

고도를 고정한 GNSS 위치 결정 기법에서 고도 오차의 영향

The Effect of Altitude Errors in Altitude-aided Global Navigation Satellite System(GNSS)

조성룡* · 한영훈** · 김상식*** · 문제형§ · 이상정§§ · 박찬식†
(SungLyong Cho · Young Hoon Han · SangSik Kim · JeiHyeong Moon ·
Sang Jeong Lee · Chansik Park)

Abstract - This paper analyzed the precision and accuracy of the altitude-aided GNSS using the altitude information from digital map. The precision of altitude-aided GNSS is analysed using the theoretically derived DOP. It is confirmed that the precision of altitude-aided GNSS is superior to the general 3D positioning method. It is also shown that the DOP of altitude-aided GNSS is independent of altitude bias error while the accuracy was influenced by the altitude bias error. Furthermore, it is shown that, since the altitude bias error influenced differently to each pseudorange measurement, the effect of the altitude bias error is more serious than clock bias error which does not influence position error at all. The results are evaluated by the simulation using the commercial RF simulator and GPS receiver. It confirmed that altitude-aided GNSS could improve not only precision but also accuracy if the altitude bias error are small. These results are expected to be easily applied for the performance improvement to the land and maritime applications.

Key Words : GNSS, Accuracy, Precision, Dilution of precision(DOP), Altitude-aided, Bias error

1. 서 론

일반적으로 GNSS(Global Navigation Satellite Systems)는 항법을 위해서 최소한 4개 이상의 위성신호가 필요하다[1]. 육상 교통 환경에서는 주변의 가로수, 빌딩, 다리 밑 등에 의해서 가시위성 수가 부족한 경우가 종종 발생한다. 위성의 수가 3개 이하인 경우에는 일반적인 위치 결정이 불가능하여 가상 위성을 사용한 기법, 수신기 시계 고정법, 고도 고정법 등에 대하여 연구가 수행 되었다[2]. 가상 위성의 사용 기법은 항체의 움직임이 적을 경우 직전의 가시위성 정보를 이용하여 가상 위성을 생성하고 위치를 결정하는 기법이다[2]. 수신기 시계 고정법은 수신기의 시계오차가 급격하게 변하지 않는 특성을 이용하여 기존에 구한 시계 오차를 유지하여 위치를 결정하는 기법이다[3]. 고도 고정법은 사용자가 잘 알고 있는 고도 값을 고정하여 사용자의 위치를 결정하는 기법이다[4]. 최근에는 위성수가 충분한 경우에도 정확한 수신기 시계 정보 혹은 고도 정보를 이용한 항법 성능 향상에 대한 연구가 수행되고 있다. 원자시계의 정확도 향상 및 소형화로 GNSS 수신기에서 수신기 시계 고정법에 대한 영향 분석이 활발히 이뤄지고 있다[5]. 또한 3차원

GIS(Geographic Information System) 및 지도 데이터 기술의 발달로 육상 교통이나 해양 분야에서는 고도 정보를 쉽게 이용할 수 있어 고도 고정법에 대한 관심이 증대되고 있다[6].

육상 교통이나 해양 분야에서 GNSS 사용자는 도로나 해수면을 주로 이동하기 때문에 고도 정확도 보다는 수평 위치에 대한 정확도 향상을 요구한다. 육상 교통 환경의 디지털 지도는 약 5~10m 정도의 바이어스 오차를 가지며 해상에서의 선박의 고도는 조수에 따라 최대 약 5m 정도 바이어스 오차가 발생한다[7][8]. 결국, 고도 변화가 적고 바이어스 오차가 주요 요인인 육상 교통이나 해양분야에서는 지도 정보로부터의 고도 정보를 이용한 사용자의 수평 위치 정확도 향상을 기대할 수 있다.

본 논문에서는 고도 고정 위치결정 기법에서 고도 정보 오차에 따른 항법 시스템의 정밀도를 DOP(Dilution of Precision)을 이용하여 이론적으로 분석하고, 고도 바이어스 오차가 미치는 영향을 정확도 분석을 통하여 확인하였다. 유도된 결과는 상용 RF 시뮬레이터를 이용하여 생성된 신호를 이용하여 일반적인 3차원 위치 결정기법과 고도 고정법의 성능을 비교 분석하였다. 본 논문의 구성은 2장에서 일반적인 3차원 위치 결정 기법을 설명하고 3장에서 고도 고정법을 설명하였다. 4장에서는 고도 정보의 바이어스 오차에 따른 영향을 이론적으로 분석하고 5장에서 시뮬레이션 기반으로 검증하였다.

2. 일반적인 3차원 위치 결정 기법

위성 i 에 대한 GNSS 코드 측정치(Ψ_i)는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다[1].

