대류권 지연이 이중차분법을 이용한 GPS 측위에 미치는 영향

Impact of Tropospheric Delays on the GPS Positioning with Double-difference Observables

홍창기¹⁾

Hong, Chang-Ki

Abstract

In general, it can be assumed that the tropospheric effect are removed through double-differencing technique in short-baseline GPS data processing. This means that the high-accuracy positioning can be obtained because various error sources can be eliminated and the number of unknown can be decreased in the adjustment computation procedure. As a consequence, short-baseline data processing is widely used in the fields such as deformation monitoring which require precise positioning. However, short-baseline data processing is limited to achieve high positioning accuracy when the height difference between the reference and the rover station is significant.

In this study, the effects of tropospheric delays on the determination of short-baseline is analyzed, which depends on the orientation of baseline. The GPS measurements which include tropospheric effect and measurement noises are generated by simulation, and then rover coordinates are computed by short-baseline data processing technique. The residuals of rover coordinates are analyzed to interpret the tropospheric effect on the positioning. The results show that the magnitudes of the biases in the coordinate residuals increase as the baseline length gets longer. The increasing rate is computed as 0.07cm per meter in baseline length. Therefore, the tropospheric effects should be carefully considered in short-baseline data processing when the significant height difference between the reference and rover is observed.

Keywords : GPS, Short-baseline, Tropospheric effect, Deformation monitoring

초 록

일반적으로 GPS 데이터를 이용하여 단기선 처리를 하는 경우 대류권 지연 효과는 이중차분법에 의해 충분히 제거된다고 가정을 한다. 따라서 조정계산 모델식에서 대류권 지연 효과에 대한 미지수를 설정하지 않아도 되기 때문에 계산이 용이하다는 장점과 각종 오차요인의 제거로 인해 상대적으로 높은 측위정확도의 확보가 가능하다. 즉, 변위 모니터링 등 정밀측위가 요구되는 응용분야에서는 단기선 처리를 기반으로 하는 경우가 일반적이다. 하지만 기준국과 이동국의 높이 차이가 존재하는 경우 이중차분법을 사용하더라도 대류권 지연 효과가 충분히 제거되지 않기 때문에 측위정확도의 저하를 가져올 수 있다.

본 연구에서는 대류권 지연 효과가 기선의 방향에 따라 측위정확도에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 대류권 지연 효과가 포함된 GPS 관측값을 시뮬레이션(simulation)을 통해 생성한 후 이중차분법을 이용한 단기선 처리로 이동국의 좌표를 계산하였다. 계산된 이동국의 좌표잔차의 분석을 통해 기선 방향에 따른 대류권 지연 영향을 분석하였다. 분석 결과, 기준국과 이동국의 높이 차이가 증가함에 따라 좌표잔차에 편이가 발생하는 것으로 나타났으며 기선의 길이가 1m 증가함에 따라 0.07cm의 편이량이 계산되었다. 따라서 정밀측위를 위해서는 단기선일지라도 수직방향의 기선에 대해서는 대류권 지연 효과에 대한 충분한 고려가 있어야 한다.

핵심어 : GPS, 단기선, 대류권 지연 효과, 변위 모니터링

1) Corresponding Author · Member · Department of Geoinformatics Engineering, Kyungil University (E-mail:ckhong@kiu.ac.kr)

