

적응 칼만필터를 이용한 고가속 GPS 수신기의 항법정확도 향상

Navigation Accuracy Improvement of High Dynamic GPS Receiver using Adaptive Kalman Filter

이 기 훈* 이 태 규* 송 기 원*
Ki-Hoon Lee Tae-Gyoo Lee Ki-Won Song

Abstract

An adaptive Kalman filter is designed as a post-navigation filter to improve the accuracy of GPS receiver's navigation performance in high dynamic environments. Not only the adaptive Kalman filter reduces the large noise error of navigation data which is obtained by least square method, but also the filter is not degraded as normal Kalman filter in high acceleration movements because the system noise is estimated. Also an initialization structure of the filter is designed in consideration for irregular output condition of navigation data by least squared method such as reacquisition status in GPS receiver. The filter performance is verified by GPS simulator which has the simulation capability of high velocity and acceleration. Finally, a vehicle test including DGPS is executed to conform the real improvement of that filter performance. This filter can be applied to various data measurement systems to improve accuracy in high dynamic conditions besides GPS receiver.

Keywords : GPS(전자구 측위 시스템), Adaptive Kalman Filter(적응 칼만필터), Least Square Method(최소자승법), High Dynamic(고가속)

1. 서론

GPS는 전지구적으로 날씨에 관계없이 매우 정확한 위치, 속도, 시각 등의 항법정보를 제공하는 위성항법 시스템이다. 이러한 GPS의 위성신호를 사용하는 GPS 수신기는 위성과 안테나 사이의 거리정보인 의사거리

(Pseudorange)와 상대속도 정보인 의사거리 변화율 (Pseudorange Rate)을 측정하여 항체의 위치, 속도, 시각을 계산한다^[1,2]. 기존 GPS 수신기에서는 의사거리 및 의사거리 변화율의 측정값으로부터 위치 및 속도를 구하기 위해 최소자승법과 단순한 지역통과 필터를 사용하고 있다. 최소자승법으로 추정된 위치 및 속도는 GPS 위성의 위치오차, 대기권 지연 모델링 오차, 수신기 측정잡음 등의 여러 가지 오차성분을 포함하고 있으므로 지역통과 필터 등을 통해 이러한 오차를 줄이고 있다^[3,4].

† 2008년 11월 25일 접수~2009년 1월 16일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 이기훈(kihoon@add.re.kr)

그러나 GPS 수신기를 장착한 항체가 순간적인 고가속 운동을 할 때 단순한 저역통과 필터 또는 일반적인 Kalman 필터는 항법해의 오차가 커지는 단점을 가진다^{5,6)}. 본 논문에서는 이러한 문제점을 극복하기 위해 적용 Kalman 필터를 설계한 후 시뮬레이터 및 차량시험에 의하여 검증하고 구현함으로써 고가속 GPS 수신기의 항법해 정확도를 향상시켰다.

2. GPS 수신기의 최소자승법 항법해

GPS 수신기는 2만km 상공에 위치한 GPS 위성신호를 수신하여 항체의 위치, 속도, 시각 등의 항법정보를 ECEF(Earth Centered Earth Fixed) 좌표계로 제공하고 있다. GPS 수신기에서는 이러한 항법정보를 구하기 위해서 GPS 위성과 수신기 안테나 사이의 거리에 시각오차 등이 포함된 의사거리와 GPS 위성과 수신기 안테나의 상대속도에 시각오차 변화율 등이 포함된 의사거리 변화율을 측정한다. 의사거리는 수식 (1)과 같이 위성과 수신기의 거리 정보(r)를 나타내는데 위성의 위치오차(δ_{eph}), 이온층 지연(δ_{iono}), 대류권 지연(δ_{trop}), 다중경로(δ_{mp}), 수신기 시계오차(b_{rcv}) 및 측정잡음 오차(ν_{code}) 등을 포함한다. 의사거리 변화율은 수식 (2)와 같이 GPS 위성과 수신기의 상대속도(\dot{r})를 나타내는데 GPS 위성의 속도오차($\dot{\delta}_{eph}$) 등을 포함하고 있으나 다중경로 변화율은 미미하며, 1.57542GHz의 반송파 주파수에서 천이된 도플러 주파수를 의미한다.

$$\rho = r + \delta_{eph} + \delta_{iono} + \delta_{trop} + \delta_{mp} + c \times b_{rcv} + \nu_{code} \quad (1)$$

$$\dot{\rho} = \dot{r} + \dot{\delta}_{eph} + \dot{\delta}_{iono} + \dot{\delta}_{trop} + c \times \dot{b}_{rcv} + \nu_{carrier} \quad (2)$$