* 정 회 원 : 충남대 공과대학 전자공학과 박사과정
** 준 회 원 : 충남대 공과대학 전자공학과 석사과정
*** 준 회 원 : 충북대 전자정보대학 제어로봇공학과 석사과정
§ 준 회 원 : 충북대 전자정보대학 제어로봇공학과 석사과정
§§ 정 회 원 : 충남대 공과대학 전자공학과 교수
† 교신저자, 정회원 : 충북대 전자정보대학 제어로봇공학과 교수

E-mail : chansp@cbu.ac.kr

접수일자 : 2012년 6월 14일

최종완료 : 2012년 8월 5일

$$\Psi_i = d_i + cB + v_i \sim N(0, \sigma_p^2) \quad (1)$$

여기서 d_i 는 위성(X_i, Y_i, Z_i)과 사용자(x, y, z) 사이의 거리, cB 는 수신기 시계 오차(B)에 광속(c)이 곱해진 값, v_i 는 측정 잡음으로 평균 0, 표준편차 σ_p 를 갖는 AWGN(Additive White Gaussian Noise)로 가정한다. 식 (1)의 코드 측정치를 선형화 기준점 $A_0 = [x_0 \ y_0 \ z_0]^T$ 에서 선형화하면 다음을 얻는다.

$$\rho_i \equiv \Psi_i - d_{i0} = \begin{bmatrix} h_{xi} & h_{yi} & h_{zi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix} + cB + v_i = h_i^T \delta u + cB + v_i \quad (2)$$

여기서 $d_{i0} = \sqrt{(X_i - x_0)^2 + (Y_i - y_0)^2 + (Z_i - z_0)^2}$ 는 알고 있는 위성 위치와 선형화 기준점 사이의 계산된 거리, $h_i^T = \left[\frac{X_i - x_0}{d_{i0}} \ \frac{Y_i - y_0}{d_{i0}} \ \frac{Z_i - z_0}{d_{i0}} \right]$ 는 시선(LOS : Line Of Sight) 벡터, δu 는 3차원 위치 오차 벡터($\delta x, \delta y, \delta z$)를 나타낸다. m 개의 위성에 대하여 식 (3)의 벡터 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$\rho = H_{3yc} \delta u + cB + v = \begin{bmatrix} H_{3yc} & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta u \\ cB \end{bmatrix} + v \quad (3)$$

여기서 $\rho = [\rho_1 \ \dots \ \rho_m]^T$, $H_{3yc} = \begin{bmatrix} h_{x1} & h_{y1} & h_{z1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{xm} & h_{ym} & h_{zm} \end{bmatrix}$, $r = [1 \ \dots \ 1]^T$, $v = [v_1 \ \dots \ v_m]^T \sim N(0, Q_p)$, $Q_p = \sigma_p^2 I_m$ 이고 I_m 는 $m \times m$ 항등 행렬을 나타낸다. $m \geq 4$ 인 경우 가중최소자승법(weighted least squares estimation)을 식 (3)에 적용하여 식(4)의 해와 식 (5)의 공분산을 얻는다. 여기서 하첨자 3D는 일반적인 3차원 위치 결정 기법으로 구해진 해임을 나타낸다[5].

$$\begin{bmatrix} \delta \hat{u} \\ c \hat{B} \end{bmatrix}_{3D} = \begin{bmatrix} H_{3yc} & r \end{bmatrix}^T Q_p^{-1} \begin{bmatrix} H_{3yc} & r \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} H_{3yc} & r \end{bmatrix}^T Q_p^{-1} \rho \quad (4)$$

$$\text{cov} \left(\begin{bmatrix} \delta \hat{u} \\ c \hat{B} \end{bmatrix}_{3D} \right) = \begin{bmatrix} H_{3yc} & r \end{bmatrix}^T Q_p^{-1} \begin{bmatrix} H_{3yc} & r \end{bmatrix}^{-1} = \sigma_p^2 \begin{bmatrix} H_{3yc} & r \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} H_{3yc} & r \end{bmatrix}^{-1} \quad (5)$$

식 (5)로부터 식 (6), (7), (8)의 관계를 얻는다. DOP은 $XDOP = \sqrt{\text{tr}\{M_X\}}$ 로 정의되며 GDOP(Geometry DOP)은 식 (6)의 M_G , PDOP(Position DOP)은 식 (7)의 M_P , TDOP(Time DOP)은 식 (8)의 M_T 를 이용하여 정의된다.

$$M_G = \begin{bmatrix} H_{3yc} & r \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} H_{3yc} & r \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} H_{3yc}^T H_{3yc} & H_{3yc}^T r \\ r^T H_{3yc} & m \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} M_P & \dots \\ \dots & M_T \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$M_P = (H_{3yc}^T H_{3yc} - \frac{H_{3yc}^T r r^T H_{3yc}}{m})^{-1} = (H_{3yc}^T H_{3yc})^{-1} + \frac{(H_{3yc}^T H_{3yc})^{-1} H_{3yc}^T r r^T H_{3yc} (H_{3yc}^T H_{3yc})^{-1}}{m - r^T H_{3yc} (H_{3yc}^T H_{3yc})^{-1} H_{3yc}^T r} \quad (7)$$

$$M_T = \frac{1}{m - r^T H_{3yc} (H_{3yc}^T H_{3yc})^{-1} H_{3yc}^T r} \quad (8)$$

