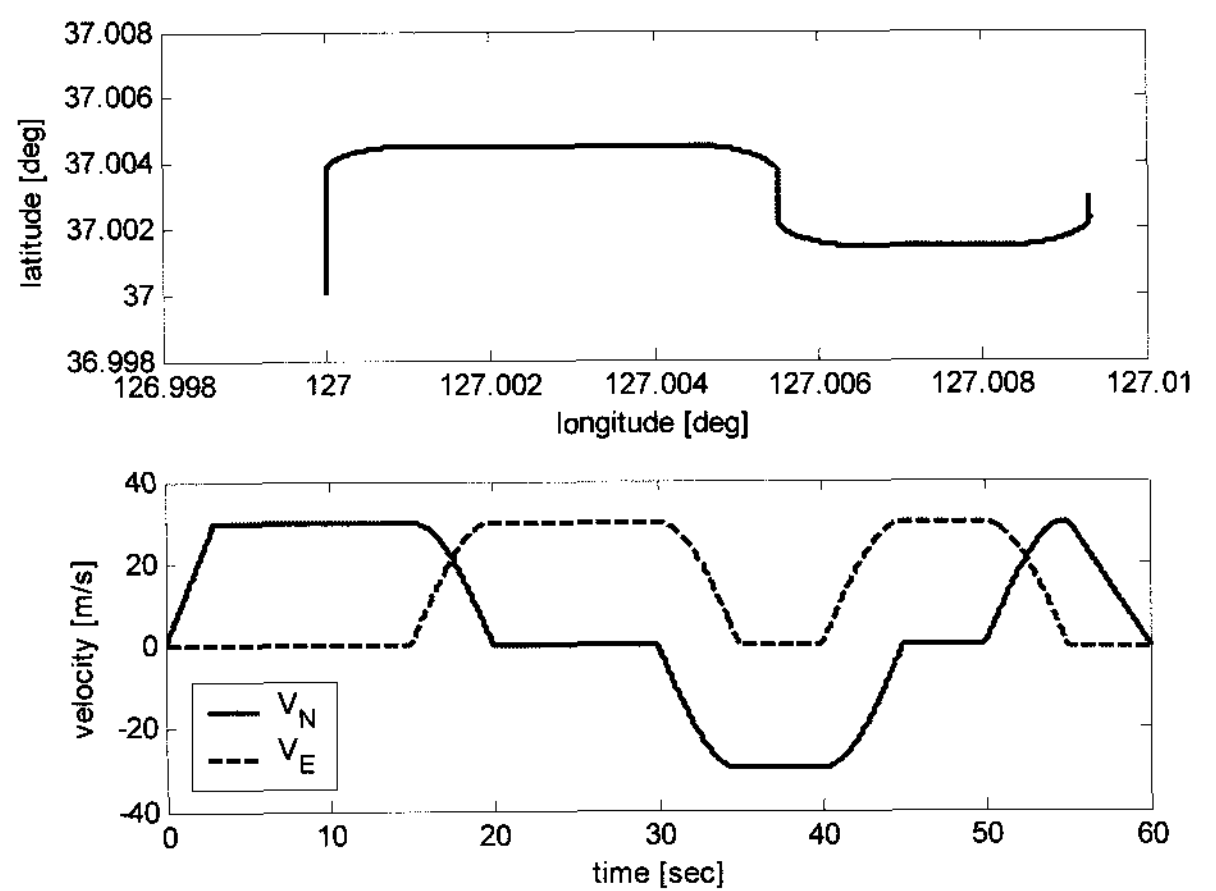


그림 4. 운항 궤적 2.

Fig. 4. Moving trajectory 2.

$$H = \left[(C_b^n)^T \begin{matrix} 2,3,: \\ \vdots \end{matrix} \mid \left(-(C_b^n)^T (V^n \times) \right) \begin{matrix} 2,3,: \\ \vdots \end{matrix} \mid 0_{2 \times 6} \right] \quad (11)$$

CIF에서는 자세 오차가 존재하는 경우 시스템 행렬뿐 아

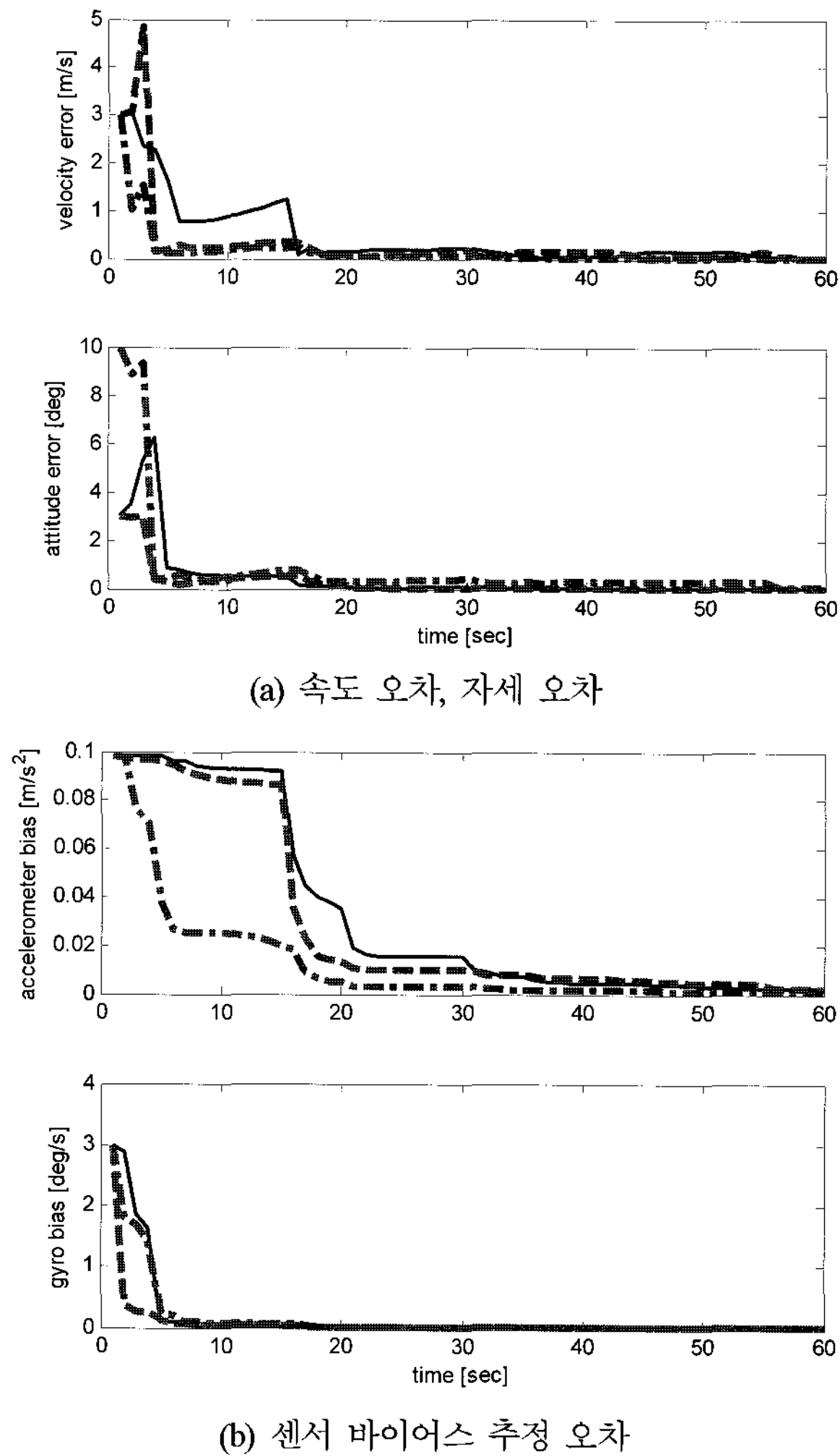


그림 5. 상태변수 오차 공분산 (제한된 INS 필터).
Fig. 5. Error covariance values of the state variables (CIF).

