

가상기준점 기반 코드신호를 이용한 정밀 측위

VRS-based Precision Positioning using Civilian GPS Code Measurements

배태석¹⁾
Bae, Tae-Suk

Abstract

With the increase in the number of smartphone users, precise 3D positional information is required by various applications. The positioning accuracy using civilian single-frequency pseudoranges is at the level of 10 m or so, but most applications these days are asking for a sub-meter level. Therefore, instead of an absolute positioning technique, the VRS-based differential approach is applied along with the correction of the double-differenced (DD) residual errors using FKP (Flächen-Korrektur-Parameter). The VRS (Virtual Reference Station) is located close to the rover, and the measurements are generated by correcting the geometrical distance to those of the master reference station. Since the unmodeled errors are generally proportional to the length of the baselines, the correction parameters are estimated by fitting a plane to the DD pseudorange errors of the CORS network. The DD positioning accuracy using 24 hours of C/A code measurements provides the RMS errors of 37 cm, 28 cm for latitudinal and longitudinal direction, respectively, and 76 cm for height. The accuracy of the horizontal components is within ± 0.5 m for about 90% of total epochs, and in particular the biases are significantly decreased to the level of 2-3 cm due to the network-based error modeling. Consequently, it is possible to consistently achieve a sub-meter level accuracy from the single-frequency pseudoranges using the VRS and double-differenced error modeling.

Keywords : VRS, Double-differencing, FKP, C/A code

초 록

스마트폰 사용자의 증가와 함께 다양한 응용분야에서 정밀한 3차원 위치정보가 요구되고 있다. 단일 주파수 민간용 코드 자료를 이용한 위치결정 정확도는 10m 내외이지만, 향후 스마트폰 응용프로그램은 서브미터 수준의 위치정확도를 안정적으로 확보할 필요가 있다. 따라서 일반적인 절대측위 대신 가상기준점을 기반으로 하는 상대측위 방식을 적용하였으며, 면보정계수를 이용하여 이중차분 오차를 보정하였다. 가상기준점은 로버 가까운 지점에 설정하고, 주 기준점 관측자료를 바탕으로 기하학적인 거리를 반영하였다. 이중차분으로 제거되지 않은 오차는 일반적으로 기선거리와 비례하므로, 로버 외부의 상시관측소 네트워크를 평면에 접합하여 면보정계수를 추정하였다. 이중차분 오차를 보정한 가상기준점과 로버의 24시간 C/A 코드 자료를 이용한 로버의 위치측정 결과 위도, 경도방향의 평균제곱근(RMS) 오차가 각각 37cm, 28cm 였으며, 높이 방향의 오차는 76cm 수준이었다. 또한 평면좌표의 성분별 오차는 전체의 약 90% 에서 ± 0.5 m 이내의 결과를 보였으며, 특히 네트워크 기반의 오차모델링을 통해 평면좌표의 바이어스가 2-3cm 수준으로 크게 향상되었다. 따라서 가상기준점과 이중차분 오차모델링을 통해 단일 주파수 코드 자료로부터 안정적인 서브미터 정확도의 위치결정이 가능하다.

핵심어 : 가상기준점, 이중차분, 면보정계수, C/A 코드

1. 서 론

국내에서는 차량용 내비게이션을 중심으로 GPS를 이

용한 위치결정이 대중화되었으며, 최근 들어 스마트폰의 보급과 더불어 실시간 3차원 모델링, 모바일 맵핑, 차선분간 등 다양한 분야에서 서브미터 수준의 정밀 3차원 공간

1) 정회원 · 세종대학교 공과대학 지구정보공학과 교수(E-mail: baezae@sejong.ac.kr)

정보에 대한 요구가 증대되고 있다. 일반적으로 민간용 수신장비에서는 코드자료를 이용한 절대측위(단독측위) 방식을 이용한다. 실시간 이동체의 절대측위는 매 관측시점에서 이동수신기(로버)에서 관측된 자료만을 이용하여 3차원 위치를 결정한다. 따라서 다양한 오차요인에 의해 위치결정 정확도가 10-20m에 이르며, 위성배치 또는 관측 환경에 따라 급격한 정밀도 저하를 나타낸다. 따라서 두 대 이상의 수신기를 사용하여 기준점에서의 보정정보를 적용하는 DGPS 방식을 활용한다(Hofmann-Wellenhof 등, 1997). 국내에서도 상시관측소 기준국 자료를 이용하여 이동체의 위치정확도를 향상하기 위한 DGNSS 서비스를 1999년부터 운영중에 있다(위성항법중앙사무소, 2011). 또한 국토지리정보원에서는 반송파 위상 기반의 가상기준점(Virtual Reference Station, VRS) 서비스를 운용하고 있으며 위치결정 정확도는 평면 2-3cm, 수직 5cm 정도인 것으로 알려져 있다(대한측량협회, 2010). 국내에서는 상시관측소 자료를 이용한 GPS-RTK 정확도에 대한 분석(박운용 등, 2004), 실시간 위치측정 정확도 향상 방안(윤하수 등, 2007) 등 보정정보를 이용한 정확도 향상 관련 연구를 수행한 바 있다. 특히 이용창(2004)은 가상기준점 자체에 대한 위치정확도를 분석하였으며, 김정한 등(2002, 2007)은 GPS-RTK 보정신호의 생성 방안 및 데이터 전송 형식 등에 대한 연구를 진행하였다.