3. 고도 정보를 이용한 고도 고정법

도로나 해양에서의 항법은 고도 변화가 적어 이전 시점의 고도 정보를 이용한 고도 고정법을 이용할 수 있다. ECDIS(Electronic Chart Display and Information System)나 차량용 네비게이터에 내장된 3차원 지도 데이터로부터 고도 정보를 얻을 수 있다면 고도를 고정시키고 위치 해를 구할 수 있으므로 위치 정확도를 향상시킬 수 있다. 이 경우 고도 정보에 포함된 오차가 구해진 위치에 영향을 미치며 일반적으로 바이어스 오차가 주요 오차로 큰 경우 10m 정도의 크기를 갖는 것으로 알려져 있다[6]. 고도 정보를 이용하여 고정된 고도(z_F)는 식 (9)로 나타낼 수 있다. 여기서 z_T 는 참 고도 값, z_B 는 바이어스 오차이다.

$$z_F = z_T + z_B \quad (9)$$

이 장에서는 고도 바이어스가 없는 경우 고도 고정법으로 구한 위치와 2장의 일반적인 3차원 위치결정 기법으로 구한 위치 해의 성능을 비교하였다. 식 (9)의 참 고도 정보를 이용한 선형화 기준점을 $A_{0T} = [x_0 \ y_0 \ z_T]^T$ 로 사용하면 식 (10)의 선형화된 식을 얻는다.

$$\rho_i \equiv \Psi_i - d_{i0T} = h_{xi} \delta x + h_{yi} \delta y + h_{zi} (z_B) + cB + v_i \quad (10)$$

여기서 d_{i0T} 는 위성과 참 고도 정보를 이용하여 구한 선형화 기준점 사이의 계산된 거리를 나타낸다. 고도 오차가 전혀 없는 경우, 즉 $z_B = 0$ 인 경우, m 개의 위성이 관측된다면 식 (11)의 벡터 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$\rho = H_{2yc} \delta xy + cB + v = \begin{bmatrix} H_{2yc} & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta xy \\ cB \end{bmatrix} + v \quad (11)$$

여기서 $H_{2yc} = \begin{bmatrix} h_{x1} & h_{y1} \\ \vdots & \vdots \\ h_{xm} & h_{ym} \end{bmatrix}$, $\delta xy = \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \end{bmatrix}$ 를 나타낸다. $m \geq 4$ 인 경우 가중최소자승법을 식 (11)에 적용하여 식 (12)의 해와 식 (13)의 공분산을 얻는다. 여기서 하첨자 N는 고도 정보 오차가 없이 고도 고정법으로 구해진 해임을 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} \delta \hat{xy} \\ c \hat{B} \end{bmatrix}_N = \begin{bmatrix} H_{2yc} & r \end{bmatrix}^T Q_p^{-1} \begin{bmatrix} H_{2yc} & r \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} H_{2yc} & r \end{bmatrix}^T Q_p^{-1} \rho \quad (12)$$

$$\text{cov} \left(\begin{bmatrix} \delta \hat{xy} \\ c \hat{B} \end{bmatrix}_N \right) = \begin{bmatrix} H_{2yc} & r \end{bmatrix}^T Q_p^{-1} \begin{bmatrix} H_{2yc} & r \end{bmatrix}^{-1} = \sigma_p^2 \begin{bmatrix} H_{2yc} & r \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} H_{2yc} & r \end{bmatrix}^{-1} \quad (13)$$

고도 정보에 오차가 없는 고도 고정법의 DOP도 $XDOP = \sqrt{\text{tr}\{N_X\}}$ 으로 정의할 수 있으며, 고도가 빠진 HTDOP(Horizontal Time DOP)은 식 (14)와 같이 정의할 수 있다.

$$N_{HT} = \begin{bmatrix} H_{2yc} & r \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} H_{2yc} & r \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} H_{2yc}^T H_{2yc} & H_{2yc}^T r \\ r^T H_{2yc} & m \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} N_H & \dots \\ \dots & N_T \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$N_H = (H_y^T H_y - \frac{H_y^T r r^T H_y}{m})^{-1} = (H_y^T H_y)^{-1} + \frac{(H_y^T H_y)^{-1} H_y^T r r^T H_y (H_y^T H_y)^{-1}}{m - r^T H_y (H_y^T H_y)^{-1} H_y^T r} \quad (15)$$

$$N_T = \frac{1}{m - r^T H_y (H_y^T H_y)^{-1} H_y^T r} \quad (16)$$

고도 고정법의 DOP과 일반적인 3차원 위치 결정기법의 DOP을 비교하기 위하여 식 (3)을 이용한다. 이를 위하여 식 (3)에서 고도 오차와 시계 바이어스 오차의 위치를 변경하여 선형화된 벡터 행렬식은 식 (17)과 같다.