1. 서론

GPS(Global Positioning System)는 3차원 공간상에서 위치 결정을 위해 미국 국방성에서 개발한 위성항법시스템이다. 원래는 군사 목적으로 개발되었으나 현재 민간영역에도 개방되어 다양한 분야에 활용되고 있다. GPS를 이용한 측위는 응용분야에 따라 혹은 요구정밀도에 따라 다양한 방법이 사용될 수 있으며 정밀측위를 위해서는 이중차분법을 이용한 상대측위 기법이 주로 사용된다(Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2001). 기선의 길이가 긴 경우는 차분법을 사용할 지라도 대류권 지연 및 전리층 지연 효과가 충분히 제거되지 않는다. 따라서 이와 같은 상황에서는 대류권 지연 및 전리층 지연을 미지수에 포함하여 이동국(rover)의 위치를 결정하거나 외부에서 받은 대기 정보를 이용하여 관측값을 보정한 후 위치를 계산하게 된다. 단기선의 경우 기준국과 이동국의 거리가 짧기 때문에 대류권 지연 및 전리층 지연 효과는 차분법을 통해 제거가 가능하다. 따라서 정밀한 변위의 측정이 필요한 분야인 화산활동의 감시, 지반침하 혹은 용기, 산사태 감시, 구조물 모니터링 등에는 단기선을 이용한 데이터 처리가 주로 사용된다(Fujino *et al.*, 2000; Rizos *et al.*, 2000; Teferle *et al.*, 2001).

단기선의 경우라도 기준국과 이동국 사이의 높이차가 현저한 경우 차분법을 통하더라도 대류권 지연 효과가 충분히 제거되지 않을 수도 있으며 그 영향으로 인해 이동국의 측위 정확도가 저하될 수 있다(Roberts *et al.*, 2001). 전리층 지연의 경우는 전리층의 특성상 기준국과 이동국의 높이에 차이가 있더라도 기선의 길이가 짧으면 대부분 제거가 가능하다(Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2001). 하지만 대류권 지연의 경우 질소, 산소를 포함하여 대기중에 있는 수증기량에도 영향을 받기 때문에 높이 차이에 따라 그 영향이 다르게 나타날 수 있다. 따라서 단기선의 경우일지라도 수직 방향의 기선인 경우 대류권 지연에 대한 영향을 고려하여야 충분한 측위정확도의 확보가 가능하다. 이를 위해 상대적인 대류권 지연량을 미지수에 포함하여 추정하는 경우도 있으나 기선이 짧기 때문에 이동국 좌표 중 up 성분이 대류권 지연량에 해당되는 미지수와 상관관계(correlation)가 높게 나타난다(Schüler, 2001). 따라서 조정계산을 통해 두 미지수를 정확하게 서로 분리해 내는 것이 현실적으로 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해 단기선에 장기선을 하나 이상 추가하여 상관관계를 낮추는 방법이 사용되기도 하나 대류권 지연량을 미지수에 포함하여야 하기 때문에 구조가 복잡해지며 계산량도 증가하게 된다(Schüler, 2001).

따라서 본 연구에서는 단기선을 가정한 경우 기준국과 이

동국의 높이 차이로 인해 발생하는 대류권 지연 차이가 이동국의 측위에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 이를 위해 수평방향, 수직방향의 기선을 설정한 후 데이터의 시물레이션을 통해 대류권 지연 효과를 모델링 하였으며 이동국의 좌표잔차에 대한 분석을 수행하였다. 본 연구의 결과는 단기선을 이용한 정밀측위 모니터링 분야 혹은 대류권 지연 모델의 보정 등에 사용될 수 있을 것이다.

2. 연구 방법

2.1 이중차분 GPS 관측방정식

이중차분수 GPS 관측방정식은 L1 및 L2에 해당되는 코드 및 위상 관측값으로 구성되어 있으며 수신기에서 수신된 관측값에는 위성 및 수신기의 시계오차, 대류권 지연, 전리층 지연, 관측오차 등 다양한 오차 요인이 존재한다. 따라서 GPS 관측값을 이용한 정밀측위를 위해서는 다양한 오차 모델링을 통해 오차 요인을 고려하거나 차분법을 통해 위성과 수신기에 공통으로 해당되는 오차를 제거하여야 한다. 일반적으로 정밀측위를 위해 이용되는 차분법은 이중차분법으로 단기선(<~10km)의 경우 대류권 지연 및 전리층 지연을 포함한 대부분의 오차 제거가 가능하다. 하지만 단기선일지라도 기준국과 이동국의 상대적인 높이차가 존재하는 경우 대류권 지연은 충분히 제거되지 않는다. 다음 수식 (1)은 GPS 관측방정식에서 수신기(i)가 위성(k)로부터 수신한 관측값에 포함된 대류권 지연을 일반적으로 모델링한 것이다(Schüler, 2001).