여기서, c = 광속

\dot{b}_{rcv} = 수신기 시계오차 변화율

$\nu_{carrier}$ = 의사거리 변화율 측정잡음

최소자승법에 의해 수신기의 위치, 속도, 시각을 계산하기 위해서는 위 수식 (1), (2)를 선형화해야 한다. 먼저 i 번째 위성 측정치 $\rho_i, \dot{\rho}_i$ 에 대한 수식 (1), (2)를 각각 선형화하면 수식 (3), (4)를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta\rho_i &= \rho_c - \rho_o \approx -\frac{x_{sat} - x_o}{\|x_{sat} - x_o\|} \cdot \delta x + \delta b + \epsilon_{code} \\ &= -\vec{1}_i \cdot \delta x + \delta b + \epsilon_{code} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\delta\dot{\rho}_i = \dot{\rho}_i - \dot{x}_{sat} \cdot \vec{1}_i = -\vec{1}_i \cdot \dot{x} + \dot{b} + \epsilon_{carrier} \quad (4)$$

여기서, ρ_c = 기준 정보로 계산한 의사거리

ρ_o = 의사거리 측정치

x_{sat} = 위성 위치

x = 수신기 위치

$\vec{1}_i$ = 위성과 수신기의 시선벡터

ϵ_{code} = 의사거리 측정오차

$\epsilon_{carrier}$ = 의사거리 변화율 측정오차

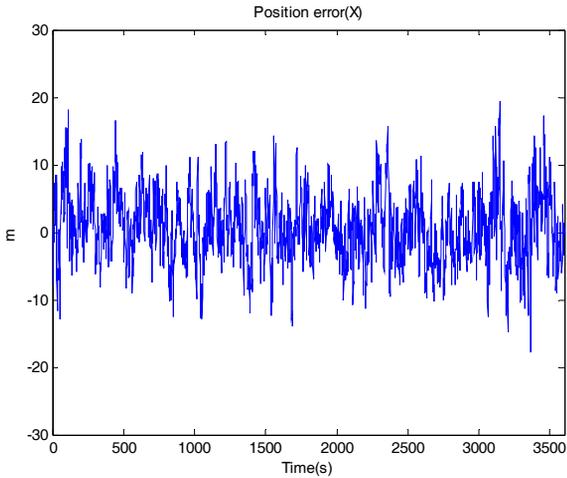
위 수식 (3), (4)와 같은 선형화된 수식은 K개의 GPS 위성의 측정치로부터 최소자승법에 의해 수신기의 위치, 속도, 시각 등의 항법정보를 반복적으로 갱신하는 보정항은 아래 수식 (5), (6)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \delta x \\ \delta b \end{bmatrix} = (G^T G)^{-1} G^T \delta \rho \quad (5)$$

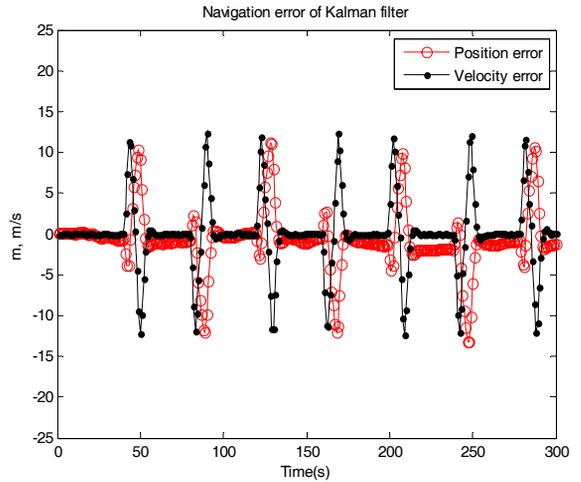
$$\begin{bmatrix} \delta \dot{x} \\ \delta \dot{b} \end{bmatrix} = (G^T G)^{-1} G^T \delta \dot{\rho} \quad (6)$$

여기서, $G = \begin{bmatrix} \vec{1}_1 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ \vec{1}_K & 1 \end{bmatrix}_{K \times 4}$ 인 기하학적 행렬

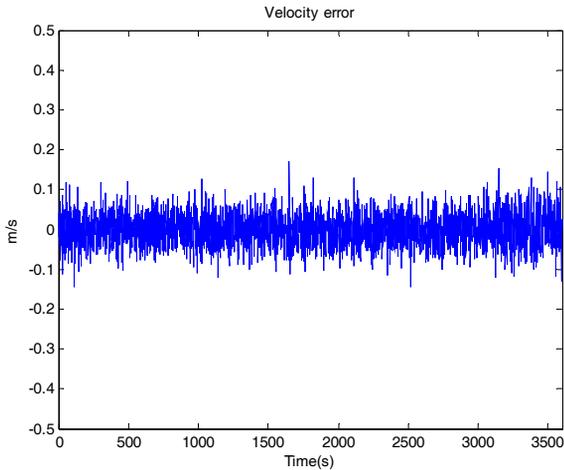
위와같은 최소자승법에 의해 야외 측지점에 설치된 안테나와 GPS 수신기를 이용하여 1시간동안 위치 및 속도 오차를 측정하면 그림 1, 그림 2에 보이듯이 잡음성분의 오차가 크게 포함되어 있다. 최소자승법에 의해 계산된 항법해의 정확도를 향상시키기 위해서 추가적으로 잡음성분 오차를 줄일 수 있는 저역통과 필터나 일반적인 칼만필터를 사용하면 수g 이상의 고가속 운동 시 항법오차가 크게 발생한다. 그림 3은 다음 5장에서 기술할 GPS 시뮬레이터를 이용하여 40 초마다 $\pm 4.5g$ 가속도를 인가할 때 일반적인 9차 칼만 필터의 위치 및 속도 오차를 나타낸 것으로, 가속도 인가 시점에 항법오차가 크게 발생함을 알 수 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 본 논문에서는 최소