$$\rho = [H_{yy} \quad r] \begin{bmatrix} \delta u \\ cB \end{bmatrix} + v = [H_{yy} \quad r \quad h_z] \begin{bmatrix} \delta xy \\ cB \\ \delta z \end{bmatrix} + v \quad (17)$$

표현을 단순화하기 위하여 $[H_{yy} \quad r] = G_y$, $[H_{yy} \quad r \quad h_z] = G$ 로 정의하고, 식 (17)에 가중 최소자승법을 적용하여 구한 해와 공분산은 식 (18), (19)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \delta \hat{xy} \\ c\hat{B} \\ \delta \hat{z}_{3D} \end{bmatrix} = (G^T Q_p^{-1} G)^{-1} G^T Q_p^{-1} \rho = (G^T G)^{-1} G^T \rho \quad (18)$$

$$\text{cov} \left(\begin{bmatrix} \delta \hat{xy} \\ c\hat{B} \\ \delta \hat{z}_{3D} \end{bmatrix} \right) = (G^T Q_p^{-1} G)^{-1} = \sigma_p^2 (G^T G)^{-1} \quad (19)$$

식 (18)에 $G = [G_y \quad h_z]$ 를 대입하여 정리하면 DOP 행렬은 다음 식 (20)과 같다. 여기서 $\Delta = h_z^T h_z - h_z^T G_y (G_y^T G_y)^{-1} G_y^T h_z$ 이다.

$$M_G = (G^T G)^{-1} = \begin{bmatrix} G_y^T G_y & G_y^T h_z \\ h_z^T G_y & h_z^T h_z \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} (G_y^T G_y - \frac{G_y^T h_z h_z^T G_y}{h_z^T h_z})^{-1} & -(G_y^T G_y)^{-1} G_y^T h_z \Delta^{-1} \\ -\Delta^{-1} h_z^T G_y (G_y^T G_y)^{-1} & \Delta^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{HT} & \\ & M_Z \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$M_{HT} = (G_y^T G_y - \frac{G_y^T h_z h_z^T G_y}{h_z^T h_z})^{-1} = (G_y^T G_y)^{-1} + \frac{(G_y^T G_y)^{-1} G_y^T h_z h_z^T G_y (G_y^T G_y)^{-1}}{h_z^T h_z - h_z^T G_y (G_y^T G_y)^{-1} G_y^T h_z} \quad (21)$$

이제 식 (14)와 (21)를 이용하여 고도 고정법과 일반적인 3차원 위치결정기법의 성능을 비교할 수 있다. 식(14)와 (21)로부터 $\text{tr}(M_{HT}) \geq \text{tr}(N_H)$ 를 얻으며 이는 고도 오차가 없는 고도 고정법의 정밀도가 일반적인 3차원 위치결정 기법에

비하여 $\frac{(G_y^T G_y)^{-1} G_y^T h_z h_z^T G_y (G_y^T G_y)^{-1}}{h_z^T h_z - h_z^T G_y (G_y^T G_y)^{-1} G_y^T h_z}$ 만큼 더 정밀한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 또 일반적인 3차원 위치결정 기법의 해인 식 (18)을 정리하면 다음을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \delta \hat{xy} \\ c\hat{B} \\ \delta \hat{z}_{3D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (G_y^T G_y - \frac{G_y^T h_z h_z^T G_y}{h_z^T h_z})^{-1} G_y^T \rho - \frac{(G_y^T G_y)^{-1} G_y^T h_z h_z^T \rho}{\Delta} \\ \frac{h_z^T (I - G_y (G_y^T G_y)^{-1} G_y^T)}{\Delta} \rho \end{bmatrix} \quad (22)$$

고도 고정법으로 구한 해인 식 (12)와 비교하면 식 (23)의 관계를 얻는다. 식 (23)은 오차가 없는 고도 고정법을 이용

한 위치가 $(G_y^T G_y)^{-1} G_y^T h_z \delta \hat{z}$ 만큼 오차가 보상되어 정확도가 향상됨을 알 수 있다. 여기서 $\delta \hat{z}$ 는 일반적인 3차원 위치결정기법에서 구한 고도 오차를 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} \delta \hat{xy} \\ c\hat{B} \end{bmatrix}_N = (G_y^T G_y)^{-1} G_y^T \rho - (G_y^T G_y)^{-1} G_y^T h_z \delta \hat{z} = \begin{bmatrix} \delta \hat{xy} \\ c\hat{B} \end{bmatrix}_{3D} - (G_y^T G_y)^{-1} G_y^T h_z \delta \hat{z} \quad (23)$$

이상을 정리하면 고도 오차가 없는 경우에 대한 고도 고정법은 식 (21), (23)에서와 같이 일반적인 3차원 위치 결정기법에 비해 정밀도와 정확도가 향상됨을 확인할 수 있다.