나라 측정행렬, 측정치에도 오차가 발생한다. 그러므로 GPS 신호를 사용할 수 있는 구간에서 자세 오차를 충분히 보상된 후 GPS 신호가 차단되는 구간에서 CIF를 구동하는 것을 가정한다.

먼저 가관측성 정도를 공분산 해석을 통해 분석해 본다. 그림 5는 운항 궤적 2 상에서 CIF의 공분산 값을 나타낸 것이다. 운항 궤적 2에는 가속, 감속, 등속 및 회전 궤적을 포함하고 있다. 이 결과를 통해 운항 중 CIF의 가관측성 정도는 좋은 것을 알 수 있다. X, Y축 가속도계 바이어스는 회전 구간에서 가관측성이 좋아지는 것을 볼 수 있다. 공분산 해석을 통해서는 궤적에 따른 가관측성 정도만 파악할 수 있으며 가관측한 상태변수를 분리해 낼 수는 없다.

완전 가관측성 및 가관측한 상태변수/상태변수 조합 분석을 위한 가관측 행렬 분석은 CIF 측정행렬의 복잡성 때문에 쉽지 않다. 따라서 본 논문에서는 몬테칼로 시뮬레이션을 통해 가관측한 상태변수를 찾아내도록 한다. 그림 6은 운항 궤적 2에서 시뮬레이션 수행 후 추정 오차를 나타낸 것이다. 여기서 실선과 점선은 초기 방위각 오차가 각각 0도와 50도인 경우이다. 그리고 초기 롤, 피치 오차는 모두 1도로 설정하였다. 초기 방위각 오차에 따라 N, E축 속도 오차와 D축

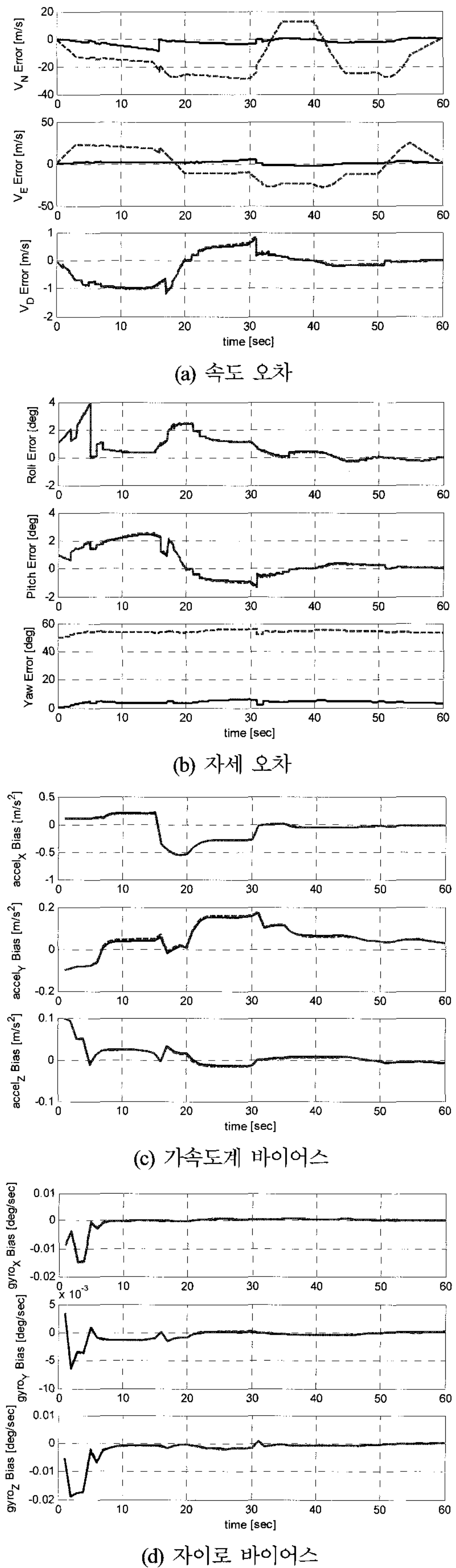


그림 6. 추정 오차 (제한된 INS 필터).
Fig. 6. Estimation error (CIF).

자세 오차는 추정 불가능한 것을 알 수 있다. 그러나 속도 오차의 추정 오차는 각 축과 방위각과의 상관관계가 있다.

다른 상태변수의 추정 오차는 모두 0으로 수렴하는 것을 볼 수 있으므로 관측 가능한 것을 알 수 있다. 특히 2번 이상의 자세 변화 후 오차가 더 작아지는 것은 공분산 해석과 같은 분석 결과를 얻을 수 있다. 그러나 Y축 가속도계 바이어스의 추정 오차는 점점 0으로 수렴 하지만 그 속도가 다른 축에 비해 다소 느린 점을 보인다.

관측 가능한 상태변수는 속도오차(D), 자세오차(N, E), 가속도계 바이어스(X, Y, Z), 그리고 자이로 바이어스(X, Y, Z)이며 이 중에서 자이로 바이어스 외의 상태변수는 2번 이상의 자세 변화 후에 가관측성 정도가 좋아진다. CIF에서 관측 가능하지 않은 속도오차(N, E)와 자세오차(D)를 상태변수에서 제거하는 경우 센서 바이어스 추정과의 상관성에 의하여 필터 전체의 안정성에 문제가 발생한다. 따라서 CIF에서는 부득이 12차 모델을 사용하여야 한다.

IV. 다중 차수 필터

차량 항법은 정지 상태, open sky에서 주행, 터널/도심(dense urban) 지역에서의 주행 등 다양한 환경에서 운행하게 된다. 기존의 차량 항법용 INS/GPS 필터는 주로 2D를 위한 12차 또는 3D를 위한 15차 단일 모델을 사용하여 구동하였다. 이런 경우 특정 상황에서 측정치에 따라 가관측하지 않은 상태변수가 발생하며 이로 인해 전체 필터의 성능에 부정적인 영향을 미치기도 한다. 본 절에서는 앞 절에서 분석된 가관측성을 바탕으로 다중 차수 필터(MDF)를 설계한다. MDF를 위해 4가지 상황(정지상태, 운항 중 GPS 신호 사용 가능, 운항 중 GPS 신호 사용 불가, GPS 신호 사용 불가에서 사용 가능으로 바뀌는 상태)을 설정하고 각 상황에 맞는 필터를 설계한다. 그리고 각 필터를 상황에 따라 운용하는 시나리오를 결정한다.