[그림 1] 위치오차(X축 방향)



[그림 3] 5g 고가속 운동시 칼만필터 항법오차



[그림 2] 속도오차(X축 방향)

자승법 항법해를 후처리하는 적응 칼만필터를 설계하였다.

3. 적응 칼만필터 설계

일반적으로 GPS 수신기의 위치, 속도는 다음과 같은 이산적인 상태 공간 모델로 나타낼 수 있다.

$$x(k) = \Phi \cdot x(k-1) + w(k-1) \quad (7)$$

$$z(k) = H \cdot x(k) + v(k) \quad (8)$$

- 여기서, $x(k)$: 시스템 상태변수
- Φ : 시스템 천이행렬
- $w(k)$: 시스템 잡음 $\sim (0, Q)$
- $z(k)$: 측정치
- H : 측정 행렬
- $v(k)$: 측정 잡음 $\sim (0, R)$

수식 (7), (8)과 같이 주어진 시스템의 최적 추정인 Kalman 필터는 다음 수식과 같다^(7~10).

$$\hat{x}(k/k-1) = \Phi \cdot \hat{x}(k-1) \quad (9)$$

$$P(k/k-1) = \Phi \cdot P(k-1) \cdot \Phi^T + Q \quad (10)$$

$$K(k) = (P(k/k-1) \cdot H^T) (H \cdot P(k/k-1) \cdot H^T + R)^{-1} \quad (11)$$

$$P(k) = (I - K(k) \cdot H) P(k/k-1) \quad (12)$$

$$\hat{x}(k) = \hat{x}(k/k-1) + K(k)(z(k) - H \cdot \hat{x}(k/k-1)) \quad (13)$$

- 여기서, $\hat{x}(k/k-1)$: $x(k)$ 의 선행(Priori) 추정치
- $\hat{x}(k)$: $x(k)$ 의 추정치
- $P(k/k-1)$: 선행 추정오차의 공분산 행렬
- $P(k)$: 추정오차의 공분산 행렬
- $K(k)$: Kalman 이득

위와같은 Kalman 필터를 사용하여 GPS 수신기의 위치 및 속도의 잡음을 줄일 수 있다. 시스템 상태변수는 고가속 상황을 가정하여 수식 (14)와 같이 ECEF 좌표계의 X, Y, Z축의 위치(p), 속도(v), 가속도(a) 항을 고려한 9차로 설계하였다.

$$x(k) = [p_x \ v_x \ a_x \ p_y \ v_y \ a_y \ p_z \ v_z \ a_z]^T \quad (14)$$

Kalman 필터는 시스템의 동적특성에 대한 정확한 모델링을 요구한다^[11~14]. 그러나 GPS 수신기의 동적특성 요구사항이 정적상태부터 수 g 이상의 고가속 상황일 경우 Kalman 필터는 오차를 유발하게 된다. 본장에서는 이러한 문제점을 극복하기 위해서 아래 그림 4와 같이 시스템 잡음을 추정하여 사용함으로써 동적상황에 대해 적응함으로써 GPS 수신기의 위치 및 속도 정확도를 향상시킬 수 있는 적응형 칼만 필터를 설계하였다. 이러한 적응 칼만필터는 시스템 잡음을 추정하는 과정인 그림 4의 (5)단계가 추가되어 있다.

시스템 잡음 공분산 행렬 Q 를 추정하기 위하여 H_a

및 Z_a 행렬을 수식 (15), (16)과 같이 정의한다.

$$H_a = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \Delta t & 2\Delta t & \dots & n\Delta t \end{bmatrix}^T \quad (15)$$

$$Z_a = [x_v(k-n) \ x_v(k-n+1) \ \dots \ x_v(k)]^T \quad (16)$$

즉 시간간격 Δt 마다 출력되는 최소자승법의 속도 데이터 $x_v(k)$ 의 n 개를 수집하는 행렬들이다. 초기에 위의 데이터를 수집할 수 없는 기간 동안에는 수집된 때까지의 데이터를 이용한다. 위 데이터를 이용하여 최소제곱추정에 의하여 속도 및 가속도 오차를 수식 (17)과 같이 구하고, 가속도 오차의 제곱을 q_a 값으로 수식 (18)과 같이 정의한다.

