

## 고의잡음의 제거를 고려한 GPS항법 및 무결성 검정알고리즘

### A GPS Positioning and Receiver Autonomous Integrity Monitoring Algorithm Considering SA Fade Away

최재열, 박순, 박찬식  
(Jae-Youl Choi, Soon Park and Chansik Park)

**Abstract** : After the removal of SA (Selective Availability), horizontal accuracy of 25m(2dRMS) is easily obtained using GPS (Global Positioning System). In this paper, the error characteristics without SA are analyzed and a navigation algorithm concerns this error characteristics is proposed to further improve the accuracy. The proposed method utilizes the relationship between elevation angle and errors that are remained after ionospheric and tropospheric delay compensation. The relationship is derived from real measurements and used as a weighting matrix of weighted least squares estimator. Furthermore, a RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitoring) technique is included to remove abnormal measurements affected by multi-path or low SNR (Signal-to-Noise Ratio). It is shown that using the proposed method, more than 4 times accurate result, which is comparable with DGPS (Differential GPS), can be obtained from experiments with real data. Besides accuracy and reliability, the proposed method reduces large jumps in position and maintains better performance than a method using mask angle to completely remove satellites below this mask angle. Thus it is expected that the proposed method can be efficiently applied to land navigation where some satellites are blocked by building or forest.

**Keywords** : GPS, selective availability, ionospheric and tropospheric delay, WLSQ, RAIM

#### I. 서론

GPS(Global Positioning System)는 위성을 이용하여 전 세계 어디서나 위치, 속도 및 시각 정보를 제공하는 전파항법 시스템으로 육상, 해상 및 비행기의 항법뿐 아니라 시각 동기 등에서 그 사용이 확대되고 있는 추세이다. GPS 수신기에서는 항법 해를 구하기 위하여 최소 자승법을 사용하는 것이 일반적이며, GPS의 오차 성분 중 고의잡음(SA: Selective Availability)이 가장 크며 정확한 특성을 알 수 없어 이를 다른 오차 성분과 분리하지 않은 상태에서 해를 구하였다. 고의잡음은 이렇게 구해진 위치가 수평면 상에서 100m(2dRMS)의 정확도를 유지하도록 위성 시계와 위성의 위치 오차를 포함하는 방법으로 구현되었다.

2001년 5월에 고의잡음이 제거된 후에도 나머지 오차의 영향으로 수평면에서의 오차가 25m 정도가 된다고 알려져 있다. 고의잡음을 제외한 나머지 오차에는 전리층 지연, 대류권 지연, 다중 경로 및 수신기 측정잡음이 있다. 수신기 측정잡음은 백색잡음으로 일반적으로 코드길이의 1% 오차를 가정하며, C/A(Coarse Acquisition) 코드를 사용하는 경우 3m(1 $\sigma$ ) 정도로 나타난다. 칩 간격을 줄여 신호를 추적하는 협상관기(narrow correlator)의 경우 30cm까지 줄일 수 있다고 알려져 있다[1].

다중경로 오차는 위성에서 직접 수신기에 도달하는 신호에 주변 환경에 따라 발생한 반사파가 더해져서 나타나는 오

차로 모델링이 어렵다. 일반적으로 낮은 양각(elevation angle)의 위성 신호가 다중 경로 오차를 더 많이 유발한다고 알려져 있다. DGPS(Differential GPS) 기준국과 같이 고정된 수신기의 경우 그 영향이 주기적으로 나타나므로 보상이 가능하며, 여러 개의 안테나를 사용하여 추정하는 기법도 사용된다[2]. 그러나 일반적인 항법에서는 이러한 기법을 적용하기 어려우므로 수신기의 신호처리 과정에서 다중 경로 오차의 영향을 줄일 수 있는 기법이 사용된다[1][3]. 이외에도 초크링(choke-ring)을 안테나 주변에 설치하여 반사파의 영향을 줄일 수 있다[2].

전리층 지연 오차는 GPS 신호가 전리층을 통과하는 과정에서 발생하며 코드에 대해서는 지연으로, 반송파에 대해서는 앞섬으로 작용하며 그 크기는 같다. 양각이 높은 위성에 비하여 낮은 위성이 영향을 많이 받고, 전리층의 활동이 왕성한 낮에 그 영향이 크며 그 크기가 20~60m 정도가 된다. 전리층 지연은 주파수의 제곱에 반비례하므로 이중 주파수 수신기를 사용하는 경우에는 효과적으로 제거할 수 있다. 단일 주파수 수신기를 사용하는 경우에는 전리층 모델을 이용하여 지연을 추정하며 Klobuchar 모델이 GPS에서 사용된다. 그러나 이 모델은 지구 전체를 대상으로 한 모델로 50~75% 정도의 보상이 이루어진다고 알려져 있다[4].

대류권 지연 오차는 GPS 신호가 대류권을 통과하면서 발생하는 오차로 습도, 온도 및 고도 등의 영향을 받는다. 대류권 지연도 전리층 지연과 마찬가지로 위성의 양각에 영향을 받으며 그 크기가 2.1~24m에 이른다. GPS에서는 대류권 보상을 위한 별도의 모델을 제공하지 않으며, 일부 수신기에서 Modified Hopfield 모델 등을 이용하기도 한다[4].

고의잡음이 제거된 후에는 전리층 지연 및 대류권 지연

접수일자: 2001. 9. 29., 수정완료: 2002. 2. 4

최재열, 박순, 박찬식: 충북대학교 제어계측공학과 컴퓨터정보통신연구소(imp102@just.chungbuk.ac.kr/blueis@netsgo.com/chansp@cbucc.chungbuk.ac.kr)

\* 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2001-1-30200-025-1)지원으로 수행되었습니다.

오차가 가장 큰 오차요인으로 작용하며 이들 오차의 특성은 주기가 수분인 고의 잡음과는 달리 그 주기가 수 시간에 달해 구해진 해에서 바이어스로 동작하므로 이를 추가의 미지수에 포함하는 항법 알고리즘을 사용할 수 있다. 즉 수신기가 위치한 곳의 전리층 및 대류권의 형태와 양각의 함수로 표현할 수 있으므로 6개 이상의 GPS위성이 보이는 경우 전리층 지연과 대류층 지연에 대한 모델을 추가하여 총 6개의 미지정수를 갖는 항법식을 계산하여 위치, 시각, 전리층 계수 및 대류권 계수를 동시에 구할 수 있다[5]. 그러나 이 방법은 사용하는 전리층 및 대류권 지연 모델 정확도의 영향이 크며, 특히 양각이 비슷한 위성이 존재하는 경우 조건 계수가 나쁜 행렬(ill-conditioned matrix)로 인한 계산 오차가 증가되는 단점이 있어 실제 적용에 어려움이 있다.