4가지 상황 중 터널을 지난 후와 같이 GPS 신호 사용 불가에서 사용 가능으로 바뀌는 상태는 차량 항법에서 종종 발생하며, 이 상황에서 두 가지 문제가 발생한다. 첫째는 터널을 지난 후 몇 초간 GPS 수신기에서 GPS 위성 신호를 재획득(reacquisition)하여 계산된 항법해에 큰 오차를 포함하게 되는 것이다. 이 경우 필터 설계 시 설정된 일정 시간 동안 GPS 정보를 사용하지 않음으로써 잘못된 측정치로 인한 필터의 안정성을 떨어뜨리는 경우를 방지할 수 있다. 둘째는 센서 오차 추정에 문제가 발생하는 것이다. GPS 신호를 사용할 수 없는 구간에서 발생한 항법 오차는 다시 GPS 신호를 사용하는 경우 오차 공분산 행렬을 초기화 해서 오차를 추정해야 한다. 그러나 센서 바이어스는 GPS 신호를 사용하지 않는 구간에서 크게 변하지 않으며, N축, E축 자세오차는 그 구간에서도 추정 가능하므로 센서 바이어스와 수평축 자세오차에 해당하는 공분산 값은 초기화 하지 않는 것을 고려해야 한다. 그리고 다른 항법 오차가 0 근처로 수렴하는 몇 초간 센서 바이어스를 추정하지 않음으로써 잘못된 센서 바이어스 추정을 방지해야 한다. 따라서 이 경우 센서 바이어스 추정부분을 제외한 9차 모델을 사용하도록 한다.

그림 7은 필터 구동 방법에 따른 추정 오차를 나타낸 것이

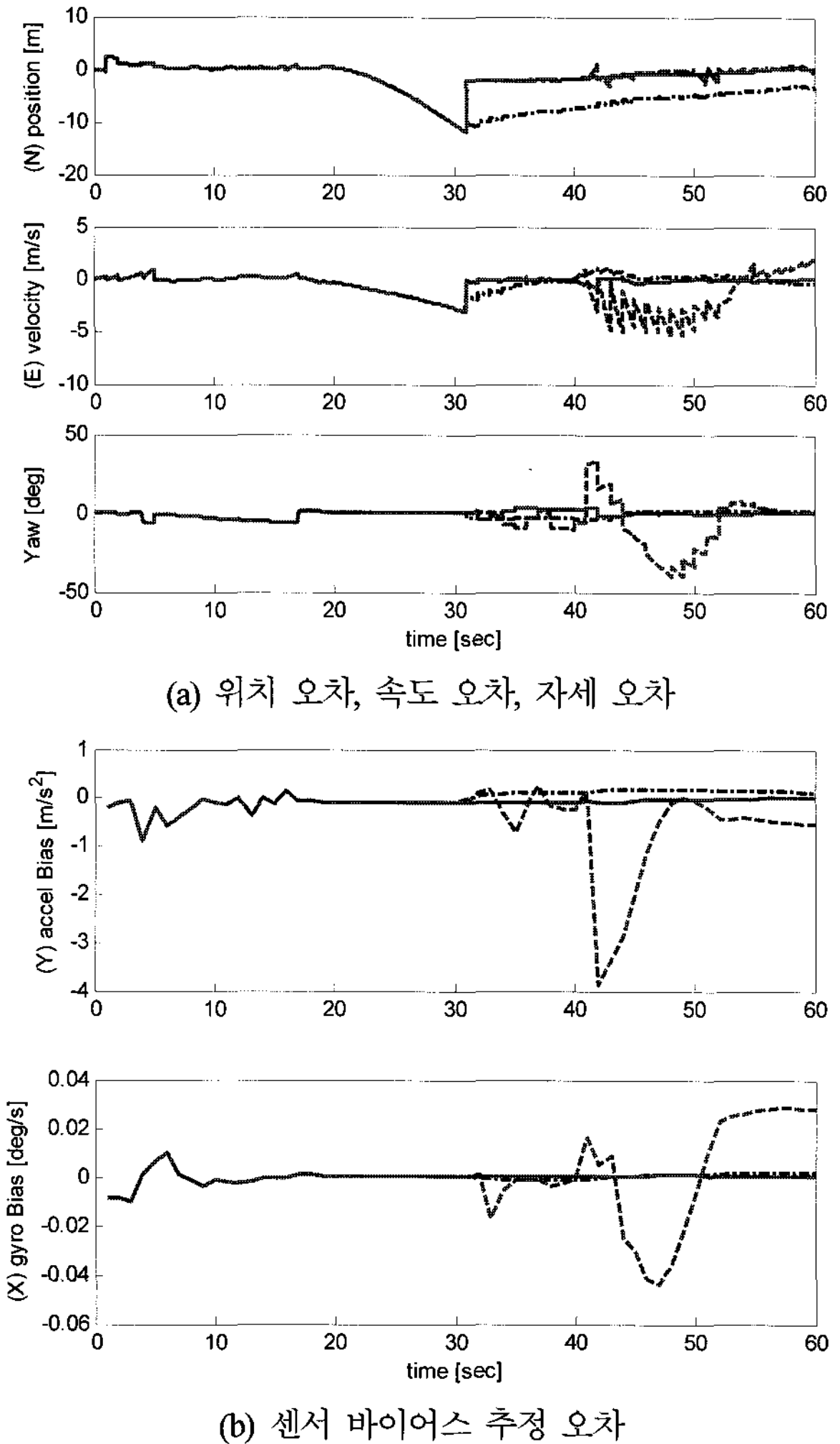


그림 7. 필터 구동 방법에 따른 추정 오차.
Fig. 7. Estimation error according to filter driving method.

다. 구간 [20 30]초 동안 GPS 신호가 차단된 경우를 시뮬레이션 한 것이다. 그림에서 일점쇄선은 GPS 신호가 회복되는 경우 GPS 신호 차단 이전에 사용하다 중단된 필터를 그대로 사용하는 경우(case I)이고, 점선은 GPS 신호가 회복되는 순간 15차 오차 공분산 행렬을 모두 초기화한 경우(case II)이며, 실선은 센서 바이어스와 수평축 자세오차 부분을 제외한 오차 공분산 행렬만 초기화하고 5초 동안 9차 모델을 사용한 경우(case III)이다.

이 그림에서 case I의 경우 GPS 신호가 회복되어도 오차의 수렴 속도가 느린 것을 볼 수 있다. 그 이유는 실제 오차에 비해 오차 공분산의 크기가 작기 때문이다.

Case II의 경우 GPS 신호가 회복된 후 잘못된 센서 바이어스를 추정하는 것을 볼 수 있으며 그 영향이 다른 항법해 추정 성능에도 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 그러나 본 논문에서 제시하는 case III의 경우 GPS 신호가 회복된 경우 빠른 오차 수렴 특성을 보이며 센서 바이어스 또한 안정적으로 추정하는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 초기화된 오차 공분산 행렬을 갖는 9차 모델에서 위치 및 속도, 자세 오차를 빠르게 추정하고, 그 이후 15차 모델을 사용함으로써 좋은 센서 바이어스 추정 성능을 보이기 때문이다.