$$\begin{bmatrix} \bar{x}_a \\ \bar{v}_a \end{bmatrix} = (H_a^T \cdot H_a)^{-1} \cdot H_a^T \cdot Z_a \quad (17)$$

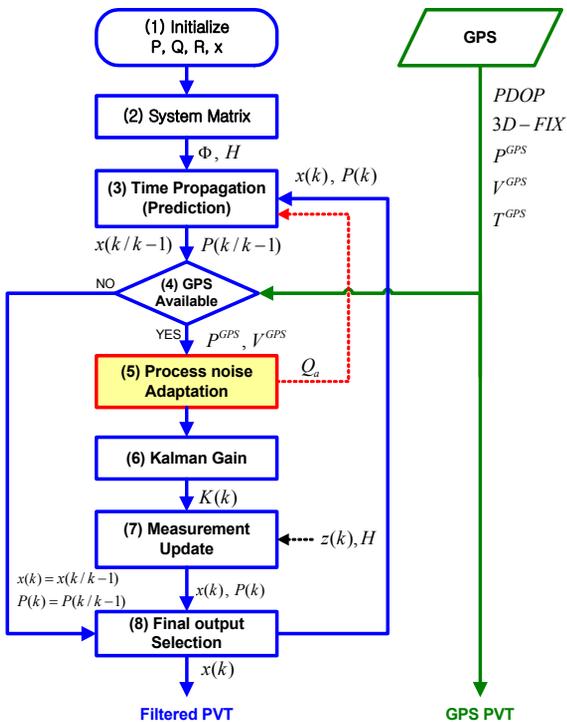
$$q_a = (\bar{v}_a)^2 \quad (18)$$

q_a 는 GPS 수신기의 위치 및 속도 데이터의 동적특성에 대한 공분산으로 데이터 수집시간 n 은 GPS 수신기의 성능에 관계된다. 정밀한 GPS 수신기일수록 n 을 크게 설계할 수 있다. 본 논문에서는 실험적인 결과에 의해 $n=2$ 로 정하였다. 이러한 q_a 는 시스템 잡음의 공분산 행렬을 추정한 Q_a 를 계산하는데 사용되며 수식 (19)와 같다.

$$Q_a = \begin{bmatrix} \frac{q_a \Delta t^5}{5} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{q_a \Delta t^3}{3} & 0 \\ 0 & 0 & q_a \Delta t \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}_{9 \times 9} \quad (19)$$

한편, Kalman 필터의 안정성을 위해 Q_a 의 q_a 는 시스템 동적특성 최대오차를 고려하여 특정값 이하로 제한시키는 다음의 조건이 필요하다.

$$q_a = \begin{cases} \epsilon & , |q_a| \geq \epsilon \\ (\bar{v}_a)^2 & , |q_a| < \epsilon \end{cases} \quad (20)$$

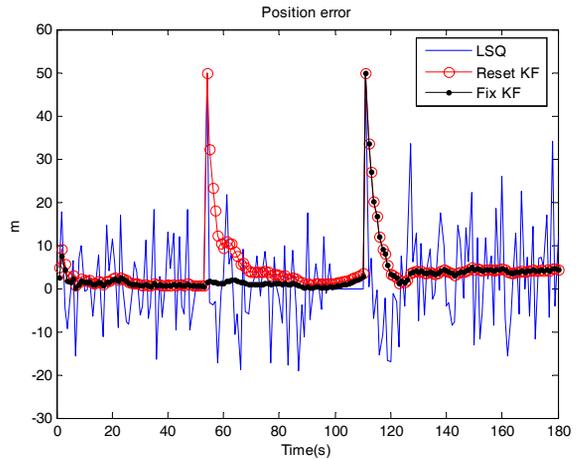


[그림 4] 적응 칼만필터 흐름도

4. GPS 상태를 고려한 칼만필터 구조

본 논문에서 설계한 Kalman 필터는 1초 간격으로 측정치를 얻어 상태변수를 최적 추정하기 때문에 GPS 수신기에서 1Hz의 연속적인 최소자승법 해가 필요하다. 그러나 GPS 수신기의 운용상황은 수시로 터널이나 건물 및 숲 등에 의해 위성신호 추적이 방해받아 최소자승법 항법해를 계산할 수 없는 위치재획득(Reacquisition) 상황이 발생한다. 따라서 Kalman 필터는 이를 고려하여 오차 공분산 행렬이나 시스템 상태변수에 대한 초기화 실행여부를 판단해야 한다.