4. 고도 바이어스 오차의 영향

지도 정보에 고도 바이어스 오차가 있는 경우, 즉 $z_B \neq 0$ 인 경우, 선형화된 측정치 식 (11)은 다음과 같이 변경된다.

$$\rho = H_y \delta xy + h_z z_B + cB + v = G_y \begin{bmatrix} \delta xy \\ cB \end{bmatrix} + \varepsilon_B \quad (24)$$

여기서 $\varepsilon_B = h_z z_B + v$ 는 고도 정보 이용에 따라 증가한 측정 잡음을 나타내며 평균은 $h_z z_B$, 공분산은 $\text{cov}(\varepsilon_B) = \sigma_p^2 I = Q_p$ 이다. 식 (24)에 가중 최소자승법을 적용하면 식 (25)의 해와 식(26)의 공분산을 얻는다. 여기서 하첨자 B는 고도 바이어스 오차가 있는 경우 고도 고정법으로 구한 해임을 나타낸다. 이 경우 가중치 행렬이 바이어스 오차가 없는 경우와 같으므로 식(12), 식(13)과 같음을 알 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \delta \hat{xy} \\ c\hat{B} \end{bmatrix}_B = [H_y \quad r]^T Q_p^{-1} [H_y \quad r]^{-1} [H_y \quad r]^T Q_p^{-1} \rho \quad (25)$$

$$\text{cov} \left(\begin{bmatrix} \delta \hat{xy} \\ c\hat{B} \end{bmatrix}_B \right) = \sigma_p^2 [H_y \quad r]^T [H_y \quad r]^{-1} \quad (26)$$

고도 바이어스 오차가 위치 정밀도와 수신기 시계 오차에 미치는 영향을 분석하기 위하여 식 (25)와 (26)을 다음의 식 (27), (28)로 변경한다. 여기서, 고정 정보에 바이어스 오차가 포함된 고도 고정법의 DOP은 $\sqrt{\text{tr}\{B_x\}}$ 으로 정의되며 HTDOP은 식(28)의 B_{HT} , HDOP은 식 (29)의 B_H , TDOP은 식 (30)의 B_T 를 이용하여 정의할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \delta \hat{xy} \\ c\hat{B} \end{bmatrix}_B = \begin{bmatrix} (H_y^T H_y - \frac{H_y^T r r^T H_y}{m})^{-1} H_y^T \rho - \frac{(H_y^T H_y)^{-1} H_y^T r r^T \rho}{\Delta} \\ \frac{r^T H_y (H_y^T H_y)^{-1} H_y^T \rho + r^T \rho}{\Delta} \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$B_{HT} = \begin{bmatrix} (H_y^T H_y - \frac{H_y^T r r^T H_y}{m})^{-1} & -\frac{(H_y^T H_y)^{-1} H_y^T r}{\Delta} \\ -\frac{r^T H_y (H_y^T H_y)^{-1}}{\Delta} & \frac{1}{\Delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_H & B_w \\ B_n & B_T \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$B_H = (H_y^T H_y)^{-1} + \frac{(H_y^T H_y)^{-1} H_y^T r r^T H_y (H_y^T H_y)^{-1}}{m - r^T H_y (H_y^T H_y)^{-1} H_y^T r} \quad (29)$$

$$B_T = \frac{1}{\Delta} = \frac{1}{m - r^T H_y (H_y^T H_y)^{-1} H_y^T r} \quad (30)$$

식 (14), (21), (28)로부터 $tr(N_{rr})=tr(B_{rr})\leq tr(M_{rr})$, 고도 고정법의 경우 즉 고도 바이어스 오차는 정밀도에는 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있다. 고도 바이어스 오차의 영향을 해석하기 위하여 바이어스 오차가 포함된 식 (31)의 의사거리 측정치를 고려한다. 여기서 ρ_0 는 오차가 없는 경우의 의사거리 측정치를 나타낸다.

$$\rho = \rho_0 + h_z z_B \tag{31}$$

식 (31)를 이용하여 해를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \delta \hat{y}_B &= \left[(H_{xy}^T H_{xy} - \frac{H_{xy}^T r r^T H_{xy}}{m})^{-1} H_{xy}^T - \frac{(H_{xy}^T H_{xy})^{-1} H_{xy}^T r r^T}{\nabla} \right] (\rho_0 + h_z z_B) \\ &= \delta \hat{y}_{B0} + \delta \hat{y}_{BA} \end{aligned} \tag{32}$$

식 (32)에서 고도 바이어스 오차의 영향으로 발생하는 $\delta \hat{y}_{BA}$ 는 다음과 같이 정리 된다.

$$\begin{aligned} \delta \hat{y}_{BA} &= \left[(H_{xy}^T H_{xy} - \frac{H_{xy}^T r r^T H_{xy}}{m})^{-1} H_{xy}^T - \frac{(H_{xy}^T H_{xy})^{-1} H_{xy}^T r r^T}{\nabla} \right] h_z z_B \\ &= \left[(H_{xy}^T H_{xy})^{-1} H_{xy}^T h_z - \frac{r^T [I - H_{xy} (H_{xy}^T H_{xy})^{-1} H_{xy}^T] h_z}{\nabla} (H_{xy}^T H_{xy})^{-1} H_{xy}^T r \right] z_B \end{aligned} \tag{33}$$