$$T_i^k = m_d(\alpha) \cdot ZHD + m_w(\alpha) \cdot ZWD \quad (1)$$

여기서, T : 대류권 지연

ZHD, ZWD : 각각 천정건조지연 및 천정습윤지연

m_d, m_w : 각각 천정건조지연 및 천정습윤지연에 해당되는 사상함수

α : 양각

수식 (1)에서 보듯이 대류권 지연은 천정방향의 건조 및 습윤지연값과 각각에 해당되는 사상함수로 구성되어 있다. 천정건조지연 및 천정습윤지연에 대해 다양한 모델값들이 존재하며 대부분의 모델값들이 서로 유사한 것으로 알려져 있으며 사상함수의 경우도 15도 이상의 양각에서는 모델 사이의 차이가 거의 없다(DGIST, 2012).

따라서 단기선이면서 기준국과 이동국의 높이차가 존재하는 경우 이중차분 관측방정식은 다음 수식(2)과 같이 표현할

수 있다.

$$\begin{aligned} P_{ij,1}^{kl} &= \rho_{ij}^{kl} + T_{ij}^{kl} + e_{ij,1}^{kl} \\ P_{ij,2}^{kl} &= \rho_{ij}^{kl} + T_{ij}^{kl} + e_{ij,2}^{kl} \\ \Phi_{ij,1}^{kl} &= \rho_{ij}^{kl} + T_{ij}^{kl} + \lambda_1 N_{ij,1}^{kl} + \epsilon_{ij,1}^{kl} \\ \Phi_{ij,2}^{kl} &= \rho_{ij}^{kl} + T_{ij}^{kl} + \lambda_2 N_{ij,2}^{kl} + \epsilon_{ij,2}^{kl} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, 아래첨자 i, j 는 수신기에 대한 인덱스

위첨자 k, ℓ 은 위성에 대한 인덱스

$\{ \}_{ij}^{kl} := \{ \}_i^k - \{ \}_j^k - \{ \}_i^\ell + \{ \}_j^\ell$, 이중차분을 나타내는 연산자

P_1, P_2, Φ_1, Φ_2 : 각각 L1, L2의 코드 및 위상 관측값

ρ : 기하학적 거리

$$(\rho_i^k := \sqrt{(x^k - x_i)^2 + (y^k - y_i)^2 + (z^k - z_i)^2})$$

λ_1, λ_2 : 각각 L1, L2의 파장

N_1, N_2 : 각각 L1, L2의 모호정수

$e_1, e_2, \epsilon_1, \epsilon_2$: 각각 코드와 위상관측값에 해당하는 관측오차

2.2 이중차분 관측값의 생성

대류권 지연이 GPS측위에 미치는 영향을 분석하기 위해 수식 (1)에 해당하는 이중차분 관측값을 시뮬레이션을 통해 생성하였다. 코드 및 위상의 이중차분 관측값에는 공통적으로 위성과 수신기 사이의 기하학적 거리와 대류권 지연 그리고 관측오차가 있다. 위상 관측값에는 모호정수에 해당하는 항목이 추가적으로 있으나 효율적인 분석을 위해 0으로 가정한 후 관측값을 생성하였다. 본 연구에서 모호정수값을 0으로 가정해도 무방한 이유는 임의의 모호정수를 설정하여 관측값을 생성하더라도 다시 관측값에서 빼주어야 하기 때문이다.