그러나 GPS-RTK 방식은 기준국으로부터 멀어질수록 수신환경의 상관성이 감소하므로 위치결정 오차가 증가하게 된다. 이에 대한 방안으로 네트워크 방식의 위치결정 등이 연구되고 있으나(이재원, 2008), 기준점의 수신장에 대비한 보완 또는 기선거리에 따른 가중값 적용 등에 한정되어 있다. 일본에서 추진중인 QZSS(Quasi-Zenith Satellite System) 위성을 이용하는 방법(JAXA, 2011)도 가능하지만, 천정방향에서의 추가적인 하나의 관측값만으로는 위치정확도 향상을 크게 기대하기 어려울 것으로 판단된다. 또한 QZSS 위성에서 전송하는 코드 보정신호를 활용하는 방안도 제시되고 있으나, 현재까지 국내에서의 연구는 진행된 바 없다.

따라서 민간용 코드 자료를 이중차분하여 공통 오차를 소거함으로써 정확도를 향상시키는 방안이 필요하다. 일반적으로 이중차분을 위해서는 기준국이 필요하지만, 지속적으로 이동하는 로버를 위해 별도의 기준국을 설치하는 것은 현실적으로 어려울 뿐 아니라 기선거리에 따른 오차증가 문제가 발생한다. 따라서 전국단위의 이동측위 기준국을 고정점에 설치하는 대신 가상의 기준점을 설정

하여 기준국으로 활용할 수 있다. 상대측위의 정밀도는 기선거리가 증가함에 따라 감소하지만, 거리에 따른 1차원적인 선형증가라기 보다는 위성과 수신기의 기하학적 관계에 따른 방향성이 존재한다. 코드 자료의 순간적인 품질저하에 따른 영향을 최소화하기 위해서는 상시관측소 네트워크에 의한 모델링이 이루어져야 한다. 본 연구에서는 가상기준점과 상시관측소 네트워크 내부의 모델링되지 않은 이중차분 오차를 방향성을 고려한 평면에 접합하여 면보정계수(FKP)를 추정하였으며, 이를 이용하여 단일 주파수 코드 자료에 기반한 오차보정 방식을 제시하고 국토지리정보원 상시관측소 자료를 바탕으로 검증하였다.

2. 본 론

2.1 코드 기반 위치결정

일반 사용자가 많이 활용하고 있는 차량용 내비게이션 또는 스마트폰에 탑재된 GPS 수신칩을 이용한 위치결정은 GPS 위성으로부터 전송되는 L1 주파수의 C/A(Coarse/Acquisition) 코드를 이용하는 절대측위 방식으로 이루어진다. 다양한 오차요소를 포함한 C/A 코드의 기본 관측식은 다음과 같이 주어진다(Grejner-Brzezinska, 1995).

$$P_{i,1}^k = \rho_i^k + T_i^k + \frac{I_i^k}{f_1^2} + c(dt_i - dt^k) + b_{i,2} + e_{i,1}^k \quad (1)$$

여기서 아래첨자 i 는 수신기, 위첨자 k 는 위성을 나타내며, 각 항은 다음과 같다.

- $P_{i,1}^k$: 수신기와 위성 사이의 L1 주파수 의사거리 관측값[m]
- ρ_i^k : 수신기와 위성 사이의 기하학적 거리[m]
- T_i^k : 대류층 지연오차[m]
- I_i^k / f_1^2 : L1 전리층 지연오차[m]
- c : 빛의 속도[m/s]
- dt_i, dt^k : 수신기와 위성의 시계오차[s]
- $b_{i,2}$: interchannel bias[m]
- $e_{i,1}^k$: L1 의사거리 관측오차[m]

C/A 코드 자료에는 위성으로부터 수신기까지의 기하학적 거리를 포함하여, 대류층 및 전리층 지연오차, 수신기 및 위성의 시계오차, interchannel 바이어스 등을 포함하고 있다. 일반적인 절대측위에서는 대기에 의한 오차를 비롯

하여 위성의 시계오차 등을 무시하고 위성-수신기간 기하학적 거리와 수신기 시계오차만을 고려하므로 위치결정 정확도는 10-20m 이상에 이른다. 또한 대류층 지연오차를 모델링하고 위성 시계오차를 적용하더라도 대략적인 정확도는 10m 내의 수준이다. 따라서 절대측위 방식으로는 차선분간을 위한 내비게이션 또는 스마트폰 활용을 위한 서버미터 수준의 공간위치결정 등의 용도에 활용할 수 없다. 만일 이중주파수 코드 자료를 활용할 수 있는 경우에는 이중주파수 코드 자료를 선형결합하여 전리층 지연오차를 제거함으로써 위치정확도를 향상시킬 수 있다. 단일 주파수 및 이중주파수 코드 자료를 이용한 절대측위 결과는 3장에 서술되어 있다.