같은 방법으로 고도 바이어스 오차의 영향으로 발생하는 수신기 시계오차 $c\hat{B}_{BA}$ 을 구하면 다음과 같다.

$$c\hat{B}_{BA} = \frac{r^T [I - H_{xy} (H_{xy}^T H_{xy})^{-1} H_{xy}^T] h_z}{\nabla} z_B \tag{34}$$

식 (34)를 이용하면 식 (33)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta \hat{y}_{BA} &= \left[(H_{xy}^T H_{xy})^{-1} H_{xy}^T h_z z_B - c\hat{B}_{BA} (H_{xy}^T H_{xy})^{-1} H_{xy}^T r \right] \\ &= (H_{xy}^T H_{xy})^{-1} H_{xy}^T (h_z z_B - c\hat{B}_{BA} r) \end{aligned} \tag{35}$$

식 (35)와 (34)는 고도 정보에 포함된 바이어스 오차가 고도 고정법의 위치 오차와 수신기 시계 오차에 미치는 영향을 나타낸다. 여기서 만약 $h_z = r$ 을 가정한다면 즉 고도 바이어스 오차가 모든 위성에 동일한 크기로 영향을 준다면, 이는 수신기 시계 바이어스와 같은 효과로 나타난다. 즉 이 경우 식 (34)와 식 (35)는 다음과 같이 계산된다. 이는 $h_z = r$ 인 경우에는 고도 정보에 포함된 고도 바이어스 오차 z_B 는 수신기 시계오차와 같은 특성으로 수신기 시계 오차에만 반영되고, 위치 오차에는 반영되지 않음을 나타낸다.

$$c\hat{B}_{BA}(r) = \frac{r^T [I - H_{xy} (H_{xy}^T H_{xy})^{-1} H_{xy}^T] r}{\nabla} z_B = z_B \tag{36}$$

$$\delta \hat{y}_{BA}(r) = (H_{xy}^T H_{xy})^{-1} H_{xy}^T (z_B r - z_B r) = 0 \tag{37}$$

5. 성능 검증

5.1 실험 환경

본 논문에서는 Spirent 사의 RF 시뮬레이터 GSS8000을 이용하여 GNSS RF(Radio Frequency) 신호를 생성하였다 [9]. RF 신호는 고도 바이어스 오차에 의한 영향만을 확인하기 위해서 이온층과 대류층 오차는 포함시키지 않았다. 상용 수신기인 NovAtel 사의 Propark-V3를 이용하여 RF 신호를 수신하였다[10]. 측정치는 RINEX(Receiver Independent Exchange Format) 파일로 저장하여 위치 결정 기법에 따른 성능을 확인하였다. 성능 분석을 위한 실험 환경은 그림 1과 같다.

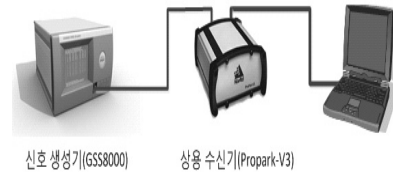


그림 1 실험환경

Fig. 1 Test environment

2012년 1월 10일 0시 3분 0초부터 수신기의 위치는 위도 (36°), 경도(127°), 고도(100m)로 RF 신호를 생성하였으며, 1Hz의 샘플링으로 400 epoch 측정치를 수집하였다. 실험 시간 동안 가시위성은 9개(PRN : 1, 4, 7, 8, 11, 17, 20, 27, 28)이며 GDOP은 약 3.6임을 확인하였다. 가시위성 및 GDOP은 그림 2와 같다.

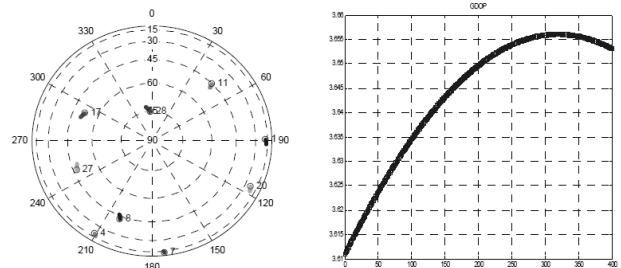


그림 2 위성 배치 및 GDOP

Fig. 2 Satellite constellation and GDOP

5.2 정밀도 분석

고도 고정법의 정밀도 분석을 위하여 일반적인 3차원 위치 결정 기법과 고도 고정법에 대하여 수평면의 정밀도는 HDOP으로 수신기 시계 오차 정밀도는 TDOP으로 확인하였다. 그림 3에 HDOP 과 TDOP을 나타내었다. 그림에서 일반적인 3차원 위치 결정기법(3D)보다 고도 바이어스 오차가 포함되지 않은 고도 고정법(AF)의 DOP 값이 작아 정밀도가 우수한 것을 확인할 수 있다.