먼저 실제 상황과 유사한 위성의 위치값을 얻기 위해 2012년 8월 28일에 해당되는 정밀궤도력 데이터를 사용하여 30

Fig. 1. Selected baseline lengths for the analysis

초 간격으로 위성의 위치값을 계산하였다. 기준국의 위치값은 수원상시관측소(SUWN)의 좌표값을 선택하여 사용하였으며 기준국의 위치는 Fig. 1과 같이 수평 및 수직 방향에 대해 상대적인 오프셋(offset)에 해당되는 좌표값을 계산하여 사용하였다.

대류권 지연이 기선의 수평방향에 미치는 영향을 분석하기 위해 north, east방향으로 각각 1km 단위로 기선의 길이를 증가시키면서 이동국의 위치를 설정하였으며, Up방향으로는 50m 단위로 높이를 증가시켰다. 각 기선의 길이에 대해 30초 간격의 24시간 데이터를 시뮬레이션을 통해 생성하였다.

대류권 지연값의 생성은 수식 (1)을 기반으로 하였으며 천정건조지연, 천정습윤지연 및 사상함수 모두 Saastamoinen 모델을 이용하였다(Saastamoinen, 1972). Saastamoinen 모델에 필요한 대기정보들은 대기압, 온도, 부분수증기압 등이며 수신국 및 이동국의 위치에 해당되는 값들은 MOPS 모델에서 추출하였다(MOPS, 1998). 모델에 필요한 표고는 EGM96 모델로부터 계산한 후 사용하였다. 관측오차는 코드의 경우 30cm, 위상의 경우 2mm의 표준편차를 갖는 난수(random number)를 만든 후 사용하였다.

2.3 대류권 지연 영향에 의한 이동국의 위치 계산 모델

2.2에서 기술한 방법으로 생성된 이중차분 관측값은 이중차분된 대류권 지연 효과를 포함하고 있다. 이러한 방법으로 생성된 이중차분 관측값에 해당되는 관측방정식은 테일러급수 전개를 이용한 선형화 과정을 거치게 되는 데 이때 이중차분된 기하학적인 거리는 상쇄되어 관측값에서 빠지게 된다. 왜냐하면 이미 알고 있는 수신국과 이동국의 좌표를 기준으로 선형화를 하기 때문이다. 즉, 이중차분 관측값인 $P_{ij,1}^{kl}$, $P_{ij,2}^{kl}$, $\Phi_{ij,1}^{kl}$, $\Phi_{ij,2}^{kl}$ 에는 모델에 의해 계산된 이중차분 대류권 지연인 T_{ij}^{kl} 와 이중차분 관측오차만 남게 된다.

이중차분된 대류권 지연값이 이동측위에 미치는 영향을 분석하기 위해 단기선에 해당되는 관측방정식을 수식 (3)과 같이 만든 후 최소제곱법에 의한 조정계산을 수행하였다.

$$\begin{bmatrix} P_{ij,1}^{kl} \\ P_{ij,2}^{kl} \\ \Phi_{ij,1}^{kl} \\ \Phi_{ij,2}^{kl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_x & A_y & A_z \\ A_x & A_y & A_z \\ A_x & A_y & A_z \\ A_x & A_y & A_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_j \\ \Delta y_j \\ \Delta z_j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{ij,1}^{kl} \\ e_{ij,2}^{kl} \\ \epsilon_{ij,1}^{kl} \\ \epsilon_{ij,2}^{kl} \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서, $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 은 초기값에 대한 증분(increment)

$$A_x := \frac{x^k - x_j}{\rho_j^k} - \frac{x^\ell - x_j}{\rho_j^\ell}, \quad A_y := \frac{y^k - y_j}{\rho_j^k} - \frac{y^\ell - y_j}{\rho_j^\ell},$$