2.2 가상기준점 생성

코드자료를 이용한 정밀 위치결정을 위해서는 절대측위 방식이 아닌 상대측위 방식의 적용이 필요하다. 일반적으로 두 개의 위성과 두 개의 수신기로 이루어지는 이중차분 상대측위에서는 위성 및 수신기의 시계오차, inter-channel 바이어스가 소거된다. 또한 두 수신기 사이의 거리가 가까운 경우에는 전달되는 경로가 동일하므로 대기에 의한 오차도 무시할 수 있는 수준으로 감소된다. L1 주파수의 코드 데이터를 이중차분한 결과는 다음과 같이 나타낼 수 있으며, 이 식에는 기하학적 거리, 이중차분된 대류층 및 전리층 지연오차만이 포함되어 있다.

$$P_{ij,1}^{kl} = \rho_{ij}^{kl} + T_{ij}^{kl} + \frac{I_{ij}^{kl}}{f_1^2} + e_{ij,1}^{kl} \quad (2)$$

여기서 이중차분 코드자료는 다음과 같이 정의되며, 모든 기호는 식 (1)과 동일하다.

$$P_{ij,1}^{kl} := P_{j,1}^{kl} - P_{i,1}^{kl} = P_{i,1}^{kl} - P_{i,1}^{kl} - P_{j,1}^{kl} + P_{j,1}^{kl}$$

따라서 로버에 대한 정밀 이동측위를 위해서는 로버가 가까운 위치에 물리적으로 기준국을 설치하는 대신에 가상의 기준국을 설정하는 방법이 필요하다. 대기에 의한 신호전달 오차를 최소화하기 위해서는 로버에서 최대한 가까운 위치를 선정하고 이 지점에 대한 가상의 관측값을 생성해야 한다. 가상기준점에서의 관측자료를 생성하기 위해서는 우선 주 기준점을 선택하고, 주 기준점과 가상기준점의 3차원 좌표를 이용한 기하학적인 거리만을 고려한다. 주 기준점은 상시관측소 중 하나로서 가상기준점의 관측자료를 생성하고, 이중차분 오차모델링을 위한 이중차분의 기준 관측소를 나타낸다. x^s, x_r, x_v 를 각각

위성, 주 기준점, 가상기준점의 3차원 좌표벡터라고 할 때, 위성으로부터 주 기준점 및 가상기준점까지의 기하학적 거리는 다음과 같이 나타낼 수 있다(Hu 등, 2003).

$$\begin{aligned} \rho_r^s(t) &= |x^s - x_r| \\ \rho_v^s(t) &= |x^s - x_v| \end{aligned} \quad (3)$$

따라서 위성으로부터 두 기준점까지의 거리의 차이를 주 기준점의 모든 관측값에 보정함으로써 가상기준점의 각 위성에 대한 관측값을 생성할 수 있다.

2.3 이중차분 오차 모델링

일반적인 상대측위에서 이중차분을 하더라도 기선 거리에 따라 오차가 완전히 제거되지 않는 경우가 있다. 이는 두 수신기 사이의 거리가 멀어질수록 위성으로부터 전송되는 신호의 경로가 다르기 때문에 두 수신기에서 관측한 자료의 상관성이 저하되기 때문이다. 주 기준점에서의 관측값을 이용하여 생성한 가상기준점 관측자료는 두 기준점 사이의 기하학적인 거리차만을 고려한 것이므로, 이는 두 기준점 관측자료의 이중차분 오차가 없는 경우를 전제로 한다. 그러나 국토지리정보원에서 운영중인 전국 46개 상시관측소를 이용한 가상기준점 방식을 적용할 때, 수원(SUWN) 관측소를 시점으로 최소신장트리(Minimum Spanning Tree)를 구성하면 기선간 거리는 평균 43km이다.

따라서 가상기준점에 가장 가까운 관측소를 주 기준점으로 선정하더라도 기선거리는 20km 이상에 이르며, 이에 따른 이중차분 오차도 무시할 수 없는 수준이다. 따라서 가상기준점 자료에 포함된 오차로 인해 가상기준점과 로버의 자료를 이중차분하더라도 오차는 소거되지 않고 상대측위 정확도를 저하시킨다.

기선 거리에 따른 이중차분 오차를 모델링하기 위해서는 네트워크 내부에 로버가 위치하도록 상시관측소를 선정하고, 상시관측소 관측자료를 이용한 오차보정 계수를 추정해야 한다. 주 기준점 선정에 대한 제약은 없으나, 오차요소의 최소화를 위해서는 로버에 가장 가까운 상시관측소를 주 기준점으로 선정하는 것이 바람직하다. 일반적으로 장기선이 아닌 경우에는 이중차분 오차는 작은 값이므로 2차원 평면에 접합하여 모델링 하는 것으로 충분하다.