그림 8은 MDF 운용 시나리오를 나타낸 것이다. 여기서 F1은 정지상태 0속도 보정 8차 필터를 의미하며, F2는 운항 중 GPS 신호를 사용할 수 있는 경우 구동되는 INS/GPS 15차 필터를 의미한다. F3은 GPS 신호 사용 불가 지역에서 사용 가능 지역으로 변하는 곳에서 사용하는 INS/GPS 9차 필터를 의미하며, F4는 GPS 신호를 사용할 수 없는 구간에서 사용하는 12차 CIF를 의미한다. 4개의 다른 차수를 갖는 필터를 구동하기 위해 각 필터의 시스템 행렬과 오차 공분산 행렬은 그림 9와 같이 설정한다. 기본 15차 시스템 행렬에서 그림 9에서 나타낸 영역에 해당하는 부분만을 각 필터를 위한 시스템 행렬로 사용한다. 그리고 오차 공분산 행렬 갱신(update) 및 전파(propagation) 또한 그림 9에서 나타낸 영역에 해당하는 값만을 사용한다. 각 필터가 변경되는 부분에서 오차 공분산 행렬은 재설정 된다. 그림 8에서 FS(Filter Switching)로 나타낸 부분에서 다음과 같이 오차 공분산 행렬의 비대각원소(off-diagonal element)들을 0으로 재설정한다.

$$P^-(i, j) = 0, (i = j = 1, 2, \dots, 15, \text{ and } i \neq j) \quad (12)$$

FS/A 부분에서는 오차 공분산 행렬의 비대각원소를 0으로 재설정하는 것 외에 대각원소 중 수평 자세 오차와 속도에 해당하는 부분을 초기화 한다. 그 이유는 F1에서 수평 가속

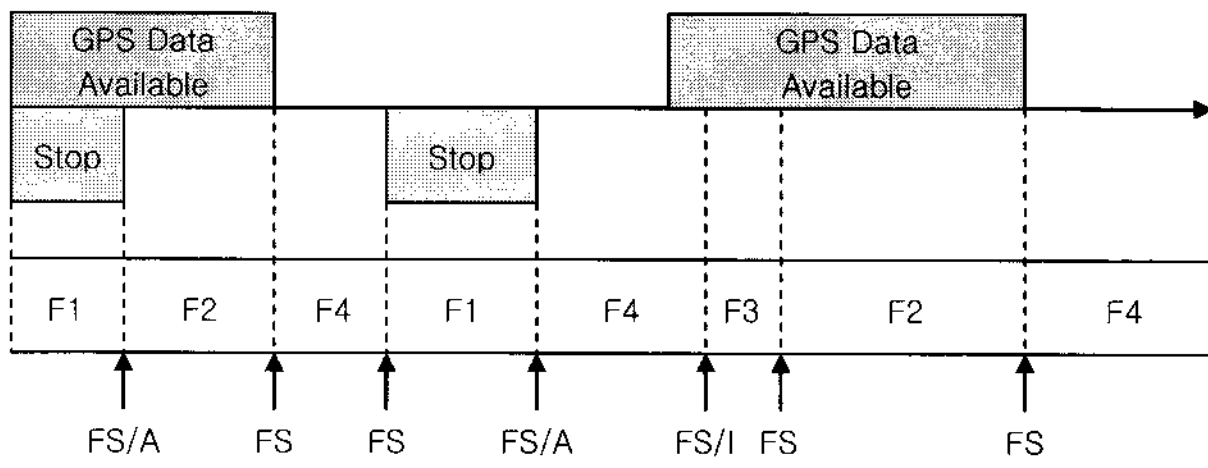


그림 8. 다중 차수 필터 운용 시나리오.

Fig. 8. Scenario for managing of MDF.

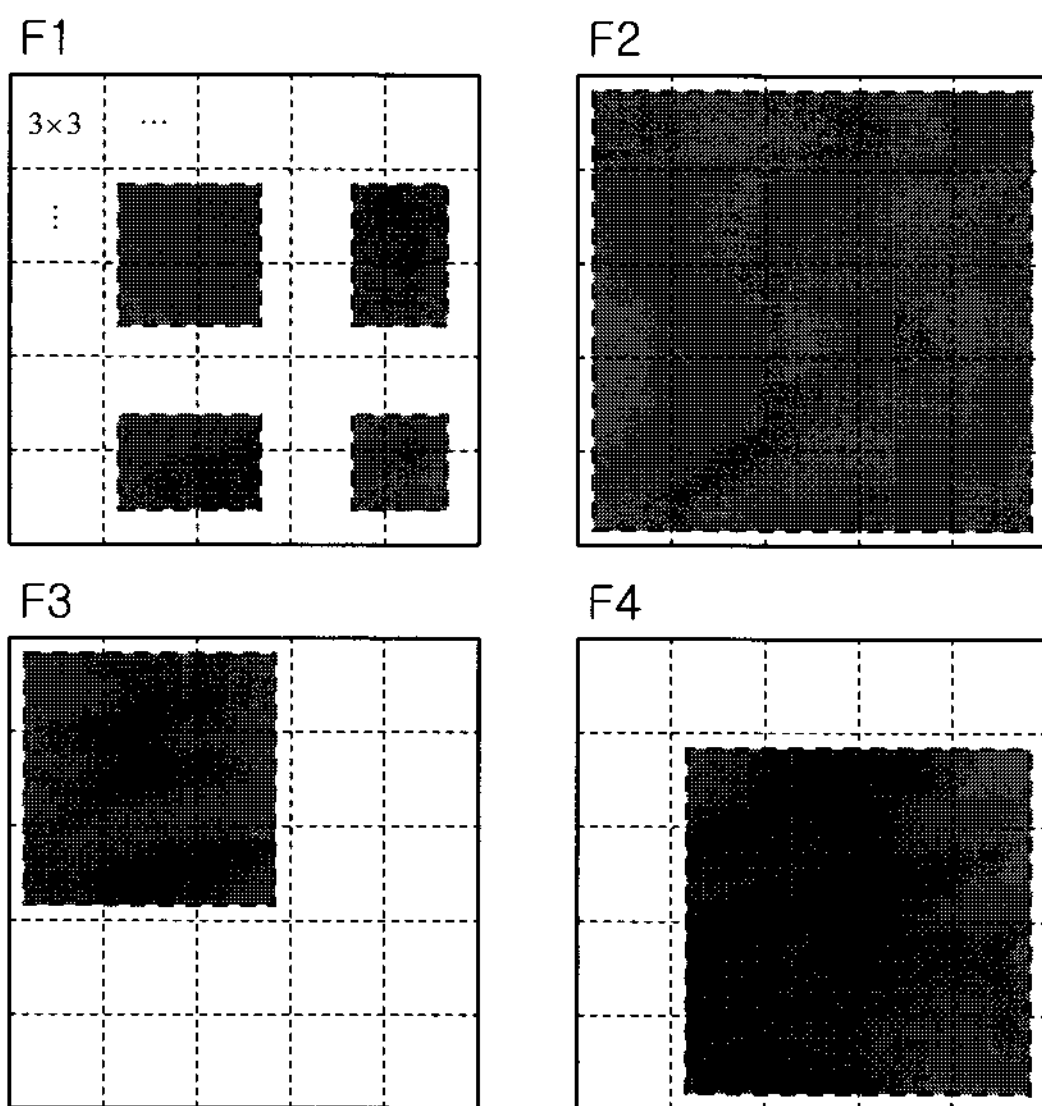


그림 9. 필터에 따른 시스템 행렬 및 오차 공분산 행렬.

Fig. 9. System matrix and error covariance matrix according to filters.

도계 바이어스 추정 오차에 의하여 수평 자세 오차 추정에 영향을 미치기 때문이다. 그리고 F1에서 충분히 작아진 속도 오차 공분산에 의해 F2에서 속도오차 및 가속도계 바이어스 추정에 영향을 미치기 때문이다. FS/I 부분에서는 대각원소 중 위치, 속도, 자세 오차에 해당하는 부분을 초기화 한다.

MDF에서 사용되는 4개의 필터를 정리하면 다음과 같다.