본 논문에서는 의사거리 측정치에 포함된 오차의 특성과 Klobuchar 모델과 대류권 모델을 이용하여 전리층과 대류권을 보정한 후의 오차의 특성으로부터 양각과 오차의 공분산과의 관계를 실험적으로 구하고, 이를 가중치로 이용하는 가중 최소 자승법을 이용하여 DGPS의 정확도에 근접시킬 수 있음을 보였다. 가시 위성의 수가 충분하다면 사제 각(mask angle)을 이용하는 경우에도 성능의 향상을 얻을 수 있음을 보였다. 또 무결성 검정기법(RAIM: Receiver Autonomous Integrity Monitoring)의 일종인 최대 유수 기법(maximum residual method)을 적용함으로써 비정상적으로 큰 오차를 제거하여 정확도를 더욱 향상시킬 수 있음을 보였다.

II. 기존의 항법 알고리즘 및 오차 보상

1. 기존의 항법 알고리즘

수신기에서 위성  $i$ 에 대한 의사거리 측정치는 (1)로 나타낼 수 있다 [4]. 여기서  $\rho_i$ 는 의사거리 측정치,  $r_i$ 는 위성과 수신기간의 거리,  $cB$ 는 위성과 수신기의 시계오차에 광속이 곱해진 값,  $r_i|_{A_0}$ 는 위성과 기준점(nominal position)  $A_0$ 을 이용하여 계산된 거리,  $(X_i, Y_i, Z_i)$ 는 위성의 위치,  $(x, y, z)$ 는 기준점의 위치,  $h_i = \begin{bmatrix} X_i - x & Y_i - y & Z_i - z \\ r_i|_{A_0} & r_i|_{A_0} & r_i|_{A_0} \end{bmatrix}^T$ 는 위성과 수신기간의 시선 벡터,  $\delta x = [dx \ dy \ dz]^T$ 는 기준점에 대한 위치 오차를 나타낸다. 의사거리 측정 오차  $v_i$ 는 위성 위치 오차, 전리층 지연, 대류권 지연, 다중 경로 오차 및 수신기 측정 잡음이 더해진 오차를 나타내며, 고의 잡음이 있는 경우라면 고의 잡음도 포함된다.

$$\rho_i = \Psi_i - r_i|_{A_0} = h_i^T \delta x + cB + v_i \tag{1}$$

3차원 위치와 수신기 시계오차를 구하기 위해서는  $m(\geq 4)$ 개의 위성으로부터 측정치를 얻어야 하며 이 경우 (2)와 같이 벡터와 행렬을 이용하여 나타낼 수 있다. 여기서  $\rho = [\rho_1 \dots \rho_m]^T$ ,  $H = [h_1 \dots h_m]^T$ ,  $r = [1 \dots 1]^T$ ,  $v = [v_1 \dots v_m]$ 로 정의되며, 측정오차는  $v \sim N(0, \sigma_v^2 Q_v)$ 의 분포를 갖는다고 가정한다. (2)에 가중 최소자승법을 적용하여 위치와 수신기 시계오차를 구하면 (3)이 되고, 공분산은 (4)가 된다.

$$\rho = H \delta x + cB + v = [H \ r] \begin{bmatrix} \delta x \\ cB \end{bmatrix} + v \equiv G \begin{bmatrix} \delta x \\ cB \end{bmatrix} + v \tag{2}$$

$$\begin{bmatrix} \delta \hat{x} \\ c\hat{B} \end{bmatrix} = (G^T Q_v^{-1} G)^{-1} G^T Q_v^{-1} \rho \tag{3}$$

$$\text{cov} \left( \begin{bmatrix} \delta \hat{x} \\ c\hat{B} \end{bmatrix} \right) = \sigma_v^2 (G^T Q_v^{-1} G)^{-1} \tag{4}$$

고의잡음이 존재하는 경우 측정 오차의 평균 값을 0, 공분산을  $\sigma_v^2 I$ 로 두고 해를 구하는 것이 일반적이었다. 즉 고의잡음의 크기가 다른 오차 보다 월등히 크므로 고의잡음의 특성만을 고려할 수밖에 없었다. 따라서 고의잡음이 존재하는 경우 가중 최소 자승법의 의미가 없으며, (5)의 구해진 추정치의 공분산을 이용하여 정의된 GDOP(Geometric Dilution Of Precision)를 이용하여 위성의 배치가 미치는 영향을 분석할 수 있다[6].

$$GDOP = \sqrt{\text{trace}(G^T G)^{-1}} \tag{5}$$

2. 오차의 보상

측정 오차  $v$ 는 전리층 지연, 대류권 지연, 다중 경로 오차 및 수신기 측정잡음의 합으로 구성된다. 이들 오차의 크기가 줄면 같은 크기의 GDOP에 대해서 구해진 위치 및 시각의 정확도가 향상될 수 있다.

2.1. 전리층 지연의 보상

GPS에서는 전리층 지연의 보상을 위하여 Klobuchar 모델을 사용하며 여기서는 전리층은 지상에서 평균 350km에 위치한다고 가정하며, 전리층의 활동은 지구 자기위도(geomagnetic latitude)와 지방 시(local time)에 영향을 받으므로 이를 이용하여 수직 전하 밀도( $I_p$ )를 구한다[7]. 수직 전하 밀도의 계산에 필요한 계수는 항법 신호에 포함되어 있으며 구해진 수직 전하 밀도에 (6)의 위성의 양각( $E_i$ )에 따른 경사도(obliquity factor,  $F(E_i)$ )를 곱하여 (7)의 전리층 지연의 크기를 구하고 이를 의사거리 측정치에서 보상한다.

$$F(E_i) = 1 + 16(0.53 - E_i)^3 \tag{6}$$

$$T_{iono} = F(E_i) I_p \tag{7}$$

Klobuchar 모델의 정확도는 수직 전하 밀도와 경사도의 정확도에 따르지만 GPS에서는 전 지구를 대상으로 모델을 구성하고 사출에 한번 정도 모델을 변경하므로 위식을 이용하여도 50~75% 정도의 보상만이 이루어진다고 알려져 있다.

2.2. 대류권 지연의 보상

GPS에서는 대류권 지연을 보상하기 위한 별도의 방법을 지원하지 않는다. 일부 수신기에서는 Hopfield, Modified Hopfield 및 Saastamoinen 모델 등이 사용되지만 아직 그 효과가 확인되지 않은 상태이다[4]. 또한 이러한 모델은 일반 수신기에서 사용하기에는 너무 복잡한 형태이므로 (8)의 간

단한 형태가 많이 사용된다[6].

$$T_{Tropo} = \frac{2.3}{\sin(E_i)} \quad (8)$$

III. 오차의 특성 및 이를 고려한 항법 알고리즘

1. 오차의 특성 및 영향

고의잡음이 존재하는 경우에는 전리층 지연과 대류권 지연의 보상 효과가 크게 나타나지 않는다. 그러나 고의잡음이 제거됨으로써 이러한 보상의 효과가 크게 나타나며, 보상되기 전의 오차 특성과 보상된 후의 오차 특성을 파악하여 정확도를 향상시킬 수 있다.