이중차분 오차모델링은 개별 위성조합, 즉 m개의 위성에 대해 기준 위성을 중심으로 한 (m-1)개의 이중차분 조합에 대해서 각각 별도로 수행해야 하며, 추정된 보정계수도 해당 조합별로 적용해야 한다. 오차모델링을 위한

관측식은 코드 관측값에 기하학적 거리와 모델링 가능한 대류층 지연오차를 뺀 값이며, 추정할 보정계수는 기선거리에 따른 보정량이다. 본 연구에서는 대상 네트워크를 평면으로 가정하여 위도, 경도별 보정계수를 추정하며, 수학적 모델은 다음과 같다.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} P_{12,1}^k - \rho_{12}^k - T_{12}^k \\ P_{13,1}^k - \rho_{13}^k - T_{13}^k \\ \vdots \\ P_{1n,1}^k - \rho_{1n}^k - T_{1n}^k \end{bmatrix}}_y = \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta\phi_{12} & \Delta\lambda_{12} \\ \Delta\phi_{13} & \Delta\lambda_{13} \\ \vdots & \vdots \\ \Delta\phi_{1n} & \Delta\lambda_{1n} \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} a \\ b \\ \xi \end{bmatrix} + e \quad (4)$$

수식에서 기준점 순서에 대한 혼동을 방지하기 위해 로버에 가장 가까운 상시관측소를 주 기준점으로 선정하여 1번 수신기로 가정하였으며, 나머지 기준점은 2부터 n까지의 수신기 번호를 부여하였다. $\Delta\phi, \Delta\lambda$ 는 각각 주 기준점을 중심으로 나머지 기준점 사이의 위도 및 경도 차이를 나타내며, a, b 는 위도 및 경도방향의 이중차분 오차 보정계수이다. 이중차분 오차를 2차원 평면에 접합하므로 주 기준점을 포함하여 최소 3점의 기준점이 필요하며, 이 경우 유일해를 구할 수 있다. 그러나 높은 정확도의 오차 모델링을 위해서 4점 이상의 기준점을 이용하면 미지수의 수(2개)보다 많은 관측값이 존재하므로 최소제곱조정으로 면보정계수를 구할 수 있다. 이중차분 오차의 관측값을 Gauss-Markov 모델로 구성하면 면보정계수의 최소제곱조정 해는 다음과 같이 표현할 수 있다(Ghilani 등, 2006).

$$\hat{\xi} = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = (A^T P A)^{-1} A^T P y \quad (5)$$

여기서 P는 각 기선별 이중차분 오차에 대한 가중값 행렬로서, 일반적으로 위성의 수신고도각에 따른 가중값을 부여한다.

주 기준점을 포함한 상시관측소 자료를 이용하여 추정할 면보정 계수에 주 기준점과 가상기준점의 기선거리를 고려한 이중차분 오차는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$B_{lv}^k = \Delta\rho_v = a \cdot \Delta X_{lv} + b \cdot \Delta Y_{lv} \quad (6)$$

여기서 a, b 는 오차보정 계수, 1은 주 기준점, v는 가상기준점을 나타내며, 위성 k, l 로부터의 관측자료를 이용한 이중차분 값을 의미한다.

이중차분은 관련된 관측값의 상대적인 차이값을 나타내므로 주 기준점에서의 오차를 0으로 가정하면, 계산된

이중차분 오차는 전적으로 가상기준점에서의 오차로 간주할 수 있다. 마찬가지로 가상기준점에서 기준 위성으로부터의 오차가 없다고 가정하면, 즉 $B_v^k = 0$, 모든 이중차분 오차는 가상기준점의 두번째 위성 관측값에 보정할 수 있다.

$$\Delta\rho_v = B_{lv}^k = B_v^l \quad (7)$$

가상기준점에서의 오차보정된 관측값을 생성하면, 로버 관측값과의 이중차분 위치결정은 일반적인 기선처리 방식으로 수행할 수 있다. 이 때 가상기준점과 로버의 이중차분 대류층 지연오차는 매우 작은 값이므로 무시할 수 있다.

3. 자료처리

3.1 GPS 관측자료 현황

가상기준점 기반 오차모델링을 테스트하기 위해서 국토지리원에서 운영중인 GPS 상시관측소 중 2010년 8월 1일(DAY OF YEAR 213)에 관측한 수원(SUWN), 서울(SOUL), 파주(PAJU), 동두천(DOND), 양평(YANP), 춘천(CHCN)의 6개 관측소 자료를 이용하였다. 로버의 실측자료를 이용하면 비교가능한 정확한 좌표가 없으므로 본 연구에서는 좌표값을 알고 있는 서울(SOUL) 관측소를 로버로 가정하였다. 그림1은 테스트에 사용된 상시관측소 배치 현황으로서 로버로부터 각 상시관측소까지의 기선거리는 대략 30-60km 수준이며, 로버가 네트워크 내부에 위치하도록 주변 상시관측소를 선정하였다.