그림 4에 고도 바이어스 오차에 따른 정밀도를 나타내었다. 그림에서 고도 바이어스 오차는 3장에서 예측한 바와 같이 DOP에 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있다.

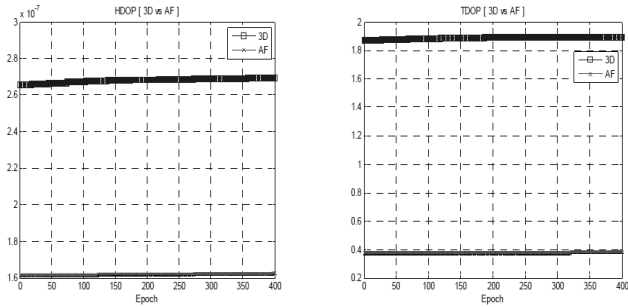


그림 3 위치결정 기법에 따른 DOP(좌 : HDOP, 우 : TDOP)
 Fig. 3 DOP of each navigation methods(Left : HDOP, Right : TDOP)

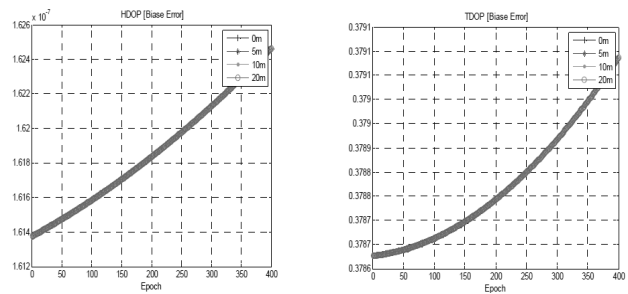


그림 4 고도 바이어스 오차에 따른 DOP(좌 : HDOP, 우 : TDOP)
 Fig. 4 DOP of each altitude bias errors(Left : HDOP, Right : TDOP)

5.3 정확도 분석

고도 고정법의 정확도 분석을 위하여 일반적인 3차원 위치 결정 기법과 고도 고정법에 대하여 수평 정확도와 수신기 시계 오차를 확인하였다. 그림 5에서 수평 정확도인 X축과 Y축의 위치 오차는 일반적인 3차원 위치 결정기법(3D)보다 고도 바이어스 오차가 포함되지 않은 고도 고정법(AF)의 성능이 월등히 우수한 것을 확인하였다. 수신기 시계 오차는 일반적인 위치 결정기법과 고도 고정법이 유사한 성능을 나타내었다.

그림 6에 바이어스 오차에 따른 고도 고정법의 항법 오차를 나타내었다. 그림에서 바이어스 오차의 크기와 위치오차, 수신기 시계오차의 크기가 비례함을 확인할 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 가시위성의 수가 부족한 경우에 사용되던 고도 고정법을 가시위성의 수가 충분한 경우에도 전차지도나 ECDIS 등 외부에서 제공하는 고도 정보를 이용하여 위치 해의 성능을 향상시킬 수 있음을 보였다. 고도 고정법의 정밀도는 이론적으로 유도한 DOP로 해석하였으며 일반적인 3차원 위치 결정 기법에 비하여 향상됨을 보였다. 또한 고도 정보에 포함될 수 있는 바이어스 오차에 대해서도 정밀도는 영향을 받지 않음을 보였다. 반면 고도 고정법으로 구한 해의 정확도는 바이어스 오차에 영향을 받으며, 위성 별로 그 영향이 다르게 작용하므로 위치와 시계오차 모두 영향을 받음을 보였다. 상용 RF 시뮬레이터와 GPS 수신기를 이용하여 수행한 시험에서 고도 정보에 포함되는 바이어스