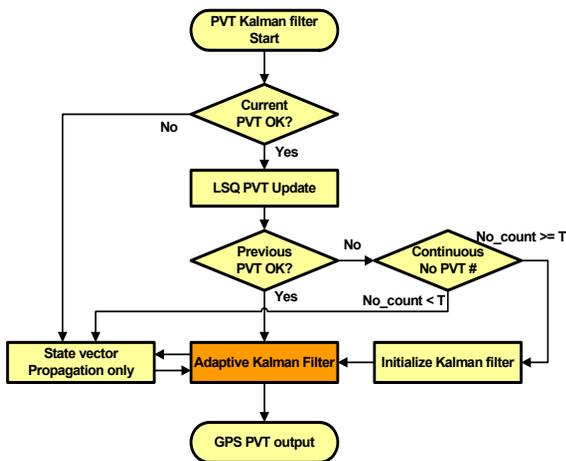
또한 GPS 수신기는 위치재획득 상황이 발생할 때 측정치 없이 추정한 위치 및 속도를 사용하여 GPS 위성에 대한 검색이나 재획득한 위치 및 속도의 무결성 검사 등을 수행하므로 위치 및 속도 추정시간에 대한 제한이 필요하다. 본 논문에서는 이러한 GPS 수신기의 항법해 상태에 따라 Kalman 필터를 초기화하는 구조로서 그림 5와 같이 설계하였다. 즉 GPS 수신기의 현재 최소자승법 항법해(Current PVT)가 존재하지 않으면 기존 위치, 속도, 가속도 상태변수로써 시간적인 갱신과정을 수행한다. 이후 위치 및 속도 측정치가 재획득되면 연속적으로 항법해가 존재하지 않는 시간(No-count)이 특정시간(T, 본 논문에서는 5초)보다 크면 Kalman 필터를 초기화하는 구조로서, 특정시간보다 작으면 수렴한 공분산 행렬과 상태변수를 사용하므로 위치 및 속도 오차를 줄일 수 있다. 이러한 구조는 GPS 수신기의 위치재획득시 최소자승법 항법해의 오차가 큰 경우가 자주 발생하기 때문에, 수초 정



[그림 6] 초기화 구조의 효과

도의 짧은 순간 후 위치재획득시 수렴한 상태변수를 사용함으로써 큰 오차를 줄이는 장점이 있다.

위와같은 Kalman 필터 초기화 구조의 장점을 검증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 6은 위치오차 10m(1σ) 및 속도오차 0.1m/s(1σ)일 때, 50초에 4초 동안 항법해가 없고 100초에 10초 동안 항법해가 없는 경우이다. 항법해가 없는 순간마다 추정오차 공분산 행렬 P(k)를 초기화하는 Kalman 필터(그림 6에서 Reset KF)의 경우 기준시각 55초에 위치재획득시 가정한 큰 위치오차(50m)로 인해 큰 추정오차를 가진다. 이에 비해 본 논문에서 설계한 Kalman 필터(그림 6에서 Fix KF)의 경우 추정된 오차 공분산 행렬 P(k)를 사용하기 때문에 작은 오차를 가진다. 그러나 기준시각 111초의 위치재획득시 항법해가 존재치 않는 시간이 길기 때문에 기존의 오차 공분산 및 상태변수의 오차가 크다고 판정하여 Kalman 필터를 초기화하였음을 알 수 있다.



[그림 5] 칼만필터 초기화 구조

5. 고가속 시뮬레이션

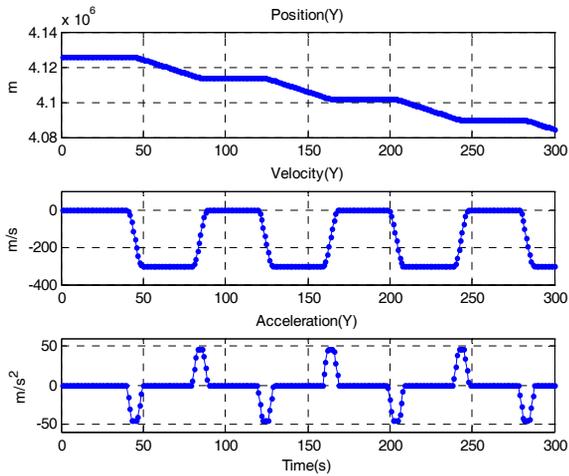
본 논문에서 설계한 적응 Kalman 필터의 성능을 검증하기 위해 고가속 운용환경을 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션은 적응 Kalman 필터가 구현된 GPS 수신기와, 고속/고가속 등의 다양한 동적 운용환경에 대한 시뮬레이션이 가능한 SPIRENT사의 STR4760 시뮬레이터를 사용하였다. 동적 운용환경은 남쪽으로 6g의 가속 및 감속을 반복한 동적 상황으로 설정하였다. 이

때 Kalman 필터는 ECEF 좌표계 상의 항법데이터로 수행되므로 가장 큰 가속도 상황이 입력되는 Y축 상의 데이터를 분석하였다.