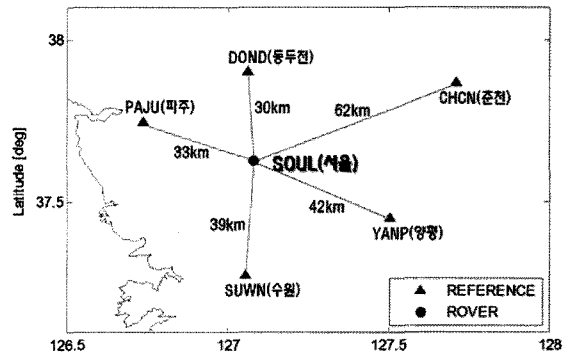


그림 1. GPS 상시관측소 및 로버 위치

로버를 포함한 모든 관측소의 관측 시간간격은 30초이며, 관측자료는 이중주파수 코드자료(C1, P2)와 반송파 위상(L1, L2)이다. 사용된 수신기는 Trimble사의 NETRS와

NETR5이며 안테나는 TRM29659.00과 TRM55971.00의 두 종류이다. GPS 위성궤도는 항법메시지(방송궤도력)를 이용하였으며, 항법메시지는 안테나 위상 중심의 좌표에 기반하므로 위성의 무게 중심으로부터의 오프셋정보는 별도로 적용하지 않았다.

3.2 절대측위

가상기준점 방식의 위치결정 정확도 향상에 대한 검증과, 가상기준점 자체의 생성을 위해서는 우선 절대측위에 의한 로버의 위치를 결정해야 한다. 본 연구에서는 로버로 가정된 서울(SOUL)의 24시간 관측자료를 이용하여 로버의 3차원 위치(X,Y,Z)와 수신기의 시계오차를 계산하였다. 대류층 지연오차는 건조 및 습윤지연에 각각 별도의 모델을 사용하였으며, 사상함수(mapping function)는 공통으로 Saastamoinen 모델을 적용하였다(Schüler, 2001). 위성궤도 정보는 항법메시지를 사용하였으며, 위성의 시계오차와 지구자전에 의한 상대성효과를 관측된 의사거리에 보정하였다.

표 1. 절대측위 자료처리 방안 요약

위성궤도	항법메시지
사용한 GPS자료	C/A 코드
대류층 지연모델/사상함수	Saastamoinen 모델
관측시간간격	30초(24시간)
위성시계오차	보정
지구자전에 따른 상대성효과	보정
전리층지연모델	고려하지 않음
DCB	고려하지 않음

그림 2는 로버인 서울(SOUL) 관측소의 C/A, P2 이중주파수 코드자료를 이용하여 전리층 지연오차를 제거한 절대측위 결과를 평면, 수직성분으로 구분하여 나타낸 것이다. 그림에서처럼 남북방향 1.7m, 동서방향 1.2m 등 평면 좌표의 2차원 평균제곱근오차(2D RMS)는 2.1m 수준이며, 높이방향 오차는 2.5m에 이른다. 그러나 스마트폰 등 일반사용자를 위한 저가의 GPS 수신칩은 C/A 자료만을 수신하므로 이를 이용한 위치결정 정확도는 표 2와 같다. C/A 코드 자료만을 이용하는 경우에는 높이방향의 바이어스가 3m에 이르는데, 이는 관측값에 포함된 전리층 지연오차를 제거하지 않은 것에 기인한다. 따라서 단일주파수의 코드자료를 이용하는 경우에는 항법메시지에 포함된 계수를 이용한 단일주파수 전리층 지연 모델을 추가함

으로써 약 50-60% 정도의 오차를 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다(Leick, 2004; 이창문 등, 2010). 그러나 이동수신기의 절대측위에서는 개별 시점에서의 관측값만을 이용하여 수신기의 위치를 추정하기 때문에 관측 위성의 수가 적거나 수신환경이 좋지 않은 경우에는 오차가 수십 미터 이상에 이르기도 한다.

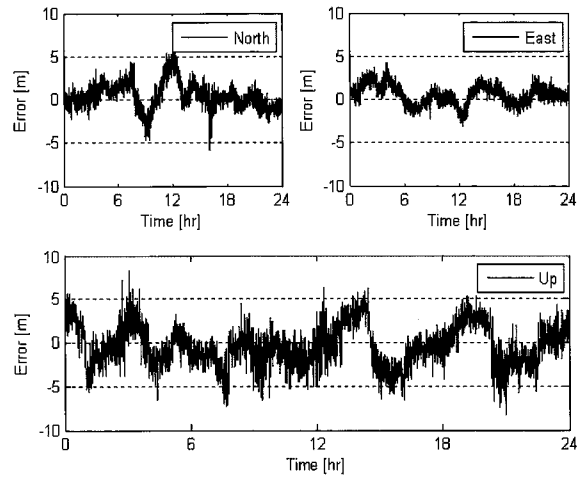


그림 2. 서울(SOUL) 관측소의 절대측위 결과(C1/P2 자료 이용)