$$A_z := \frac{z^k - z_j}{\rho_j^k} - \frac{z^\ell - z_j}{\rho_j^\ell}$$

수식 (3)는 기준국의 위치는 고정하고 이동국의 위치를 계산하기 위한 모델로 단기선 처리를 위해 일반적으로 사용되는 수식으로 볼 수 있다. 이때 기준국과 이동국 사이에 대류권 지연 효과가 유사하여 이중차분으로 상쇄가 된다면 측위 오차는 전적으로 관측오차에만 영향을 받는 것으로 예상할 수 있다. 반대로 이중차분된 대류권 지연 효과가 무시할 정도로 작지 않다면 이 효과는 이동국의 측위오차로 나타나게 될 것이다. 계산된 이동국의 좌표잔차는 수식 (4)를 이용하여 수평, 수직 성분으로 변환한 후 각각의 성분에 미치는 영향을 분석할 수 있다.

$$[\Delta N, \Delta E, \Delta U]^T = R [\Delta x_j, \Delta y_j, \Delta z_j]^T \quad (4)$$

여기서, R 은 직각좌표계에서의 벡터성분을 지역수평좌표계로 변환해 주는 회전행렬

본 연구에서는 각 이동국의 위치에서 관측데이터를 생성한 후 조정계산을 통해 이동국의 좌표값을 계산한 후 좌표값의 잔차를 분석함으로써 대류권 지연이 기선 결정에 미치는 영향을 분석하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 수평방향 기선 길이가 증가한 경우

수평방향의 기선 길이에 따른 대류권 지연 영향의 분석을 위해 먼저 east 방향으로 기준국과 이동국 사이의 간격을 1km 단위로 증가시키면서 시뮬레이션된 데이터를 통해 24시간 동안의 측위 결과를 얻었다. 이때 기선의 최대 길이를 10km로 제한한 이유는 일반적으로 기선길이 10km 이내를 단기선으로 간주하기 때문이다. Fig. 2는 기선길이가 1km, 5km, 10km 인 경우 이동국의 측위 결과를 보여주고 있다. 1km 기선의 경우 좌표잔차는 편이(bias)가 없는 무작위(random)한 형태로 나타났으며 이는 기준국과 이동국 사이의 대기효과 차이로 인한 영향이라기 보다 관측오차에 기인한 것으로 판단된다. 왜냐하면 고도차가 거의 없고 기선의 길이는 짧은 경우 대기 효과는 동일한 것으로 가정할 수 있기 때문이다. 기선의 길이를 증가시키기에 따라 east 방향의 편이가 증가하는 경향을 보

는 것으로 나타났으며 기선의 길이가 4km 이상인 경우 1cm 수준의 편이를 보였다. up 방향의 좌표잔차는 기선의 길이가 증가함에 따라 편이는 발생하지 않으나 좌표잔차에 대한 표준편차는 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 2. Coordinate residuals for the baseline lengths, (a) 1km, (b) 5km, (c) 10km, respectively.

north 방향으로도 마찬가지로 기준국과 이동국 사이의 간격을 1km 단위로 증가시키며 데이터를 처리한 후 이동국의 좌표 잔차를 각 성분별로 분석하였다. east 방향으로 기선의 길이가 증가함에 따라 좌표잔차의 east 성분에서 편이가 발생하는 것과 유사하게 north 방향으로도 기선의 길이가 증가함에 따라 좌표잔차의 north 성분에서 편이가 발생하였다. 좌표잔차의 크기나 형태는 east 방향에서의 좌표잔차 크기 및 형태

와 유사하였다. 이러한 경향은 기선 방향에 따라 다른 좌표잔차 특성을 보이는 것으로 대기효과에 기인한 것으로 보기 어렵다. 반면 본 연구에서 기선의 설정을 평면으로 확장하였기 때문에 지구곡률에 의해 발생하는 높이 차이가 대류권 지연 효과로 나타난 것으로 사료된다.

또한 기선의 길이가 짧은 경우는 좌표잔차가 random 오차 형태를 띠는 반면 기선의 길이가 길어질수록 일정한 패턴이 더해진 random 오차 형태를 보이고 있는 것이 특징이다. 이러한 현상은 위성의 기하학적인 배치와 관련이 있는 사상함수가 충분히 정확하지 않기 때문에 생기는 것으로 예상된다.