오차의 특성을 파악하기 위하여 정확한 위치를 알고있는 기준점에서 NovAtel사의 12 채널 3010R 수신기를 이용하여 2001년 6월 28일 오후 7시부터 1분 단위로 하루 동안 측정치를 수집하였다. 그림 1에 실험 기간동안의 가시 위성의 수와 GDOP을 나타내었다. 그림에서 6개에서 12개 사이의 위성이 관측되며, GDOP은 2부근의 값을 가짐을 볼 수 있다.

그림 2에 의사거리와 실제거리의 차, 즉 수신기 시계오차와 측정오차의 합을 나타내었다. 그림 2(a)에서 위성이 움직임에 따라 양각이 변화하고, 이 양각에 따라 오차의 크기가 변화함을 확인할 수 있으며, 일부 구간에서 200m 이상의 큰 값을 가짐을 볼 수 있다. 이런 큰 오차는 그림 2(b)에서 주로 낮은 양각의 위성에서 발생하는 오차임을 확인할 수 있다. 그림에서 -100m 부근의 오차는 같은 시각에 모든 측정치에 대하여 발생함을 볼 수 있다. 이는 수신기 시계오차의 영향이며 모든 위성에 대하여 같은 크기로 작용한다면 위치의 정확도에는 영향을 주지 않는다. 또한 그림 2(b)로부터 오차의 크기는 위성의 양각의 함수임을 확인할 수 있다.

그림 3에 항법 신호에 포함된 계수 값을 이용하여 구해진

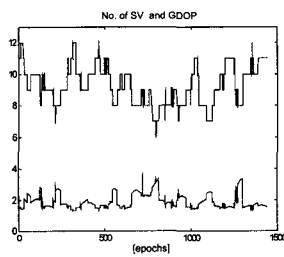
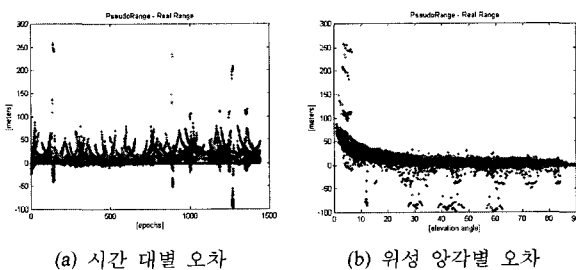


그림 1. 가시 위성의 수와 GDOP.  
Fig. 1. Number of visible satellites and GDOP.



(a) 시간 대별 오차 (b) 위성 양각별 오차

그림 2. 의사거리와 실제 거리와의 차.  
Fig. 2. Difference between pseudo-range and real range.

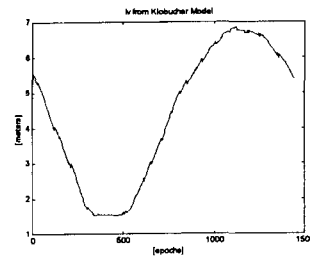
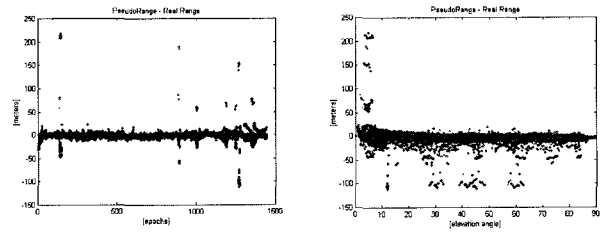


그림 3. Klobuchar model로 구한 Iv[거리 단위].  
Fig. 3. Obtained Iv using Klobuchar model [distance unit].



(a) 시간 대별 오차 (b) 위성 양각별 오차

그림 4. 전리층 지연과 대류권 지연을 보정한 후의 의사거리와 실제거리의 차.  
Fig. 4. Difference between pseudo-range and real range after compensating atmospheric delays.

거리단위의 수직 전하밀도를 나타내었다. 그림에서 낮 2시경에 최대가 되고 밤에는 그 값이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이 값과 (7)을 이용하여 전리층 지연을 보상하고, (8)을 이용하여 대류권 지연을 보정한 후의 의사거리와 실제거리의 차를 그림 4에 나타내었다. 그림 2와 그림 4로부터 오차 보상의 효과를 확인할 수 있다. 오차 보상에 의하여 바이어스 성분의 오차가 백색화(whitening)되는 것을 볼 수 있다. 또한 그림 4(b)로부터 실제 오차보다 모델로부터 구한 보상치가 커서 남은 오차가 양각에 따라 포물선 형태로 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 사용한 모델이 정확하지 않기 때문이며, 이로 인하여 오차 모델을 이용하여도 50~75%의 보상밖에 할 수 없다.

그림 5에 오차의 공분산을  $\sigma_w^2 I$ 로 둔 일반적인 최소 자승법을 이용하여 구해진 오차를 나타내었다. 이때 삭제 각은 0도로 두었으며 전리층 및 대류권 지연은 보상하지 않았다. 그림 4와 그림 5에서 의사거리 측정치에 포함된 오차가 큰 경우 구해진 위치와 시각에도 큰 오차가 발생함을 확인할 수 있다. 그림 6에 (7)과 (8)을 이용하여 전리층과 대류권 지연을 보정한 의사거리 측정치로부터 구해진 위치와 시각의 오차를 나타내었다. 그림 5와 6에서 전리층 및 대류권 오차 보상에 의하여 수신기 시계의 정확도가 위치에 비하여 많이 향상되었음을 볼 수 있다. 이는 최소 자승법을 이용하는 경우 보이는 전체 위성의 전리층 및 대류권 지연 평균 값이 수신기 시계오차에 포함되어서 나타나기 때문이며, 오차의 보상으로 인한 효과가 직접적으로 나타난다.

반면 수평면에는 오차의 보상이 많은 도움을 주지 않음을 볼 수 있다. 이는 일부 위성에 포함된 비정상적으로 큰 오차가 제대로 보상되지 않았기 때문이며, 특히 이러한 위성이

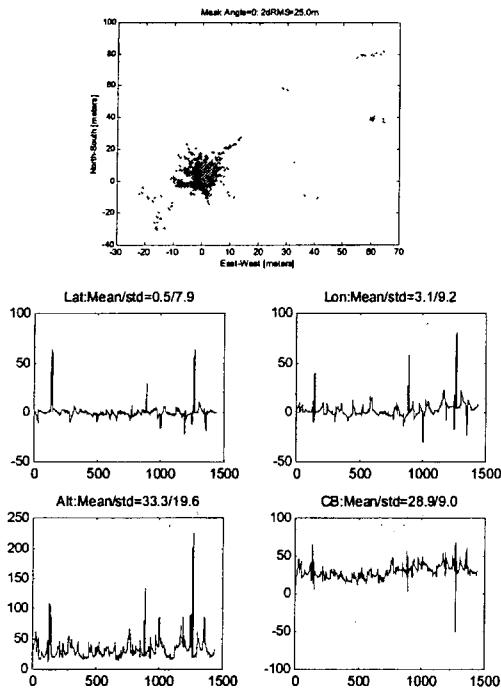


그림 5. 최소 자승법을 이용하여 구한 위치오차 (삭제 각: 0도, 전리층 및 대류권 지연을 보상 않음).  
 Fig. 5. Obtained positioning error using least squares (Mask angle:0 deg., no atmospheric delay compensation).