- Filter 1: 0속도 보정 8차 필터

$$x = [\delta V_N \quad \delta V_E \quad \delta V_D \quad \phi_N \quad \phi_E \quad \nabla_z \quad \varepsilon_x \quad \varepsilon_y]^T$$

$$F = \begin{bmatrix} \bar{\Omega}_1 & \hat{f}^n \times & C_b^n(1:3,3) & 0_{3 \times 2} \\ 0_{2 \times 3} & \hat{\Omega}_2 & 0_{2 \times 1} & -C_b^n(1:2,1:2) \\ & & 0_{3 \times 8} & \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$H = [I_{3 \times 3} \quad 0_{3 \times 5}]$$

여기서 $\bar{\Omega}_1$, $\hat{\Omega}_2$, 그리고 \hat{f}^n 는 [16]에서 획득할 수 있다.

- Filter 2: INS/GPS 15차 필터는 (2), (6)과 같다.
- Filter 3: INS/GPS 9차 필터

$$x = [\delta L \quad \delta l \quad \delta h \quad \delta V_N \quad \delta V_E \quad \delta V_D \quad \phi_N \quad \phi_E \quad \phi_D]^T$$

$$F = \begin{bmatrix} F_{pp} & F_{pv} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & \Omega_1 & f^n \times \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & \Omega_2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$H = [I_{6 \times 6} \quad 0_{6 \times 3}]$$

여기서 오차 모델 구성요소는 [21]에서 획득할 수 있다.

- Filter 4: CIF 12차 필터

$$x = [\delta V_N \quad \delta V_E \quad \delta V_D \quad \phi_N \quad \phi_E \quad \phi_D \quad \nabla_x \quad \nabla_y \quad \nabla_z \quad \varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z]^T$$

$$F = \begin{bmatrix} \Omega_1 & f^n \times & C_b^n & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & \Omega_2 & 0_{3 \times 3} & -C_b^n \\ & & 0_{6 \times 12} & \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$H = [(C_b^n)^T_{2,3,:} \quad | \quad (-C_b^n)^T (V^n \times)_{2,3,:} \quad | \quad 0_{2 \times 6}]$$

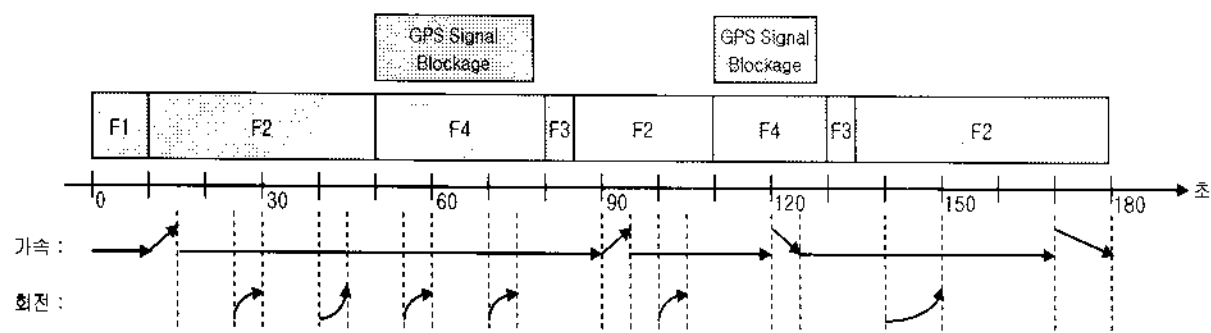
V. 시뮬레이션 결과

제안된 다중 차수 필터를 사용하는 INS/GPS 시스템의 성능을 분석하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 시나리오와 운항 궤적은 그림 10과 같다. 그리고 이 시뮬레이션에서 사용된 관성센서의 사양은 표 1에 나타내었다. 시뮬레이션 틀은 MATLAB을 이용하였으며 GPS 데이터는 toolbox를 사용하여 생성하였다. GPS 오차는 열잡음 외에는 보상된 것으로 가정하였다. IMU 데이터 출력은 50Hz로 하였으며 GPS 데이터 출력은 1Hz로 하였다.

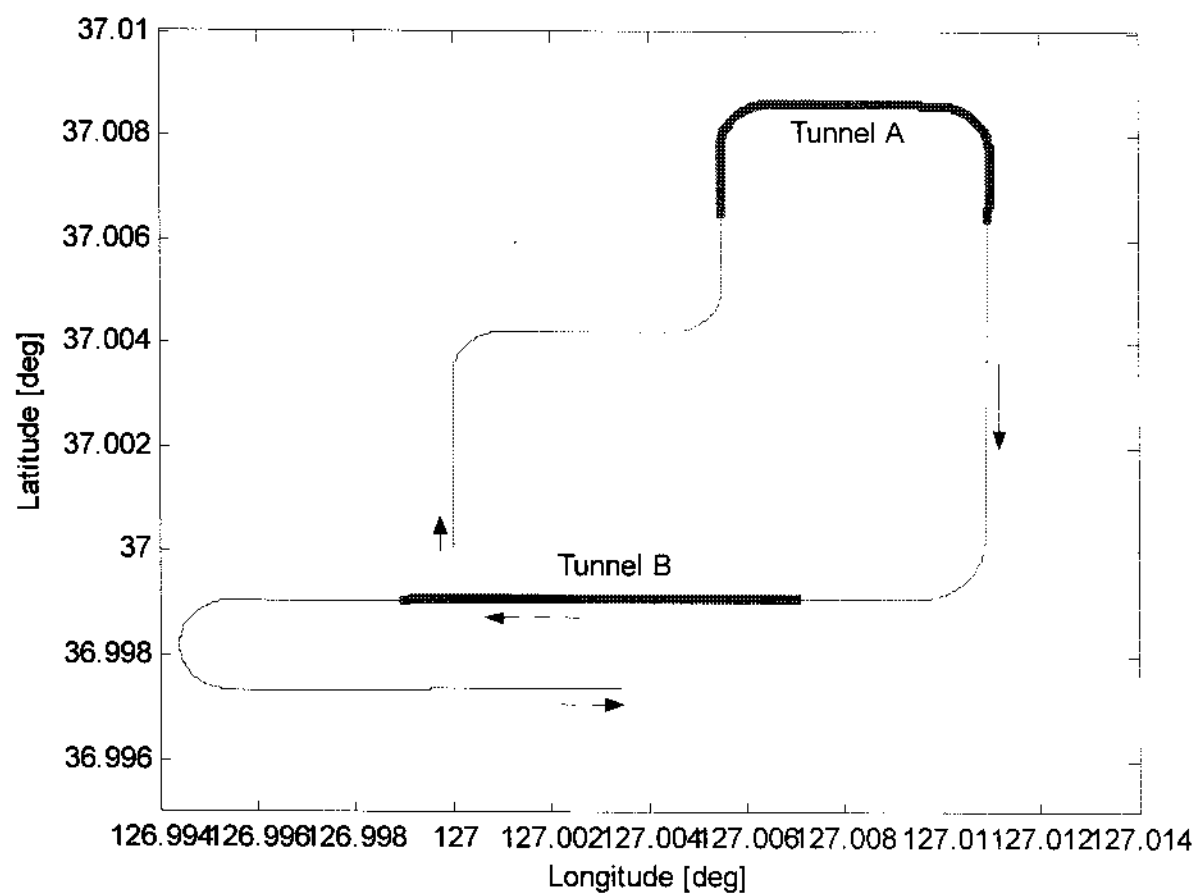
시뮬레이션 결과를 그림 11에 나타내었다. 그림에서 점선은 추정오차의 표준편차를 나타낸 것이며 실선은 추정오차를 나타낸 것이다. 정지상태 보정에서는 X축, Y축 가속도계 바이어스와 Z축 자이로 바이어스, D축 자세 오차는 추정 불가능하며 또한 N축, E축 자세오차는 추정오차를 갖는다. 차가 움직이면서 처음 가속하는 구간 [10 15]과 회전 구간 [25

30]에서는 속도오차 추정오차가 발생하며 이후에 수렴하는 것을 볼 수 있다. X축 가속도계 바이어스는 가속하는 구간에서 가관측성 정도가 향상되어 추정되어 가는 것을 볼 수 있다. Y축 가속도계 바이어스는 회전을 하는 구간에서 원심력이 발생하면서 가관측성 정도가 향상되며 추정 오차가 수렴해 들어가는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 경향을 갖고 N축 자세오차 추정오차도 수렴해 들어간다.