Fig. 3. Coordinate residuals for the baseline lengths, (a) 50m, (b) 100m, (c) 200m, respectively.

3.2 수직방향 기선 길이가 증가한 경우

수평방향과는 다르게 수직방향의 대류권 지연 변화는 상대적으로 크게 나타나므로 기선의 길이가 짧은 경우일지라도 측위 오차는 상대적으로 크게 나타날 수 있다. 따라서 up 방향의 기선 길이 변화는 50m 간격으로 하였으며 초고층 빌딩의 높이를 고려하여 500m를 최대 기선 길이로 선택하였다. 수평방향의 기선 길이에 따른 좌표잔차의 특성과는 차이를 보이고 있다. 먼저 수평방향 성분인 north, east 방향의 좌표잔차는 표준편차가 기선의 길이 증가에 따라 증가하는 형태를 띠고 있으나 그 증가율은 미미한 것으로 나타났다. 즉, 500m 기선에 대해 편이는 모두 없었으며 2cm 수준의 표준편차를 보였다.

Fig. 3은 기선 길이가 50m, 100m, 200m 인 경우에 나타난 좌표잔차로 기선의 길이가 증가함에 따라 편이의 크기 및 표준편차가 증가하는 경향을 보이고 있다. 수평방향의 기선 길이에 비해 상대적으로 짧은 길이인 50m의 기선에서도 좌표잔차의 편이가 -4cm를 보이고 있으며 표준편차는 1cm로 나타났다.

Fig. 4는 up 방향으로 50m 간격으로 기선 길이를 증가시키며 좌표잔차의 표준편차를 계산한 후 도시한 것이다. Fig. 4에서 보듯이 수평성분에 대한 좌표잔차의 표준편차는 기선의 길이에 따라 증가하기는 하나 그 증가 비율이 상대적으로 낮은 반면 up 성분은 그 증가 비율이 상대적으로 높게 나타났다. Fig. 2와 Fig. 3에서 보듯이 수평방향 및 up 방향의 기선 길이 증가는 좌표잔차의 up 성분에 상대적으로 큰 영향을 미치고 있다는 것을 알 수 있다. 좌표잔차의 표준편차 뿐만 아니라 편이량도 기선이 길이에 따라 선형 형태로 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났으며 Fig. 5에서 보듯이 기선길이가 1m 증가할 때 편이는 0.07cm씩 증가하는 것으로 볼 수 있다.

Fig. 4. Standard deviations of the coordinate residuals

Fig. 5. Mean of coordinate residuals (up-component)

일반적으로 GPS를 이용한 단기선 처리인 경우 대류권 지연 효과가 충분히 제거된다고 가정하고 후 데이터 처리를 하게 된다. 하지만 앞에서 기술된 결과를 볼 때 기선의 길이보다는 기준국과 이동국 사이의 높이 차이가 정밀 기선 결정에 더 큰 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다. 따라서 단기선 처리를 하는 경우 이러한 부분에 대한 충분한 고려가 수반되어야 정밀 측위 혹은 모니터링이 가능할 것으로 판단된다. 기선 길이 증가에 따른 편이량의 증가가 시간에 따른 변위량을 분석하는데 큰 영향을 미치지 않는기 때문에 때로는 무시할 수도 있다. 하지만 위성의 기하학적 배치에 따라라도 일정한 패턴의 좌표잔차를 보이는 것으로 보아 실제 변위인지 아니면 사상항수에 포함된 오차에 기인한 좌표값의 변화인지에 대한 구별이 선행되어야 한다.