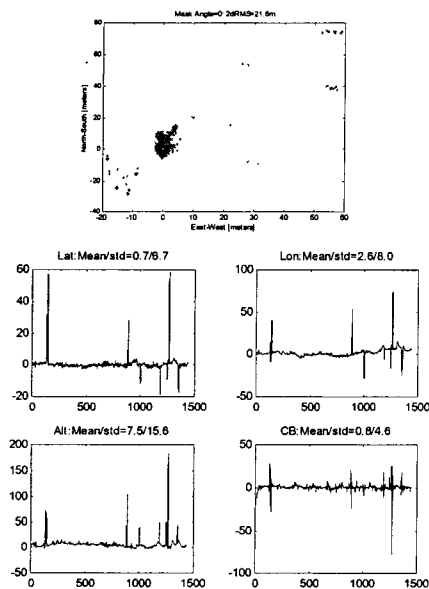


그림 6. 최소 자승법을 이용하여 구한 위치 오차 (삭제 각: 0도, 전리층 및 대류권 지연 보상한 경우).  
 Fig. 6. Obtained positioning error using least squares (Mask angle:0 deg., with atmospheric delay compensation).

추가 혹은 삭제될 때 급격한 위치의 변화를 유발함을 볼 수 있다.

이상의 결과로부터 위치와 시각의 정확도를 향상시키기 위해서는 비정상적으로 큰 오차를 제거하는 기법이 필요하며, 이런 비정상적인 오차가 낮은 양각에 몰려있다면 삭제각을 이용함으로써 쉽게 제거할 수 있다.

2. 삭제 각을 이용하는 방법

삭제 각은 보통 5~15도 사이의 값을 사용하며 이보다 낮은 양각의 위성 측정치를 사용하지 않음으로써 의사거리 측정 오차의 영향을 효과적으로 제거할 수 있다. 그러나 도심 등과 같이 가시 위성의 수가 충분하지 않은 경우에는 가시 위성의 수가 4개 이하가 되는 경우가 발생할 수 있으므로 이 방법은 가시성이 좋지 않은 곳에서는 효과적으로 적용할 수 없다.

그림 7에 삭제 각을 0, 5, 10, 15도로 둔 경우의 가시 위성의 수와 GDOP을 나타내었다. 그림에서 삭제 각이 15도가 되면 가시 위성의 수가 4개밖에 되지 않는 경우도 발생하며, 위성의 수가 감소함에 따라 GDOP이 증가 함을 확인할 수 있다. 이는 삭제 각을 증가시켜 측정 오차가 큰 측정치를 모두 제거 시키면 측정치의 오차는 줄일 수 있으나, GDOP이 나빠지고 이로 인하여 위치 및 시각 오차가 증가함을 나타낸다. 따라서 삭제 각의 설정은 응용분야와 주위 환경 등을 고려하여 선택되어야 한다.

표 1, 2에 삭제 각에 따른 오차의 크기를 나타내었다. 표 1은 전리층과 대류권 오차를 보상하지 않은 측정치를 사용한 결과이고, 표 2는 보상한 측정치를 사용한 결과이다. 표에서 전리층 및 대류권 오차를 보상함으로써 수평면에서 20% 정도의 성능을 향상시킬 수 있음을 볼 수 있다. 오차를 보상한 경우와 보상하지 않은 경우 모두 삭제 각이 증가할수록 정확도가 향상되며 삭제 각이 10도 이상에서는 측정치의 오차가 감소하는 만큼 GDOP이 증가되므로 그 영향이 크지 않음을 알 수 있다. 따라서 삭제 각은 10도 부근에서 결정하고, 전리층 및 대류권 지연 오차 모델을 사용하여 보상된 의사거리 측정치를 사용하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

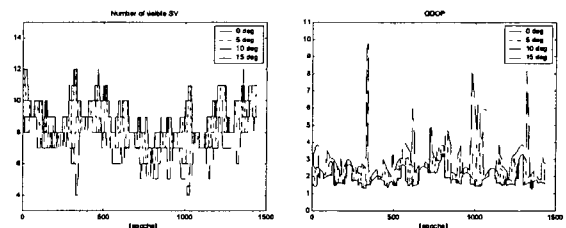


그림 7. 삭제 각에 따른 가시위성의 수와 GDOP.  
 Fig. 7. Number of visible satellites and GDOP vs. mask angle.

표 1. 삭제 각에 따른 오차(전리층·대류권 보상 않음).  
 Table 1. Positioning errors vs. mask angle (w/o compensation).

삭제각(Degree)	0	5	10	15	
평면오차(2dRMS)	21.6	13.8	6.8	6.7	
동서방향 오차	평균	0.7	0.4	0.2	0.1
	1σ	6.7	3.6	1.1	1.3
남북방향 오차	평균	2.6	2.1	1.7	1.4
	1σ	8.0	5.5	2.8	2.7
고도오차	평균	7.5	5.1	3.8	3.5
	1σ	15.7	8.7	3.3	3.9
수신기 시계오차	평균	0.8	-1.0	-2.0	-2.2
	1σ	4.6	9.2	10.2	10.2

표 2. 삭제 각에 따른 오차(전리층·대류권 보상).  
Table 2. Positioning errors vs. mask angle (w/ compensation)  
삭제각(Degree).

삭제각(Degree)		0	5	10	15
평면오차(2dRMS)		21.6	13.8	6.8	6.7
동서방향 오차	평균	0.7	0.4	0.2	0.1
	1σ	6.7	3.6	1.1	1.3
남북방향 오차	평균	2.6	2.1	1.7	1.4
	1σ	8.0	5.5	2.8	2.7
고도오차	평균	7.5	5.1	3.8	3.5
	1σ	15.7	8.7	3.3	3.9
수신기 시계오차	평균	0.8	-1.0	-2.0	-2.2
	1σ	4.6	9.2	10.2	10.2

3. 가중 최소 자승법을 이용하는 방법

삭제 각을 사용하는 경우 가시 위성의 수가 4개 이하가 되어 항법 해를 구할 수 없는 경우가 종종 발생하므로 오차의 특성으로부터 가중치를 결정하고 이를 이용하여 가중 최소 자승법을 이용하는 것이 유리할 수 있다. 가중치는 측정치의 정확한 공분산을 알 수 없으므로, 실제 측정치인 그림 4(b)로부터 결정하였으며 이는 사용하는 수신기와 주변 환경에 따라 달라질 수 있다. 본 논문에서는 그림 4를 근사화 하는 여러 모델들 중 실험을 통하여 가장 나은 성능을 주는 (9)를 이용하였다. 이때 가중 행렬은 (10)이 된다.

$$q(E_i) = \begin{cases} (\sin 30^\circ)^{-3}, E_i \geq 30 \\ (\sin E_i)^{-3}, E_i < 30 \end{cases} \quad (9)$$

$$W_{\psi} = \text{diag} \frac{1}{q(E_i)}, i = 1 \dots m \quad (10)$$

전리층 지연 및 대류권 지연을 보상하지 않고 가중 최소 자승법을 이용하여 구해진 위치 및 시각 오차를 표 3에, 보상하고 구한 결과를 표 4에 나타내었다. 표에서 가중 최소 자승법을 이용하면 성능의 향상을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 특히 삭제 각이 낮은 경우 3배 이상의 성능 향상을 얻을

표 3. 가중 최소자승법 결과(전리층·대류권 보상 없음).  
Table 3. Positioning errors from WLSQ(w/o compensation).