표 2. 서울(SOUL) 관측소 24시간 절대측위 결과

	North		East		Up	
	C1	C1/P2	C1	C1/P2	C1	C1/P2
평균[m]	1.01	0.42	-0.03	0.48	2.96	-0.30
표준편차[m]	1.81	1.59	1.05	1.15	3.53	2.44
RMS[m]	2.07	1.65	1.05	1.24	4.61	2.46

3.3 VRS보정 자료처리

절대측위 방식으로는 서버미터 수준의 정확도를 안정적으로 제공하는 것이 불가능하므로 GPS 상시관측소의 C/A 코드 자료를 기반으로 가상기준점 방식의 오차보정을 실시하였다. 이를 위해 절대측위로 결정한 위치에 가상기준점 관측값을 생성하고 이중차분 오차를 보정한 후, 로버 관측값과의 이중차분을 수행하였다. 가상기준점에서의 관측값 생성은 주 기준점의 관측값을 바탕으로 기하학적인 요소만을 고려하므로, 본 연구에서는 로버의 위치에서 가장 가까운 동두천(DOND) 관측소를 주 기준점으로 선정하였다. 상시관측소를 이용한 이중차분 오차 보정 모델은 네트워크 내 전 영역에 대해서 적용이 가능하다. 따라서 일반적인 경우에는 매 관측시점마다 가상기준점

을 새로 결정할 필요는 없으며, 가상기준점과 로버의 거리가 일정 수준 이상이 된 경우에만 갱신하는 것이 바람직하다.

식 (4)에서와 같이 로버 인근의 3개 상시관측소 자료를 이용하는 경우에는 주 기준점을 기준으로 두 개의 기선이 가능하므로 보정계수는 유일해를 가지게 된다. 그러나 이 경우 상시관측소의 관측환경 및 측정자료의 품질에 대한 의존성이 매우 높으므로 전체적인 품질저하의 가능성이 있다. 테스트 자료의 경우에도 춘천(CHCN) 관측소에서 오전 11:55분에 관측된 위성의 수는 5개로서 이 자료를 이용한 절대측위 결과는 40m에 이르는 위치결정 오차가 발생한다. 따라서 수신환경이 나쁘거나 관측위성의 수가 작은 관측소는 보정계수 추정시 제외하기 위해서 최소 4개 이상의 관측소를 포함할 필요가 있다. 본 연구에서는 이중차분 오차 모델링을 위해서 5개의 후보 관측소로부터 양호한 관측결과를 이용하여 오차 모델링을 수행하였다. 표 3은 테스트 날짜의 시작시각(0:00:00)에서의 주 위성 PRN22를 기준으로 각 위성 조합별 위도 및 경도방향의 오차 보정계수로서 위도/경도 방향 1° 변화에 따른 이중차분 관측값에 대한 보정량을 거리 단위로 나타낸다. 보정계수를 이용하여 주 기준국(DOND)과 로버(SOUL)의 경위도 차이를 고려하면 실제 보정되는 이중차분 관측값은 대략 7cm-86cm 수준이다. 네트워크 내의 기선이 단 · 중기선이며 대류층 지연오차 모델을 적용하였으므로 추정된 보정값은 대부분 전리층 지연오차와 관련이 있다. 따라서 동일한 위성조합이라고 하더라도 매 관측시간마다 보정량의 변동이 크며, 시간에 따른 변화도 일부 나타난다.

표 3. 이중차분 오차 보정계수 예시(2010/8/1 0:00:00)

순번	위성1	위성2	위도방향[m/°]	경도방향[m/°]
1	22	12	3.2274	1.0099
2	22	30	2.1764	0.2534
3	22	18	0.9120	0.6923
4	22	14	0.7467	0.6243
5	22	9	1.4624	-2.1686
6	22	27	0.5320	3.5149
7	22	31	2.8826	0.9771
8	22	24	0.9393	0.4136

그림 3은 주 위성 PRN22를 기준으로 PRN12에 대한 2시간 동안의 위도 및 경도방향 보정계수 변화를 나타낸다. 최초 시점에서 위도방향 보정계수가 큰 것은 이중차분 결

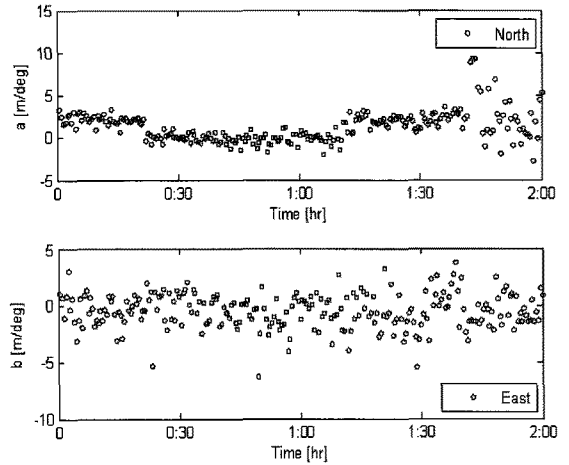


그림 3. 이중차분 오차 보정계수 변화(PRN22-PRN12 조합)