4. 결론

본 논문에서는 대류권 지연이 수평 및 수직 방향의 GPS 단기선 결정에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 시뮬레이션을 통해 대류권 지연과 관측오차가 포함된 이중차분 관측값을 생성한 후 단기선 처리를 하였으며 계산된 좌표잔차를 분석함으로써 그 영향을 분석하였다. 설정된 시나리오를 바탕으로 한 결과로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 대류권 지연 모델 중 정확도가 입증된 Saastamoninen 모델을 사용하여 10km 이내의 단기선을 가정하여 이동측위를 시뮬레이션한 결과 수평방향의 기선에 대해서는 대류권 지연에 의한 영향이 1cm 수준으로 나타났으며 따라서 기준국과 이동국 사이에 높이 차이가 크지 않다는 전제하에서는 충분한 측위정확도의 확보가 가능하였다.

둘째, 기선의 방향이 수직으로 있는 경우 기선의 길이가 상대적으로 짧은 경우일지라도 대류권 지연 효과가 측위정확도에 상대적으로 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며 편이(bias)는 기선의 길이에 따라 1m 길어짐에 따라 0.07cm씩 증가하는 것으로 나타났다.

세째, 수직방향으로 기선이 배치된 경우 기선의 증가에 따라 편이량도 증가하지만 위성의 기하학적 배치에 기인한 것으로 추정되는 일정한 패턴이 좌표잔차에 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 수직방향의 단기선 처리를 통한 변위 측정 시에는 이에 대한 고려가 선행되어야 할 것이다.

본 연구에서는 모델값이 충분히 정확하다는 전제하에 발생할 수 있는 측위오차를 분석하였으나 모델값 자체의 오차에 의한 영향도 포함되어 있을 것으로 예상된다. 따라서 향후 모델값의 정확도 검증을 위한 추가적인 분석이 필요할 것으로 판단된다.

References

- DGIST (2012), *Error Modeling for Development of GNSS Simulator, and Network-based Kinematic Positioning Technique*, No. 12-IT-02, Daegu, Korea (in Korean with English abstract)
- Fujino, Y., Murata, M., Okano, S., and Takeguchi, M. (2000), Monitoring System of the Akashi Kaikyo Bridge and Displacement Measurement Using GPS, In: Aktan, A. E. and Gosselin, S. R. (eds.), *Nondestructive Evaluation of Highway, Utilities, and Pipelines IV, Proceedings of SPIE*.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., and Collins, J. (2001), *GPS Theory and Practice*, 5th edition, Springer-Verlag: Wien/NewYork.
- MOPS (1998), *Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment*, Document No. RTCA/DO-229A, June 8, 1998, prepared by SC-159.
- Rizos, C., Han, S., Ge, L., Chen, H.-Y., Hatanaka, Y., and Abe, K. (2000), *Low-cost Densification of Permanent GPS Networks for Natural Hazard Mitigation: First Test on GSI's GEONET Network*, Earth Planets and Space, Vol. 52, pp. 867-871.
- Roberts, G. W., Meng, X., and Dodson, A. H. (2001), *Data Processing and multipath Mitigation for GPS/*

- Accelerometer Based Hybrid Structural Deflection Monitoring System, *ION GPS'2001*, 14th International Technical Meeting, Salt Lake City, USA, September 2001, pp. 473-481.
- Saastamoinen, J. (1972), *Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Range of Satellites*, Geophysical Monograph Series, Vol. 15, pp. 247-251.
- Schüler, T. (2001), *On ground-based GPS tropospheric delay estimation*, Ph.D. dissertation, Institute of Geodesy and Navigation University, FAF Munich, Germany, 364p.
- Teferle, f. N., Bingley, R. M., Dodson, A. H., Pnna, N. T., and Baker, T. F. (2001), Using GPS to Separate Crustal Movements and Sea Level Changes at Tide Gauges in the UK, In: Drewes, H. (ed.), *Vertical Reference System, International Association of Geodesy Symposium*, Springer-Verlag, pp. 264-269.

(Received 2013. 10. 14, Revised 2013. 10. 17, Accepted 2013. 10. 21)