삭제각(Degree)		0	5	10	15
평면오차(2dRMS)		6.9	6.8	6.8	7.0
동서방향 오차	평균	0.05	0.04	0.03	0.04
	1σ	1.4	1.4	1.4	1.5
남북방향 오차	평균	1.5	1.5	1.5	1.3
	1σ	2.7	2.7	2.7	2.9
고도오차	평균	19.1	19.0	18.3	17.0
	1σ	3.8	3.7	3.6	4.0
수신기 시계오차	평균	18.6	18.5	18.0	16.8
	1σ	10.5	10.6	10.8	10.8

표 4. 가중 최소자승법 결과(전리층, 대류권 보상).  
Table 4. Positioning errors from WLSQ(w/ compensation).

삭제각(Degree)		0	5	10	15
평면오차(2dRMS)		6.38	6.36	6.37	6.57
동서방향 오차	평균	0.1	0.1	0.1	0.1
	1σ	1.1	1.1	1.1	1.3
남북방향 오차	평균	1.5	1.5	1.5	1.3
	1σ	2.6	2.6	2.6	2.7
고도오차	평균	3.7	3.7	3.6	3.4
	1σ	3.2	3.2	3.3	4.0
수신기 시계오차	평균	-2.1	-2.1	-2.2	-2.4
	1σ	9.8	9.9	10.0	10.2

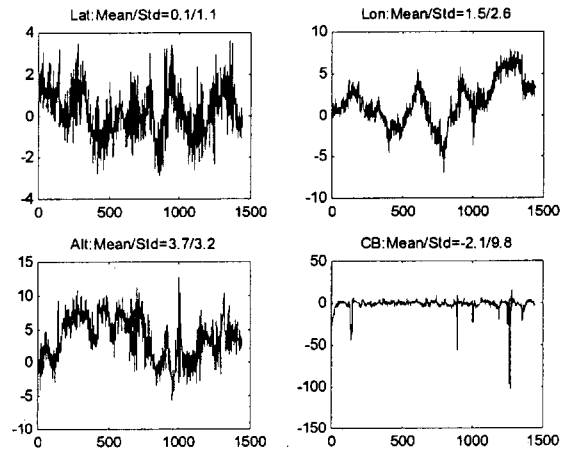


그림 8. 가중 최소 자승법으로 구한 위치 오차(삭제 각 : 0도, 전리층 및 대류권 지연 보정한 경우).

Fig. 8. Positioning errors using WLSQ (Mask angle: 0 deg., with atmospheric delay compensation).

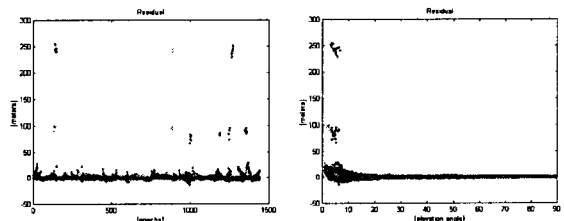


그림 9. 가중 최소 자승법을 이용하여 구해진 유수(삭제 각 : 0도, 전리층 및 대류권 지연 보정한 경우).

Fig. 9. Obtained residuals from WLSQ (Mask angle: 0 deg., with atmospheric delay compensation).

수 있음을 볼 수 있다. 그러나 5도 이상의 삭제 각에 대해서는 성능 향상이 크지 않으며, 특히 표 3에서 삭제 각이 15도인 경우의 결과가 10도인 경우에 비하여 나빠지는 것을 볼 수 있다. 이는 삭제 각이 높아짐에 따라 가시 위성의 수가 줄어들고 GDOP이 커진 것에 기인한다.

그림 8에 삭제 각이 0도, 전리층 및 대류권 지연을 보정한 측정치에 가중 최소 자승법을 적용하여 구해진 오차를, 그림 9에 (11)로 구해진 유수(residual)을 나타내었다.

$$\hat{\nu} = \rho - G \begin{bmatrix} \delta x \\ cB \end{bmatrix} = [I - G(G^T W_{\psi} G)^{-1} G^T W_{\psi}] \nu \quad (11)$$

그림에서 가중 행렬의 영향으로 양각 30도 이상의 경우에는 유수의 크기가 거의 비슷하고, 양각이 낮은 경우에는 유수의 크기가 증가함을 볼 수 있다. 특히 양각이 낮은 일부 위성에서는 비 정상적으로 큰 유수가 발생하며 가중 최소 자승법을 사용하여도 이들의 영향을 피할 수 없다. 삭제 각을 사용하는 경우에는 이들의 영향을 피할 수 있지만 정상적인 오차의 크기를 갖는 많은 측정치를 동시에 제거하는 문제가 발생한다. 이 문제는 비 정상적으로 큰 유수를 갖는 위성을 식별하고 이 측정치만 제거함으로써 해결될 수 있으며 이는 다음장에서 상세히 다룬다.

이상의 결과로부터 가중 최소 자승법을 이용하는 것이 삭제 각을 사용하는 것에 비하여 나은 성능을 얻을 수 있으며, 특히 가시 위성의 수가 부족한 경우(4~5개) 삭제 각을 이용하면 해를 구할 수 없는 경우가 발생하는데 비하여 제안한 방법을 적용하면 해를 구할 수 있는 장점이 있다. 또한 가중 최소 자승법을 이용하면 낮은 양각의 위성이 추가 혹은 감소되는 경우에도 위치와 시각의 급격한 변화를 줄여주는 장점을 추가로 얻을 수 있다.

**IV. 무결성 검정기법을 이용한 항법 알고리즘**

앞에서 가중 최소 자승법을 이용하면 수평면에서 7m 이내의 정확도를 얻을 수 있음을 확인하였다. 그러나 그림 9에서 볼 수 있듯이 아직 양각이 낮은 위성에 대하여 비 정상적으로 큰 유수를 주는 측정치가 해를 구하는데 사용되고 있음을 알 수 있다. 비 정상적으로 큰 유수는 측정치에 비 정상적으로 큰 오차가 포함된 경우에 나타나며, 이는 주로 건물의 반사에 의하여 발생한 다중 경로오차로 인하여 발생한 것으로 추측된다. 고정된 위치에 수신기를 설치하는 DGPS 기준국과 같은 경우에는 위성의 양각과 방위각을 동시에 이용하여 해당 위성을 삭제하여 그 영향을 줄일 수 있다. 그러나 일반적인 항법에서는 이런 방법을 적용하기 어려우며, 본 논문에서는 무결성 검정기법[8]을 이용하여 비 정상적인 측정치를 제거하였다.