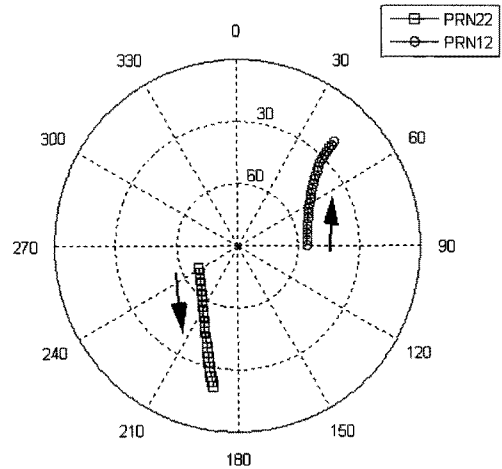


그림 4. 이중차분 위성의 방위각 및 고도각 변화

과에 포함된 위도방향 바이어스를 보정하기 위한 것으로, 이는 그림 4에서 알 수 있는 바와 같이 두 위성이 동서방향으로 배치되어 있기 때문으로 판단된다. 또한 관측시각 1:40 경에 보정계수에 큰 변화가 생기는 부분은 위성고도의 낮아짐에 따라 대기에 의한 영향으로 보정계수가 불안정한 변화를 보이는 것으로 이해할 수 있다.

가상기준점을 기반으로 하는 오차 모델링 후 이중차분 위치결정을 수행한 결과 각 성분별로 대략 1m 이내의 위치결정이 가능하였다. 일반적으로 GPS 위치결정은 위성 배치의 기하학적인 특성으로 인해 수평방향의 오차보다는 수직방향의 오차가 크게 나타난다. 따라서 위치결정 오차를 지역평면좌표계로 변환하면 로버에서의 평면 및 수직방향 오차로 구분하여 나타낼 수 있다(그림 5). 세부

적인 자료처리 결과는 평면좌표 성분별 오차가 $\pm 0.5m$ 이내인 경우가 위도방향 86.0%, 경도방향 93.2%이며, 높이 방향은 전체의 83.5%에서 $\pm 1m$ 이내의 정확도를 보였다.

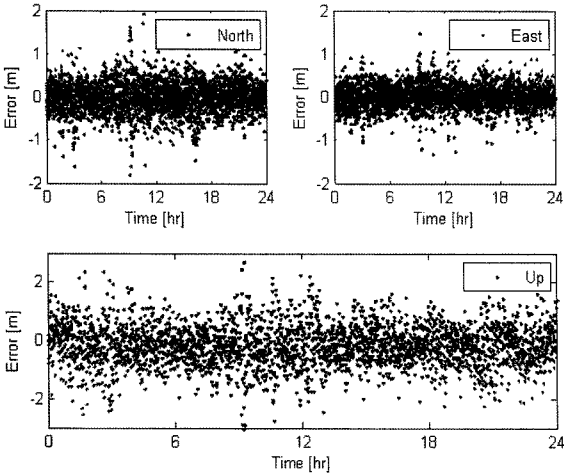


그림 5. 가상기준점 기반 이중차분 오차를 고려한 로버의 위치오차

표 4. 가상기준점 기반의 로버 위치 정확도

	North	East	Up
평균[m]	-0.02	0.03	-0.13
표준편차[m]	0.37	0.28	0.74
RMS[m]	0.37	0.28	0.76

이중차분 오차 모델링에 의한 보정계수를 고려함으로써 각 성분별 바이어스가 평면 2-3cm, 높이 방향 13cm 수준으로 크게 향상되었을 뿐 아니라(표 4), 평균 제공근 오차도 평면성분은 각각 28cm, 37cm, 높이 성분은 76cm로서 매우 정확한 결과를 보여준다. 또한 이중차분 오차 모델링시 4개 이상의 상시관측소를 이용하여 수신환경이 좋은 얇은 관측소를 제외한 후 추정된 면보정계수를 이용하면 로버 위치의 최대 오차가 2.5m 이내(그림 5)가 됨을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 일반적으로 민간용 GPS 수신기에서 사용하는 절대측위 정확도를 서버미터 수준의 위치결정이 가능하도록 가상기준점 기반의 이중차분 오차모델링을 수행하고 이에 대한 검증은 수행하였다. 로버 위치 부근에 가상기준점을 생성하기 위해서는 절대측위를 통해 로

버의 대략적인 위치를 결정하고, 이 지점에서 가상의 관측값을 주 기준점과의 기하학적 거리를 고려하여 생성한다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 단일 주파수의 코드 자료를 이용한 절대측위의 평면위치 평균제공근 오차는 2m 수준이며 높이 방향은 5m 이내의 정확도를 보였다. 반면, 이중주파수 코드 자료를 이용하는 경우에는 전리층 지연오차를 제거함으로써 높이 방향의 정확도가 두 배 정도로 크게 향상되었다.