Z축 자이로 바이어스는 회전을 거듭 하면서 점점 가관측성 정도가 좋아지며 오차 또한 수렴해 들어가는 것을 확인할 수 있다. D축 자세오차는 가속하는 구간에서부터 가관측성 정도가 향상되며 이후에는 Z축 자이로 바이어스와 같은 경향을 보이며 점점 수렴하는 것을 볼 수 있다. GPS 신호가 차단되는 구간 [50 80]와 [110 130]에서는 수평축 속도오차와 위치오차가 증가하며 그 현상은 D축 자세오차와 무관하지 않다. GPS 신호가 회복되는 구간에서 INS/GPS 9차 필터를 통해 오차가 빠르게 수렴하는 것을 확인할 수 있다.



(a) 시뮬레이션 시나리오



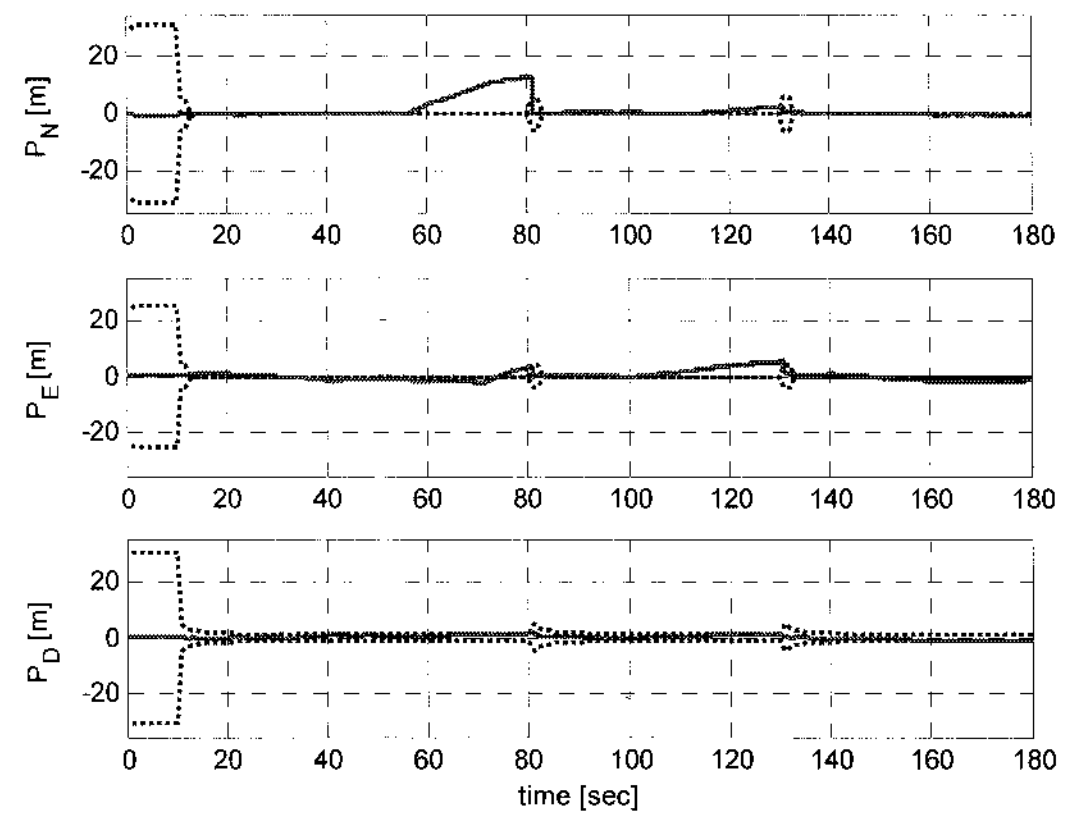
(b) 운항 궤적

그림 10. 시뮬레이션 시나리오 및 궤적.
Fig. 10. Scenario and trajectory for simulation.

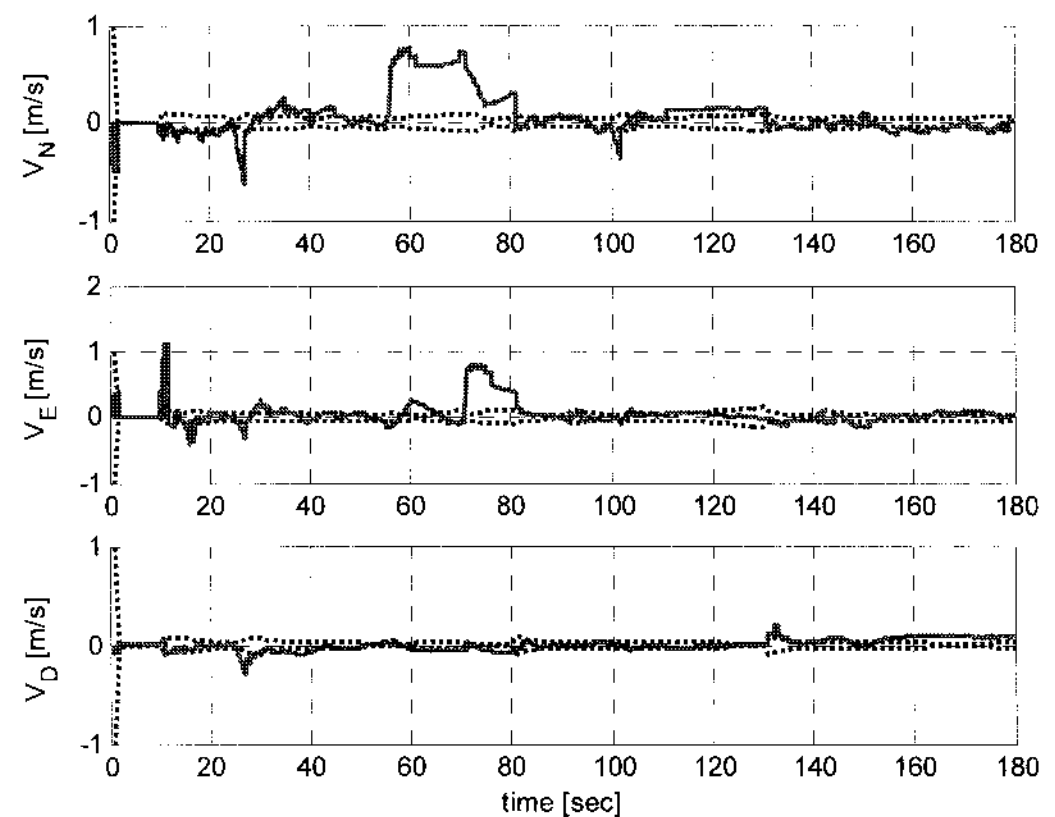
표 1. 관성센서 사양.