수신기에서 사용되는 무결성 검정기법은 한 개의 측정치에만 바이어스 오차가 포함된 경우에만 오차를 검출하고 식별할 수 있는 방법이 대부분이며 잉여 측정치를 이용하여 무결성을 검정하는 스냅 샷(snapshot) 방식이 일반적으로 사용된다. 스냅 샷 방식에서는 현재의 이상 유무는 현재의 측정치만으로 판단하며, 최소 자승법의 유수의 제곱 합을 이용하는 방법[9], 패리티(parity) 공간을 이용하는 방법[10], 최대 유수 기법(maximum residual technique)[11] 등이 여기에 포함된다. 이 방법들은 수학적으로는 동치이며[12], 측정잡음이  $\nu \sim N(0, \sigma_{\nu}^2 Q_{\nu})$ 의 분포를 갖는다고 가정한다. 그러나 고의 잡음이 제거된 후에는 그림 4에서 확인한 것과 같이 측정 잡음의 분포를  $\nu \sim N(0, \sigma_{\nu}^2 I)$ 로 가정할 수 없으므로 변경이 필요하다.

본 논문에서는 최대 유수 기법을 고의 잡음이 제거된 상황에서 측정 잡음의 분포를 고려한 형태로 확장하고 적용하

였다. 측정잡음의 분포를 일반적인  $\nu \sim N(0, \sigma_{\nu}^2 Q_{\nu})$ 의 형태인 든 경우에는 (2)의 측정식을 다음과 같이 변형하여 사용한다. 즉  $W_{\psi}$ 가 양의 정칙이며 대칭(positive definite symmetric) 행렬임을 이용하여  $W_{\psi} = \sqrt{W_{\psi}} \sqrt{W_{\psi}} = (\sqrt{W_{\psi}})^2$ 로 나타낼 수 있으며, 이를 이용하면 (2)는 (12)로 나타낼 수 있고 다시 (13)의 간단한 형태로 나타낼 수 있다.

$$\sqrt{W_{\psi}} \rho = \sqrt{W_{\psi}} G \begin{bmatrix} \delta x \\ cB \end{bmatrix} + \sqrt{W_{\psi}} \nu \quad (12)$$

$$p_w = G_w \begin{bmatrix} \delta x \\ cB \end{bmatrix} + \nu_w \quad (13)$$

여기서  $\nu_w = \sqrt{W_{\psi}} \nu \sim N(0, \sigma_{\nu}^2 \sqrt{W_{\psi}} Q_{\nu} \sqrt{W_{\psi}})$ 의 분포를 가지며, 가중 행렬과 측정치의 공분산 행렬이  $W_{\psi} \cong Q_{\nu}^{-1}$ 의 관계를 만족한다면  $\nu_w \sim N(0, \sigma_{\nu}^2 I)$ 가 되므로 기존의 무결성 검정기법을 적용할 수 있다. (13)에 최소 자승법을 적용하여 구해진 유수는 다음과 같다. 여기서,  $S_w = [I - G_w(G_w^T G_w)^{-1} G_w^T] = P_w^T P_w$ 는 패리티(parity) 벡터로 측정치 공간에서 유수 공간으로 투영하는 idempotent 행렬이다. 이때의 유수  $\hat{\nu}_w$ 는 평균 0, 분산  $\sigma_{\nu}^2 S_w$ 을 갖는다.

$$\hat{\nu}_w = [I - G_w(G_w^T G_w)^{-1} G_w^T] \nu_w = S_w \nu_w \quad (14)$$

(11)의 가중 최소 자승법으로 구해진 유수와 (14)의 유수와의 관계는 다음과 같다.

$$\hat{\nu} = \sqrt{W_{\psi}} [I - G(G^T W_{\psi} G)^{-1} G^T W_{\psi}] \nu = \sqrt{W_{\psi}} \hat{\nu} \quad (15)$$

일반적으로 항공분야에서 오류를 잘못 감지할 확률(probability of false detection)  $P_{fd}$ 이  $0.33 \times 10^{-6}$  이하가 되게 무결성 검정 기법을 설계하며, 이때 최대 유수 기법은 다음의 과정으로 수행된다[11].

단계 1 :  $m \geq 6$ 개의 가시위성에 대하여 가중 최소 자승법을 이용하여 위치, 시각 및 유수  $\hat{\nu}$ 를 구하고 이와 (15)를 이용하여  $\hat{\nu}_w$ 를 구한다. 정규화된 유수,  $\hat{\nu}_n(j)$ 를 다음 식을 이용하여 구한다. 여기서  $s_w(j, j)$ 는 행렬  $S_w$ 의 (j, j)번째 항을 나타낸다.

$$\hat{\nu}_n(j) = \frac{\hat{\nu}_w(j)}{\sigma_{\nu} \sqrt{S_w(j, j)}}, \quad j = 1, \dots, m \quad (16)$$

단계 2 : 계산된  $\hat{\nu}_n(j)$ 중 최대 값  $\hat{\nu}_{MAX}$ 과 그때의 위성 j를 다음의 식을 이용하여 구한다.

$$\hat{\nu}_{MAX} = \max_j | \hat{\nu}_n(j) | \quad (17)$$

단계 3 : 구해진  $\hat{\nu}_{MAX}$ 가 임계치를 초과하면 위성 j에 비 정상적인 오차가 포함된 것으로 판단하고 위성 j의 측정치

를 제거하고 새로운 위치와 시각을 구한다. 임계치를 초과하지 않으면 정상으로 판단한다.

임계치를 결정하는 데는 일반적으로 Bonferroni 혹은 Jashi의 부등식이 사용되며  $P_{fd}=0.33 \times 10^{-6}$ 인 경우에 대한 가시 위성의 수에 따른 임계치를 표 5에 나타내었다[11]. Jashi 부등식으로 구한 임계치는 오차의 분산( $\sigma_{\psi}$ )을 정확히 아는 경우 적용할 수 있으며 표에서 Bonferroni의 방법으로 구한 임계치에 비하여 낮은 값을 가짐을 볼 수 있다.