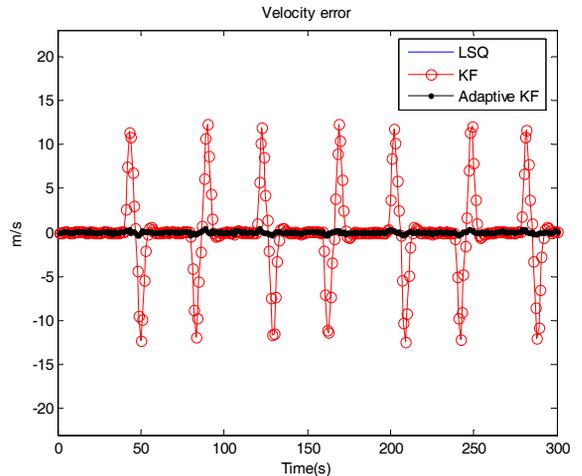
ECEF 좌표계의 Y축 위치, 속도, 가속도는 그림 7과 같으며, 300초 동안의 시뮬레이션 기간에 총 7번의 $\pm 4.5g$ 가속도 상황이 발생하였다. 이때의 최소자승법 항법해, 일반적 Kalman 필터, 적용 Kalman 필터의 항법해 오차는 그림 8, 9, 10, 11과 같다. 위치오차를 분석한 결과 예상대로 최소자승법의 위치(그림 8의 LSQ)는 잡음성분이 컸으며, 이를 줄이기 위해 Kalman 필터(그림 8의 KF)를 적용하면 가속도가 없는 상황에서 위치오차를 줄일 수 있으나 가속도가 발생하는 구

간에서 오차가 커짐을 알 수 있다. 본 논문에서 설계 적용 Kalman 필터(그림 8의 Adaptive KF)를 사용하면 정적인 상태뿐만 아니라 가속도 상황에서도 위치오차가 커지지 않음을 알 수 있다.

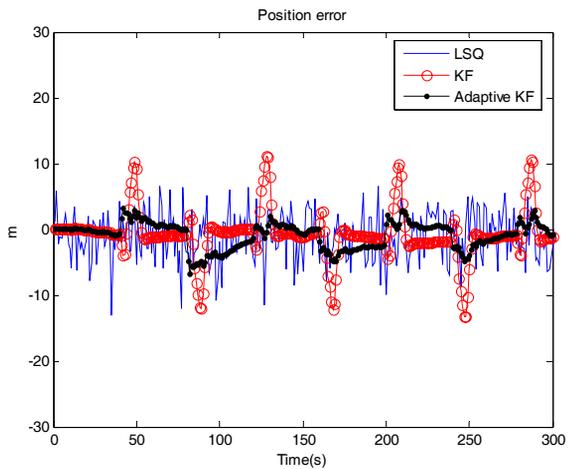
그리고 속도오차를 분석하면 그림 9 및 이를 확대한 그림 10과 같이 Kalman 필터는 자체적인 속도규격인 $0.2m/s$ 를 초과한 매우 큰 속도오차가 가속도 구간에서 발생한다. 이에 비해 적용 Kalman 필터는 최소자승법 해와 유사한 결과를 보인다. 통계적으로 RMS (Root Mean Square) 오차를 구하면 표 1과 같이 적용 Kalman 필터를 사용함으로써 고가속 운용환경에서도 항법오차를 줄일 수 있다. 한편 그림 11과 같이 적용