Table 1. Spec. of inertial sensors.

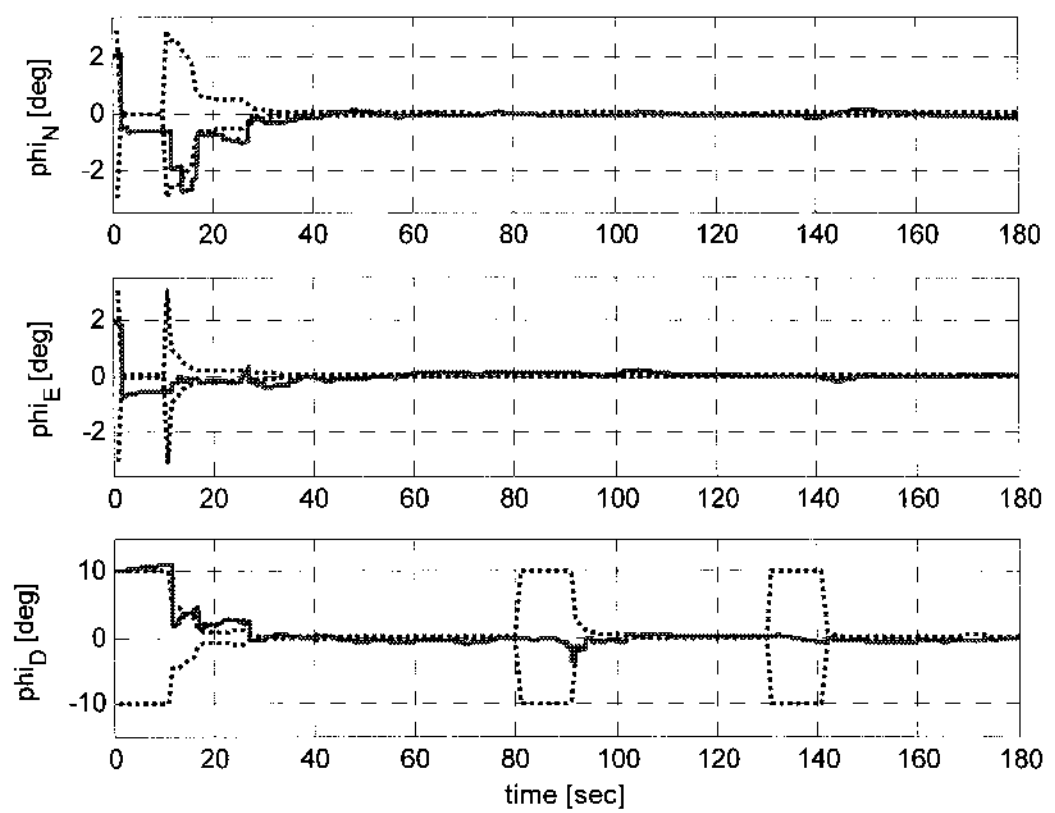
가속도계		자이로	
오차성분	크기	오차성분	크기
백색잡음 [$\mu g/\sqrt{Hz}$]	100	백색잡음 [$deg/s/\sqrt{Hz}$]	0.01
랜덤 바이어스 [mg]	10	랜덤 바이어스 [deg/s]	0.1