그림 10에 최대 유수 기법을 실제 측정치에 적용하여 구해진 위치오차를 나타내었다. (10)의 가중 행렬을 이용하여 가중 최소 자승법을 적용하였다. 이때 삭제 각은 0도로 두었으며 전리층과 대류권 지연을 보정한 측정치를 이용하였다. 또 (15)의 정규화된 유수를 구하기 위하여  $\sigma_{\psi}$ 는 8m로 두었다 [9]. Bonferroni 임계치를 사용한 경우와 Jashi 임계치를 사용한 경우 성능이 거의 비슷하며 수평면에서의 오차가 각각 6.3422m와 6.3392m로 나타났다. 그림 11에 유수를 나타내었으며 그림 9와 비교하여 100m 이상의 크기를 갖는 유수가 제거되었음을 알 수 있다. 그림 12에 Jashi 임계치와 (15)로 구해진 최대 유수를 나타내었다. 그림 (a)는 이상 위성을 제거하기 전의 모습이고 (b)는 제거한 후의 그림이다. Jashi 임계치를 이용하는 경우 총 33개의 비 정상적인 측정치가 제거되었으며, Bonferroni 임계치를 이용한 경우 총 31개의 비 정상적인 측정치가 제거되었다.

**V. 실험 및 성능 분석**

제안된 방법을 다른 측정치에 적용하여 성능을 살펴보았다. NovAtel사의 3010R 수신기를 이용하여 2001년 3월 28일 오후 7시부터 1초단위로 5000개의 측정치를 수집하였다. 그림 13에 실험기간 동안의 가시위성의 수와 GDOP을 나타내었다.

여러 가지 항법 알고리즘으로 구해진 위치 오차를 표 6에 나타내었다. 이때 삭제 각은 0도로 두었으며, 가중 행렬 및 오차의 분산 등은 3장에서와 같은 값을 사용하였다. 무결성 검정에는 Jashi 임계치를 사용하였다. Bonferroni 임계치를 사용한 경우에도 성능이 거의 비슷하며 수평면에서의 오차가 7.5104m로 나타났다. 표에서 전리층 및 대류권 지연을 보

표 5. Bonferroni와 Jashi의 방법으로 구한 임계치.  
Table 5. Threshold from Bonferroni and Jashi methods.

위성 수	자유도	Bonferroni	Jashi
5	1	5.1045	5.1045
6	2	5.4343	5.30773
7	3	5.4617	5.33576
8	4	5.4890	5.35994
9	5	5.5062	5.38118
10	6	5.5247	5.4001
11	7	5.5414	5.41718
12	8	5.5567	5.43272

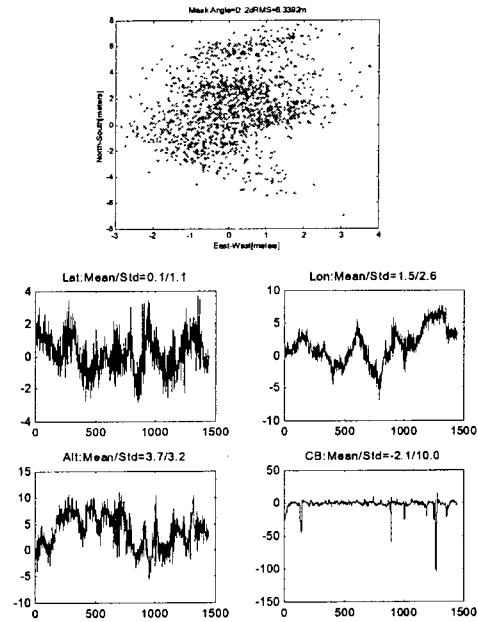


그림 10. 가중 최소자승법과 무결성 검정기법의 결과.  
Fig. 10. Results from WLSQ and RAIM (Jashi's threshold).

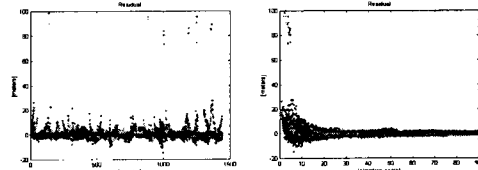
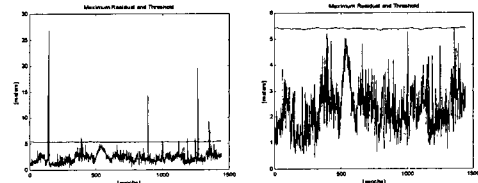


그림 11. 가중 최소자승법과 무결성 검정기법의 유수.  
Fig. 11. Residuals from WLSQ and RAIM (Jashi's threshold).



(a) 이상 위성 제거 전 (b) 이상 위성 제거 후

그림 12. 가중 최소 자승법과 무결성 검정 기법을 이용한 경우의 최대 유수와 Jashi 임계치.  
Fig. 12. Maximum residual and Jashi's threshold when WLSQ and RAIM are applied.

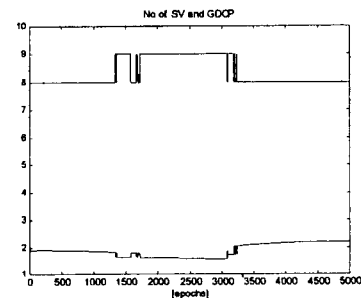


그림 13. 가시위성의 수와 GDOP.  
Fig. 13. Number of visible satellites and GDOP.

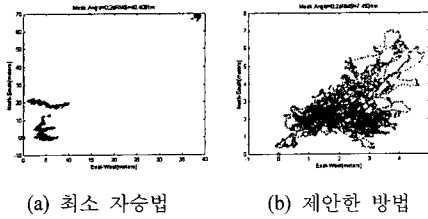


그림 14. 항법 알고리즘에 따른 수평면 오차.  
Fig. 14. Horizontal errors vs. navigation algorithm.

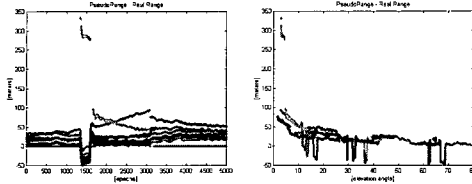


그림 15. 의사거리와 실제거리와의 차.  
Fig. 15. Difference between pseudo-range and real range.

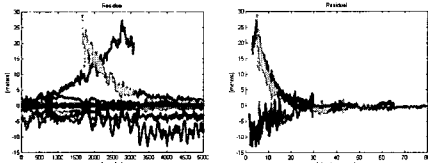


그림 16. 가중 최소자승법과 무결성 검정기법의 유수.  
Fig. 16. Residuals from WLSQ and RAIM (Jashi's threshold).

표 6. 항법 알고리즘에 따른 위치 오차.  
Table 6. Positioning error vs. navigation algorithm.

보상적용		최소자승법		가중 최소자승법		RAIM
		×	○	×	○	
평균오차(2dRMS)		40.51	33.84	10.86	7.61	7.49
동서 방향(m)	평균	6.0	3.9	3.6	2.3	2.3
	1σ	7.2	6.5	1.0	1.0	1.0
남북 방향(m)	평균	10.2	9.6	3.5	2.6	2.6
	1σ	14.8	11.7	1.6	1.2	1.2
고도(m)	평균	50.0	6.4	33.1	2.2	2.1
	1σ	25.0	23.4	2.5	2.0	1.8
수신기 시계(m)	평균	50.0	-2.0	37.4	-5.6	-5.7
	1σ	10.0	7.5	12.3	12.5	12.8

상하고 가중 최소 자승법을 이용함으로써 수평면에서의 오차가 약 6배 정도 줄어들며, 무결성 검정기법을 추가함으로써 성능이 더욱 향상됨을 확인할 수 있다. 이는 앞 장에서의 결과와 거의 일치하며 제안된 방법이 일반성을 가짐을 의미한다.