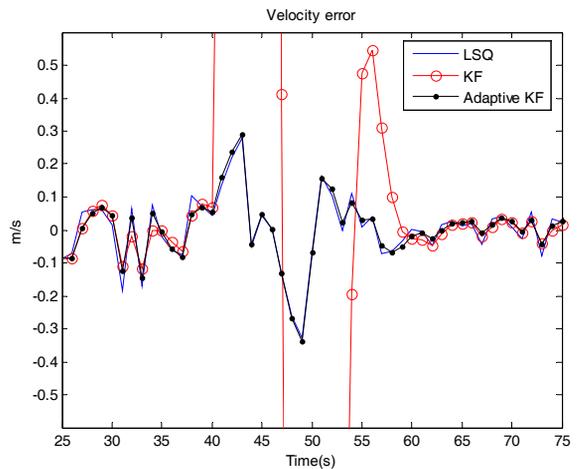
[그림 7] 시뮬레이션 궤적



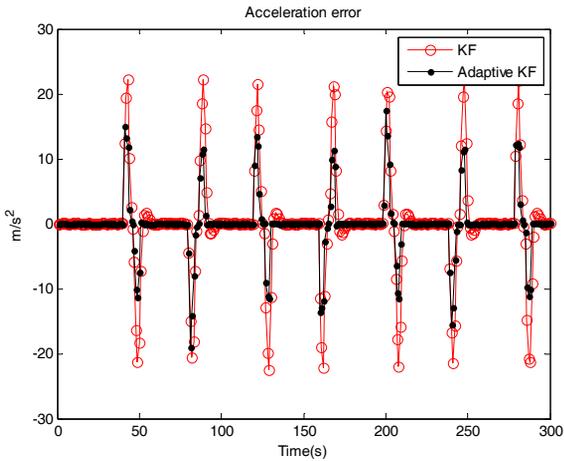
[그림 9] 속도오차



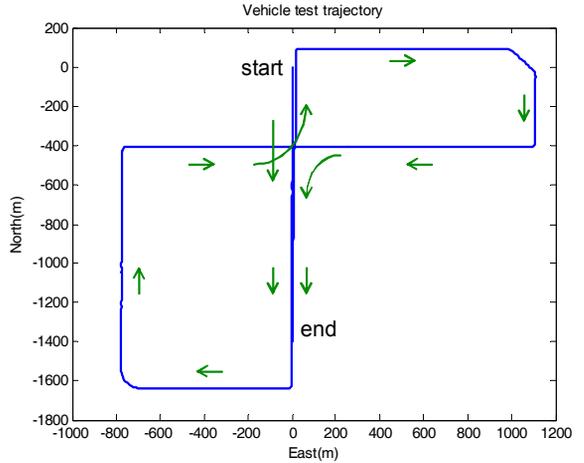
[그림 8] 위치오차



[그림 10] 속도오차 확대



[그림 11] 가속도오차(LSQ는 가속도와 무관함)



[그림 12] 차량시험 경로

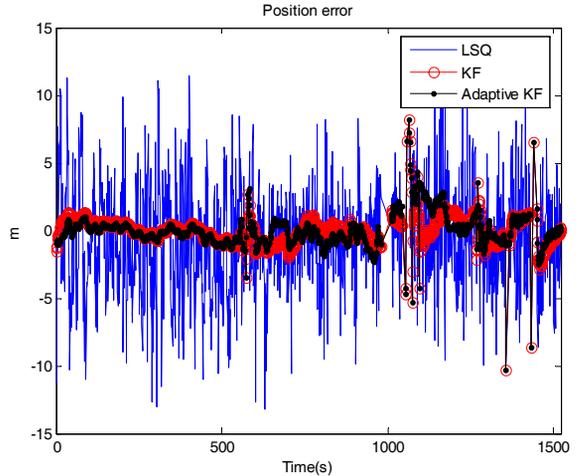
[표 1] 고가속 시뮬레이션 항법오차(RMS)

	최소자 승법	Kalman 필터	적응 Kalman 필터
위치오차(m)	3.82	3.72	2.18
속도오차(m/s)	0.12	4.23	0.11
가속도오차(m/s^2)	-	7.28	4.41

Kalman 필터 가속도는 추정된 시스템 공분산을 사용하므로 일반적인 Kalman 필터보다 오차가 작다.

6. 차량실험

적응 Kalman 필터를 구현한 GPS 수신기와 Novatel사의 DGPS 시스템으로 차량시험을 수행하였다. 그림 12와 같은 경로를 주행하였으며, 위치정확도 0.15m 이하인 Quality 1의 DGPS 후처리 결과를 참값으로 가정하고 분석하였다^[2]. 그림 13 및 14는 최소자승법, Kalman 필터, 적응 Kalman 필터에 대한 남북방향의 위치오차와 속도오차를 나타낸다. 그림 13에서 Kalman 필터와 적응 Kalman 필터는 도로주변의 위성신호 방해물에 의해 종종 위치재획득 상태에서 초기화되었지만, 잡음이 큰 최소자승법 위치오차를 효과적으로 감소시킬 수 있다. 그런데 그림 14의 속도오차는 앞장의 고가속 시뮬레이션과 마찬가지로 Kalman 필터의 경우 큰 오차를 발생시키기에 반해 적응 Kalman

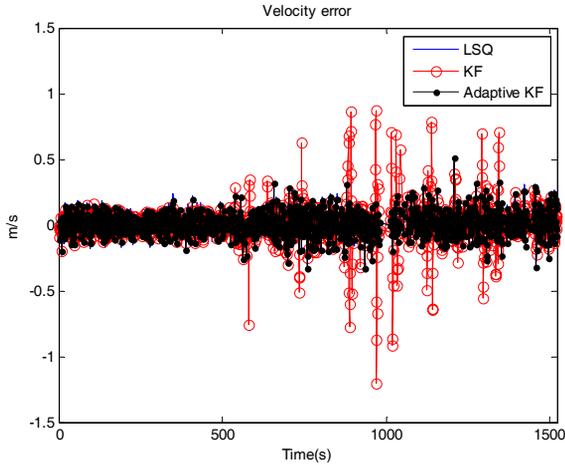


[그림 13] 차량시험 위치오차(위도방향)

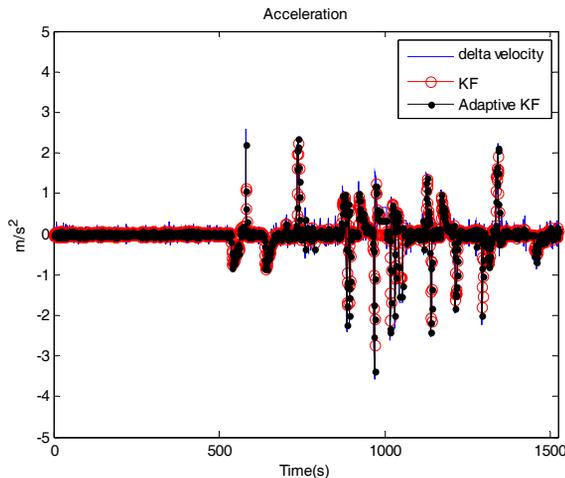
필터는 오차가 작다. 이때 DGPS 속도차분으로 추정된 가속도 및 Kalman 필터 가속도는 그림 15와 같이 발생하며, 최대 $4m/s^2$ 로 작지만 발생순간마다 등가속 모델인 Kalman 필터의 속도오차를 유발함을 알 수 있다.