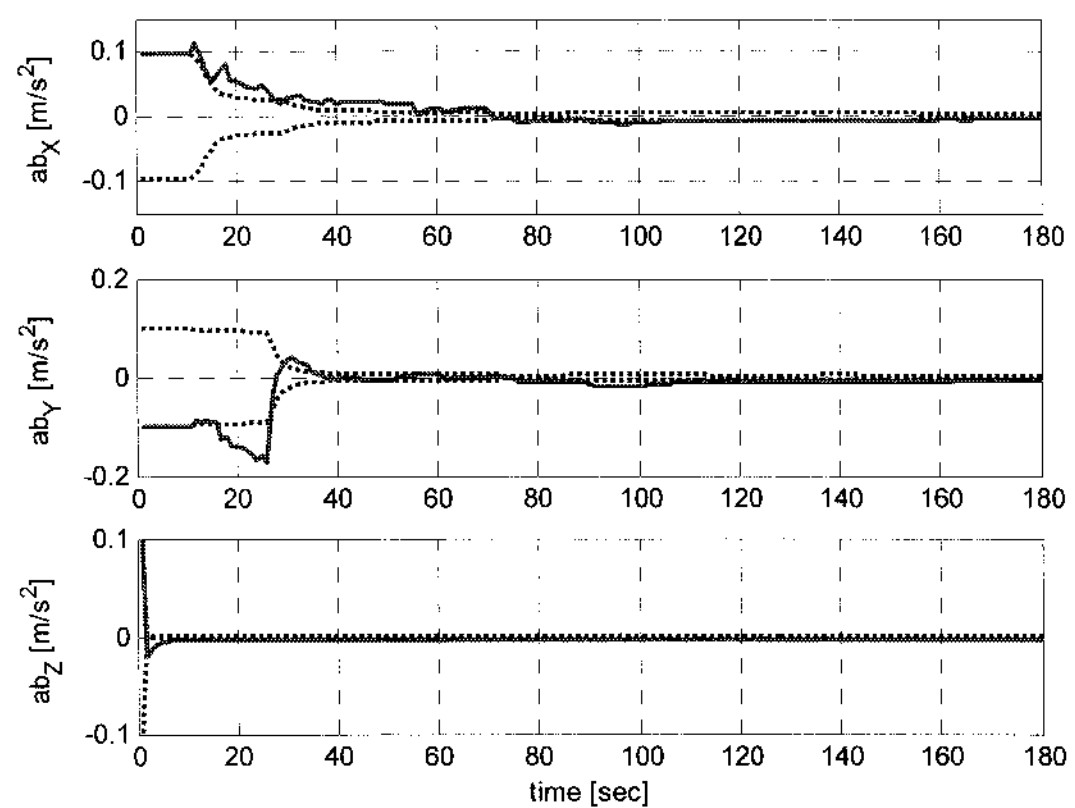
(a) 위치 오차



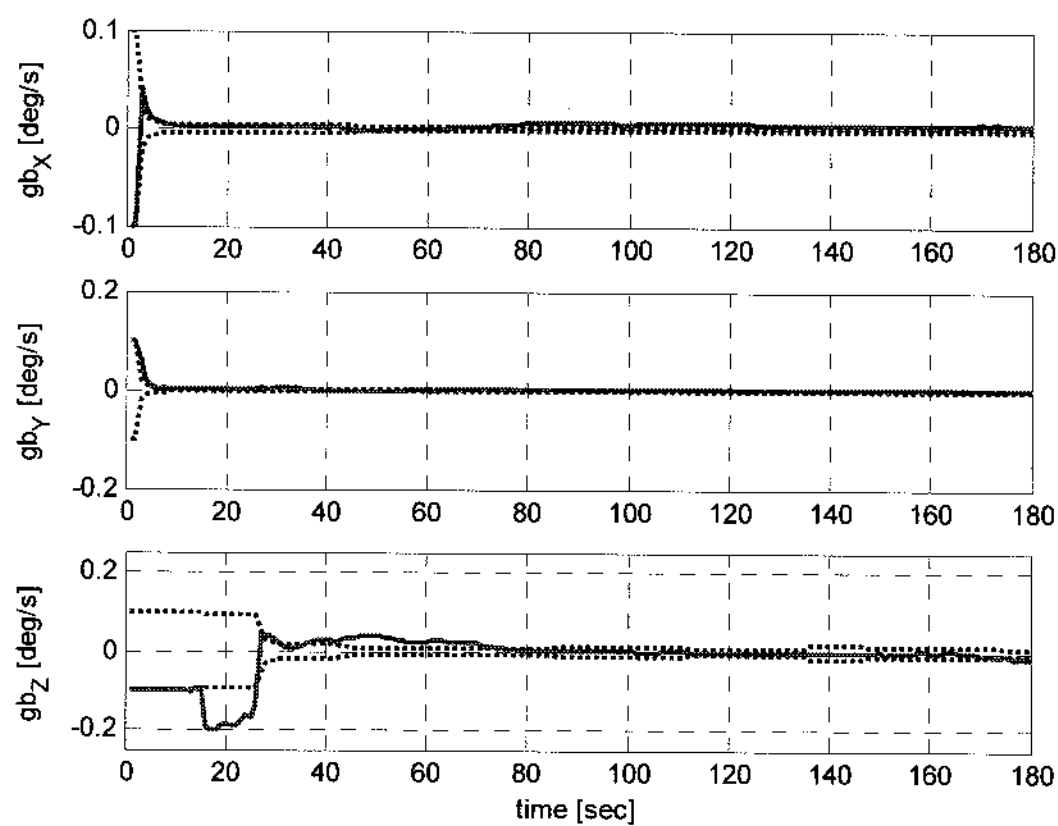
(b) 속도 오차



(c) 자세 오차



(d) 가속도계 바이어스 추정 오차



(e) 자이로 바이어스 추정 오차

그림 11. 시뮬레이션 결과.

Fig. 11. Simulation results.

VI. 결론

본 논문에서는 차량용 INS/GPS 결합시스템의 가관측성을 분석하고, 그 결과를 기반으로 각 상황에 따라 다른 차수의 필터를 설계하며, 각 필터를 통합 관리하는 다중 차수 필터를 설계하였다.

차량의 정지상태에서는 수평축 가속도계 바이어스와 수직축 자세오차 및 자이로 바이어스가 가관측하지 않은 것을 보이며, 이 변수와 위치오차를 제외한 8차 필터를 설계하였다. 차량이 운항하면서 GPS 신호를 사용할 수 있는 구간에서는 모든 상태변수를 포함한 15차 필터를 사용하며, GPS 신호가 차단되는 구간에서는 모든 상태변수의 가관측성 정도는 좋으나 실제 수직축 자세오차 추정이 불가능하므로, 수평축 위치오차와 자세오차 추정이 불가능하다. 그러나 가속도계 바이어스 추정을 위해 위치오차만 제외한 12차 필터를 사용하였다. GPS 신호가 차단된 구간에서 사용 가능한 구간으로 전환되는 경우에는 센서 바이어스 추정 부분을 제외한 9차 필터를 사용하였다. 각 필터가 전환되는 부분에서는 오차 공분산 행렬의 초기화 및 변환 과정을 반드시 거쳐야 한다. 4개의 필터를 각 상황에 맞게 관리하는 다중 차수 필터의 성능을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 제안된 필터를 통해 위성 신호의 On/Off가 빈번한 도심에서 안정된 차량용 항법 정보를 제공할 수 있음을 기대할 수 있다.

참고문헌

- [1] S. Y. Cho and W. S. Choi, "Performance enhancement of low-cost land navigation for location based service," *ETRI Journal*, vol. 28, no. 2, pp. 131-144, Apr., 2006.
- [2] S. Y. Cho and C. G. Park, "MEMS based pedestrian navigation system," *Journal of Navigation*, vol. 59, Issue 1, pp. 135-153, Jan., 2006.
- [3] K. W. Jolodziej and J. Hjelm, *Local Positioning Systems-LBS Applications and Services*, CRC Press, 2006.
- [4] D. H. Titterton and J. L. Weston, *Strapdown Inertial Navigation Technology*, Peter Peregrinus Ltd., 1997.
- [5] S. Nassar, Z. Syed, X. Niu, and N. El-Sheimy, "Improving MEMS IMU/GPS systems for accurate land-based navigation applications," *ION NTM*, Monterey, USA, pp. 18-20, Jan., 2006.

- [6] 조성윤, 최완식, "시그마 포인트 기반 RHKF 필터를 사용한 지상항법용 DR/GPS 결합시스템의 성능 향상," 제어 자동화 시스템공학 논문지, 제 12 권, 제 2 호, pp. 174-185, 2006.
- [7] 김광진, 박찬국, 유명종, 박영범, "INS/GPS 강결합 기법에 대한 EKF와 UKF의 성능 비교," 제어 자동화 시스템공학 논문지, 제 12 권, 제 8 호, pp. 780-188, 2006.
- [8] 조성윤, 김병두, 조영수, 최완식, "INS/GPS를 위한 다중 필터 융합 기법," 한국항공우주학회지, 제 34 권, 제 10 호, pp. 48-55, 2006.
- [9] E. H. Shin and Naser El-Sheimy, "An unscented Kalman filter for in-motion alignment of low-cost IMUs," *Proceedings of the IEEE Frames Conference*, 2004.
- [10] J. A. Farrell and M. Barth, *The Global Positioning System & Inertial Navigation*, McGraw-Hill, 1999.
- [11] I. Y. Bar-Itzhack and N. Berman, "Control theoretic approach to inertial navigation systems," *Journal of Guidance and Control*, vol. 11, no. 3, pp. 237-245, 1998.
- [12] 박준구, "스트랩다운 관성항법 시스템의 운항중 정렬을 위한 궤적에 따른 가관측성 분석," 서울대학교 석사학위논문, 1996.
- [13] D. G. Meskin and I. Y. Bar-Itzhack, "Observability analysis of piece-wise constant systems - part II: Application to inertial navigation in-flight alignment," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. 28, no. 4, pp. 1068-1075, 1992.
- [14] J. G. Lee, C. G. Park, and H. W. Park, "Multiposition alignment of strapdown inertial navigation system," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. 29, no. 4, pp. 1323-1328, 1993.
- [15] Y. F. Jiang and Y. P. Lin, "Error estimation of INS ground alignment through observability analysis," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. 28, no. 1, pp. 92-97, 1992.
- [16] 조성윤, "경사각을 갖는 관성항법시스템 초기 정밀정렬의 오차 분석," 제어 로봇 시스템학회 논문지, 제 14 권, 제 6 호, pp. 595-602, 2008.
- [17] S. Sukkariéh, "Low cost, high integrity, aided inertial navigation systems for autonomous land vehicles," Ph.D. Thesis, The University of Sydney, Australia.
- [18] E. H. Shin, "Accuracy improvement of low cost INS/GPS for land applications," *Master Thesis, The University of Calgary, Canada*, 2001.
- [19] D. G. Meskin and I. Y. Bar-Itzhack, "Observability analysis of piece-wise constant systems - part I: Theory," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. 28, no. 4, pp. 1056-1067, 1992.
- [20] F. M. Ham and R. G. Brown, "Observability eigenvalues, and Kalman filtering," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. 29, no. 4, pp. 269-273, 1993.
- [21] J. W. Seo, H. K. Lee, J. G. Lee, and C. G. Park, "Lever arm compensation for GPS/INS/Odometer integrated system," *IJCAS*, vol. 4, no. 2, pp. 247-254, 2006.

조성윤

제어 자동화 시스템공학 논문지 제 12 권 제 2 호 참조.