그림 14에 전리층 및 대류권 오차를 보상하지 않고 최소 자승법을 적용한 경우와 가중 최소 자승법과 무결성 검정기법을 동시에 이용한 경우의 수평면 오차를 나타내었다. 그림 15에 의사거리 측정치와 실제거리의 차를 나타내었다. 그림에서 1500초 부근의 변화는 수신기 시계 오차로 인한 것으로

판단되며 3000초 이후에 전체적으로 값이 크진 것도 수신기 시계에 따른 것으로 판단된다. 또한 낮은 양각의 측정치 중 일부가 비정상적으로 큰 오차를 가짐을 볼 수 있다. 그림 16에 무결성 검정기법을 적용한 후의 유수를 나타내었다. 그림에서 비정상적으로 큰 측정 오차가 제거되고, 남은 유수의 분포는 가중행렬의 형태를 따름을 볼 수 있다. 특히 일부 측정치에는 다중경로 형태의 오차를 확인 할 수 있다. Jashi 임계치의 경우 총 250개의 비정상적인 측정치가 제거되었으며 Bonferroni 임계치의 경우 232개의 측정치가 제거되었다.

VI. 결론

본 논문에서는 고의 잠음이 제거된 상황에서 오차 요인의 특성을 분석하고 이를 효과적으로 보상할 수 있는 항법 알고리즘을 제안하였다. 제안된 방법은 전리층 지연 모델과 대류권 지연 모델을 사용하여도 보상되지 않은 오차가 위성의 양각의 함수임을 이용하여 위성의 양각을 가중치로 두는 가중 최소자승법의 형태이며, 무결성 보장 기법의 일종인 최대 유수 기법을 오차의 특성에 맞게 변형하여 적용함으로써 다중 경로나 낮은 SNR의 영향으로 발생한 비 정상적인 오차를 제거함으로써 정확도를 향상시킬 수 있는 구조이다.

실제 측정치를 이용한 실험을 통하여 삭제 각을 이용하는 경우에도 성능의 향상을 얻을 수 있으나 가시위성의 수가 줄어들고 GDOP이 증가하는 영향으로 한계가 있음을 확인하였다. 오차의 특성을 파악하여 얻은 가중행렬을 이용한 가중 최소 자승법을 이용하면 삭제 각을 사용하지 않고도 수평면에서 DGPS의 성능과 유사한 7m(2dRMS) 이내의 정확도로 위치를 구할 수 있었다. 최대 유수 기법을 이용하여 다중 경로 등의 영향에 의한 비 정상적인 측정치를 제거한 경우 성능이 더욱 향상됨을 확인하였다.

제안된 방법은 정확도와 신뢰도의 향상 외에도 위성의 증감에 따라 발생하는 급격한 위치 변화를 억제하며, 삭제 각을 이용하여 일방적으로 위성을 제거하는 경우에 비하여 더 많은 가시 위성을 확보함으로써 안정적으로 해를 제공할 수 있다. 또한 제안된 방법은 하드웨어의 변경 없이 소프트웨어만으로 처리하므로 기존의 수신기에도 쉽게 적용할 수 있으며, 한국 지역에 맞는 전리층 및 대류권 모델과 이에 따른 가중 행렬의 결정과 다중 경로 오차의 제거를 위한 연구가 추가되면 성능을 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] A.J van Dierendonck, "Theory and performance of narrow correlator spacing in a GPS receiver," *ION GPS-92*, pp. 115-124, 1992.
- [2] M.E. Cannon and G. Lachapelle, "Analysis of a high-performance C/A code GPS receiver in kinematic mode," *NAVIGATION : Journal of the Institute of Navigation*, vol. 39, no. 3, 1992.
- [3] D.J.R van Nee, *Multipath and Multi-transmitter Interference in Spread-Spectrum Communication and Navigation Systems*, Delft University, 1995.
- [4] B.H. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and J. Collins, *Global Positioning System Theory and Practice*,



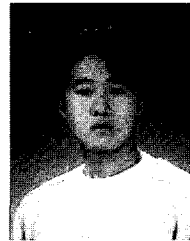
Springer-Verlag, Wien, 1993.

- [5] 박순, 임영재, 박찬식, "고의 잡음의 제거를 고려한 GPS 항법 알고리즘의 개발," 자동제어학술대회논문집, 용인, 2000.
- [6] B. W. Parkinson and J. J. Spilker, *Global Positioning System : Theory and Applications Vol. I, II*, AIAA, Washington, 1996.
- [7] J.A. Klobuchar, "Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronics System*, vol. 23, no. 3, 1987.
- [8] Y.C. Lee, "New concept for independent GPS integrity monitoring," *NAVIGATION : Journal of the Institute of Navigation*, vol. 35, no. 2, 1988.
- [9] B.W. Parkinson and P. Axelrad, "Autonomous GPS integrity monitoring using the pseudorange residual," *NAVIGATION : Journal of the Institute of Navigation*, vol. 35, no. 2, 1988.
- [10] M.A Sturza, "Navigation system integrity monitoring using redundant measurements," *NAVIGATION : Journal of the Institute of Navigation*, vol. 35, no. 4, 1988.
- [11] R. Kelly, "Derivation of the RAIM algorithm from first principles with performance comparisons between published algorithms," *ION National Technical Meeting*, San Diego, 1996.
- [12] F. Van Diggelen and A. Brown, "Mathematical aspects of GPS RAIM," *Proceedings of the IEEE Position Location And Navigation Symposium*, Las Vegas, Nevada, 1994.



**최재열**

2001년 충북대학교 전기전자공학부 졸업. 2001~현재 충북대학교 대학원 제어계측공학과 석사과정 재학 중. 관심분야는 항법. RTOS, Pseudolite.



**박순**

2000년 충북대학교 전기전자공학부 졸업. 2002년 충북대학교 대학원 제어계측공학과 석사 졸업. 현재 (주)파인디지털 재직 중. 관심분야는 항법 시스템. RTOS.



**박찬식**

1984년 서울대학교 제어계측공학과 졸업. 1986년 서울대학교 제어계측공학과 석사 졸업. 1997년 서울대학교 제어계측공학과 박사 졸업. 1984~1997년 삼성전자 정보통신 책임연구원. 1997~현재 충북대학교 전기전

자공학부조교수. 관심분야는 항법시스템. GPS반송파 위상을 이용한 정밀측위 및 자세결정시스템, ITS (Intelligent Transportation System), 실시간 제어 등.