수g 이상의 고가속 상황이 불가능한 차량시험 결과, 각각의 필터에 대한 항법오차를 통계적으로 계산하면 아래 표 2와 같다. 앞장의 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 적응 Kalman 필터를 사용함으로써 위치오차를 줄이면서 가속도 변화로 인한 속도오차 증가를 방지할 수 있다. 한편 가속도 오차는 5장의 고가속 시뮬레이션과 달리 참값의 가속도를 얻을 수 없기

때문에 잡음성분이 큰 DGPS 속도 차분으로 추정하였으며, 추정된 가속도는 필터의 가속도와 유사한 경향을 보였다.



[그림 14] 차량시험 속도오차(위도방향)



[그림 15] 차량시험 가속도(위도방향)

[표 2] 차량시험 항법오차(RMS)

	최소자승법	Kalman 필터	적응 Kalman 필터
위치오차(m)	3.99	1.20	1.18
속도오차(m/s)	0.09	0.15	0.08
가속도오차(m/s ²)	-	0.24	0.22

7. 결론

항공기나 유도무기와 같이 높은 가속도 동적환경을 가지는 항체에 적용되는 GPS 수신기의 항법정확도를 향상시키기 위해 최소자승법 항법해를 후처리하는 적응 Kalman 필터를 설계하였다. 설계된 적응 Kalman 필터는 최소자승법으로 계산된 항법해의 큰 잡음오차를 줄일 수 있으며, 시스템 잡음을 추정함으로써 항체가 고가속 운동을 할 때에도 일반적인 Kalman 필터와 달리 오차가 커지지 않는다. 또한 불규칙적으로 얻어지는 최소자승법 항법해를 고려하여 Kalman 필터의 초기화 구조를 설계하였다. 이를 구현한 GPS 수신기와 고가속 운동을 묘사할 수 있는 GPS 시뮬레이터를 사용함으로써 적응 Kalman 필터의 성능을 검증하였으며, DGPS를 포함한 차량시험으로써 GPS 수신기의 실제적인 정확도 향상효과를 분석하였다.

Reference

- [1] Elliot D. Kaplan, GPS Understanding GPS Principles and Applications, Artech House, 1999.
- [2] Pratap Misra, Per Enge, Global Positioning System Signals, Measurements and Performance, Ganga-Jamuna Press, 2001.
- [3] Braasch, M. S and Van Dierendonck, A. J., "GPS Receiver Architectures and Measurements", Proceedings of Aerospace Conference, IEEE, Vol. 87, 1999.
- [4] GPS Joint Program Office, NAVSTAR GPS User Equipment Introduction, Public Release Version, Feb. 1991.
- [5] 김대제, 이정엽, 김정하, 윤복중, 나정훈, 정승권, "다중 GPS 수신기를 이용한 동적환경에서의 GPS 위치 측위 정밀도 향상", 한국군사과학기술학회 종합학술대회, 2008.
- [6] 강설목, 이상정, "고기동 항체의 위치추적용 GPS 중계기 설계/제작", 한국군사과학기술학회지, 제6권 제1호, pp. 39~48, 2003.
- [7] Kalman, R. E., "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems", Journal of Basic Engineering, Vol. 82D, 1960.
- [8] Brown, Robert Grover and Patrick Y. C. Hwang, Introduction to Random Signals and Applied Kalman

- Filtering, 3rd Edition, John Wiley & Sons, 1997.
- [9] Gelb, A., et al. Applied Optimal Estimation, MIT Press, Cambridge, 1992.
- [10] O. Salychev, Inertial Systems in Navigation and Geophysics, Bauman MSTU Press, Moscow, 1998.
- [11] Tae Gyo Lee, "Centralized Kalman Filter with Adaptive Measurement Fusion : its Application to a GPS/SDINS Integration System with an Additional Sensor", International Journal of Control, Automation and Systems, Vol. 4, 12, 2003.
- [12] 유명중, "측정잡음 분산추정 적응필터를 이용한 INS/GPS 결합 시스템", 제어로봇시스템학회지, 13권 7호, 2007.
- [13] 유명중, "INS/GPS를 위한 적응필터 구성", 제어로봇시스템학회지, 11권 8호, pp. 717~725, 2005.
- [14] 송종화, 지규인, 김광훈, "칼만필터 기반의 통합 GPS 수신기 추적루프 설계", 제어로봇시스템학회지, 14권 9호, pp. 939~947, 2008.