둘째, 대부분의 응용업무에서는 평면오차가 중요하며, 가상기준점을 이용한 이중차분 오차 모델링을 수행한 결과 단일주파수의 코드자료를 이용하더라도 평면성분의 오차가 $\pm 0.5m$ 이내인 경우가 대략 전체의 90%에 이르며, 최대 오차도 2.5m 이내로 결정되었다. 이지선 등(2011)의 연구결과에 의하면 우리나라의 최신 중력지오이드는 GPS/Leveling 자료와 비교하여 평균 -14.93cm, 정밀도 약 5.29cm의 결과를 나타낸다. 따라서 본 연구결과와 지오이드 모델을 결합할 경우에는 대부분의 관측지점에서 1m 수준의 정확도로 표고값을 결정할 수 있을 것으로 판단된다.

셋째, 본 연구에서는 정확도 비교를 위해 실제 이동측위 자료 대신 상시관측소를 로버로 가정하였다. 따라서 실제 운용환경에서는 가상기준점 오차보정을 위한 네트워크의 규모가 작아지므로 이중차분 오차 모델의 정확도는 더 향상될 것으로 판단된다.

마지막으로 일반적으로 상시관측소 네트워크는 로버의 위치를 중심으로 기하학적인 배치가 가장 우수하도록 선정하는 것이 바람직하다. 그러나 네트워크 내 주 기준점으로부터 상시관측소까지의 기선거리가 비슷한 경우에는 기선거리에 따른 높은 상관성으로 인해 오차모델링의 정확도가 저하될 수 있다. 따라서 향후에는 상시관측소의 배치 및 기선거리에 따른 영향 등에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학기술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2009-0069542).

참고문헌

김정환, 기창돈, 이재송, 양근우, 윤상철 (2002), 실시간 정밀위치측정을 위한 새로운 RTK-GPS 보정데이터 형식

- 개발, 춘계학술발표회 논문집, 한국항공우주학회, pp. 541-544.
- 김정환, 강태익, 기창돈, 박병운 (2007), 고효율 GPS-RTK 보정데이터에 기반한 정밀위치 결정, 하계종합학술대회 논문집, 대한전자공학회, 제 30권, 제 1호, pp. 505-506.
- 대한측량협회 (2010), Network-RTK(VRS)측량에 대한 공공측량성과심사 관련 규정(안) 작성에 관한 연구, 한국측량학회.
- 박운용, 이동락, 이인수, 배경호 (2004), CORS를 이용한 Single RTK-GPS 정확도 검증, 한국지형공간정보학회지, 한국지형공간정보학회, 제 12권, 제 2호, pp. 29-35.
- 위성항법중앙사무소 (2011), 위성항법중앙사무소 홈페이지, <http://www.ndgps.go.kr>
- 윤하수, 최윤수, 이진수, 서창완 (2007), 차량이동측량에 의한 도로 기본지리정보 갱신방안에 관한 연구, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 25권, 제 4호, pp. 355-363.
- 이용창 (2004), GPS 상시 관측망에서 산정된 가상기준점 자료의 정확도 분석, 한국지형공간정보학회지, 한국지형공간정보학회, 제 12권, 제 1호, pp. 55-62.
- 이재원 (2008), 다중기준국 방식을 이용한 GPS 반송파 상대측위 정확도 향상, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 26권, 제 6호, pp. 617-624.
- 이지선, 권재현, 김영민, 문지영 (2011), 최신 중력 자료의 획득을 통한 우리나라 지오이드 모델 업데이트, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 29권, 제 1호, pp. 81-89.
- 이창문, 박관동, 이상욱 (2010), 단일주파수 GNSS 수신기용 실시간 전리층 지연 보정 모델 비교 : Klobuchar 모델과 NeQuick 모델, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 28권, 제 4호, pp. 413-420.
- Ghilani, C.D. and P.R. Wolf (2006), *Adjustment Computations: Spatial Data Analysis (4th)*, John Wiley and Sons, Inc., pp. 184-191.
- Grejner-Brzezinska, D. (1995), *Analysis of GPS data processing techniques: In search of optimized strategy of orbit and Earth rotation parameter recovery*, Report No. 432, Department of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, Columbus, Ohio, pp. 12-13.
- Hofmann-Wellenhof, B., H. Lichtenegger and J. Collins (1997), *GPS: Theory and Practice*, Springer Wien NewYork, pp. 185-187.
- Hu, G.R., H.S. Khoo, P.C. Goh and C.L. Law (2003), Development and assessment of GPS virtual reference stations for RTK positioning, *J. Geodesy*, 77, 292-302.
- JAXA (2011), *Japan Aerospace eXploration Agency homepage*, http://www.jaxa.jp/projects/sat/qzss/index_e.html
- Leick, A. (2004), *GPS Satellite Surveying (3rd)*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 219-220.
- Schüler, T. (2001), *On Ground-Based GPS Tropospheric Delay Estimation*, Ph.D. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, pp. 136-153.

(접수일 2011. 04. 18, 심사일 2011. 04. 21, 심사완료일 2011. 04. 23)