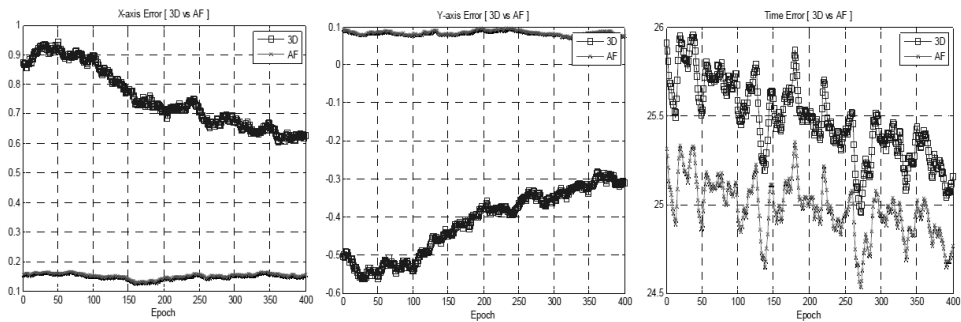


그림 5 위치결정 기법에 따른 항법 오차
 Fig. 5 Position error of each navigation methods

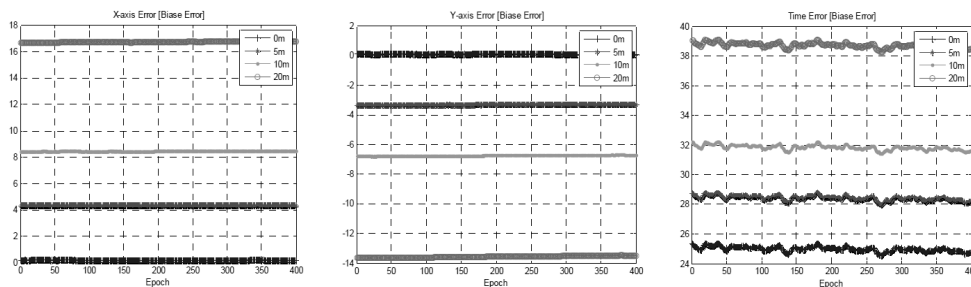


그림 6 고도 바이어스 오차에 따른 항법 오차
 Fig. 6 Position error of each altitude bias errors

오차를 최소화하면 고도 고정법을 적용하여 정밀도뿐 아니라 정확도도 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 이 결과는 평면에서 운항하는 육상 및 해양 분야의 응용에 성능 향상을 위하여 쉽게 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 위성항법기반 교통인프라 기술개발의 연구비지원(06교통핵심A03)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] Elliot D.Kaplan, Understanding GPS Principles and Applications, Artech House, pp. 322-334, 1996.

[2] 박찬식, "GPS 반송파 위상신호를 이용한 자세결정," 서울대학교 박사학위 논문, 1997.

[3] Yunlong Teng, Yibing Shi, and Zhi Zheng, "The Clock-Aided Method for GPS Receiver Positioning in Urban Environment," International Journal of Computer and Electrical Engineering, vol. 3, no. 3, June 2011.

[4] Yiu, K. P., R. Crawford, and R. Eschenbach, "A low cost GPS receiver for land navigation," Navigation, vol. 9, no. 3, pp. 207-220, 1982.

[5] Sung-Hoon Yang, Chang Bok Lee, Moon Beom Heo, Eunsung Lee, Sang Jeong Lee, and Chansik Park, "Analysis of a clock-aided global navigation satellite system(GNSS)," Meas. Sci. Technol., Vol. 22, no. 3, Pp35104-35110, March. 2011.

[6] 박세환, "3차원 GIS 및 지도 데이터 기술 동향," 정보통신산업진흥원 주간기술동향, 2011.05.27.

[7] Masatoghi MORI, "Integration of High Resolution (10m) DEM with Geographic Information Systems," Proceedings. 2003 IEEE International, vol. 1, pp. 53-55, July, 2003

[8] 유무성, 김지영, 강금석, 이준신, "해상풍력 실증단지 기상타워 구축사례 연구," 풍력에너지저널, 제 2권, 제 2호, 2011.

[9] <http://www.spirent.com/Solutions-Directory/GSS8000>

[10] <http://www.novatel.com/products/span-gnss-inertial-systems/span-enclosures/propak-v3/>

저 자 소 개



조 성 룡 (曹 成 龍)

1981년 6월 20일생. 2008년 충남대학교 전기정보통신공학부 졸업. 2010년 충남대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2010년-현재 동 대학원 전자전파정보통신공학과 박사과정.

Tel : 042-825-3991

E-mail : jackycho@cnu.ac.kr



한 영 훈 (韓 永 勳)

1985년 7월 18일생. 2010년 충남대학교 전기정보통신공학부 졸업. 2010년-현재 동 대학원 전자전파정보통신공학과 석사과정.

Tel : 042-825-3991

E-mail : noranna@cnu.ac.kr



김 상 식 (金 翔 植)

1986년 6월 25일생. 2011년 충북대학교 전자공학부 졸업. 2011년-현재 동 대학원 제어로봇공학과 석사과정.

Tel : 043-264-3259

E-mail : hosasy49@cbnu.ac.kr



문 제 형 (文 濟 馨)

1986년 2월 15일생. 2011년 충북대학교 전자공학부 졸업. 2011년-현재 동 대학원 제어로봇공학과 석사과정.

Tel : 043-264-3259

E-mail : jhmoon@cbnu.ac.kr

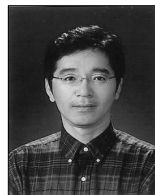


이 상 정 (李 相 禎)

1957년 8월 15일생. 1979년 서울대학교 전자공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사) 1987년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(박사) 1987년-현재 충남대학교 교수.

Tel : 042-821-6582

E-mail : eesjl@cnu.ac.kr



박 찬 식 (朴 贊 植)

1961년 10월 1일생. 1984년 서울대학교 제어계측공학과 졸업. 1986년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 1984년-1997년 삼성전자 연구원. 1997년 서울대학교 제어계측공학과 졸업(박사). 1997년-현재 충북대학교 교수.

Tel : 043-261-3259

E-mail : chansp@cbnu.ac.kr