

# GPS 코드의사거리 기반 정밀단독측위(PPP) 알고리즘 개발 및 측위 정확도 평가

## Development and Positioning Accuracy Assessment of Precise Point Positioning Algorithms based on GPS Code-Pseudorange Measurements

박관동\* · 김지혜\*\* · 원지혜\*\*\* · 김두식\*\*\*\*

Park, Kwan Dong · Kim, Ji Hye · Won, Ji Hye · Kim, Du Sik

### 要 旨

휴대용 단말에 간편하게 구현 가능하도록 GPS의 코드의사거리 관측치 기반의 정밀단독측위(PPP; Precise Point Positioning) 알고리즘을 개발하고 그 성능을 검증하였다. PPP에 필요한 기본 모델로 그룹 딜레이, 상대성 효과, 위성안테나 위상중심오프셋 보정모델을 적용하였다. 위성 궤도와 시계오차는 IGS(International GNSS Service) 공식 산출물에 최적의 알고리즘을 통해 보간하고, 대류권과 전리층 오차는 각각 과학기술용 GPS 자료처리 소프트웨어로 산출한 참값과 GIM(Global Ionosphere Model)을 사상함수를 적용해 시선방향 오차로 변환해 적용하였다. 개발된 알고리즘을 4일간 테스트한 결과 수평오차는 0.8~1.6m, 수직오차는 1.6~2.2m 수준으로 나타났다. 이는 DGPS 측위결과와 유사한 성능으로 향후 PPP 알고리즘의 추가개선이 이루어질 경우 다양한 측량 및 위치기반서비스 분야에 활용 가능할 것으로 기대된다.

핵심용어 : 정밀단독측위, 코드의사거리, GPS/GNSS, 위상중심오프셋, 위치기반서비스

### Abstract

Precise Point Positioning (PPP) algorithms using GPS code pseudo-range measurements were developed and their accuracy was validated for the purpose of implementing them on a portable device. The group delay, relativistic effect, and satellite-antenna phase center offset models were applied as fundamental corrections for PPP. GPS satellite orbit and clock offsets were taken from the International GNSS Service official products which were interpolated using the best available algorithms. Tropospheric and ionospheric delays were obtained by applying mapping functions to the outputs from scientific GPS data processing software and Global Ionosphere Maps, respectively. When the developed algorithms were tested for four days of data, the horizontal and vertical positioning accuracies were 0.8-1.6 and 1.6-2.2 meters, respectively. This level of performance is comparable to that of Differential GPS, and further improvements and fine-tuning of this suite of PPP algorithms and its implementation at a portable device should be utilized in a variety of surveying and Location-Based Service applications.

Keywords : PPP, Code Pseudorange, GPS/GNSS, Phase Center Offset, LBS

## 1. 서 론

전 세계적으로 스마트폰, 태블릿 PC 등 휴대용 내비

게이션 시장이 폭발적으로 확대됨에 따라 일반 사용자들의 위치정보서비스에 대한 요구 및 관심 또한 증가하고 있다(Kim, 2013). 이와 같이 위치기반서비스(LBS;

data received: 2014.01.09, data revised: 2014.01.22, data accepted: 2014.03.06

\* 교신저자 · 정회원 · 인하대학교 지리정보공학과 부교수(Corresponding author, Member, Associate professor, Dept. of Geoinformatics, INHA University, [kdpark@inha.ac.kr](mailto:kdpark@inha.ac.kr))

\*\* 인하대학교 지리정보공학과 석사, 현재 Broadcom 근무(Master, Dept. of Geoinformatics, INHA University, work in Broadcom, [jihye@broadcom.com](mailto:jihye@broadcom.com))

\*\*\* 정회원 · (주)지평스페이스 기술연구소 소장(Member, Manager of institute, Jipyong Space Tech Institute, [jhwon@jpspace.kr](mailto:jhwon@jpspace.kr))

\*\*\*\* 정회원 · 인하대학교 지리정보공학과 박사과정(Member, Doctoral student, Dept. of Geoinformatics, INHA University, [dskim@inha.edu](mailto:dskim@inha.edu))

Location-Based Service) 사용자의 확대에 따라 휴대용 내비게이션에 탑재할 수 있는 위치정보 제공의 핵심기술 중의 하나인 GPS를 포함한 GNSS의 위치정보 정확도에 대한 관심 또한 증가하고 있다. 단일 GPS를 사용할 경우 정확도가 낮아진다는 단점을 보완하기 위해 DGPS와 네트워크 DGPS 기술이 개발되었지만, 이는 모두 기준국 역할을 하는 GPS 상시관측소의 데이터를 실시간 처리해 필요한 보정정보를 추출하고 이를 사용자에서 전송하는 절차가 필요하다. 그러나 지역적·국제적으로 제공되는 보정정보를 활용해 단일 수신기만으로 위치정보를 산출하는 정밀단독측위(PPP; Precise Point Positioning) 기술을 적용할 경우 별도의 기준국을 설치하지 않고 DGPS와 유사한 성능을 가질 것으로 예상된다.

PPP는 기준국에서 생성되는 보정정보를 직접 수신하지 않고, 제 3자가 제공하는 GPS 위성의 궤도오차와 시계오차 정보를 이용해 측위를 수행한다. 측지용 수신기의 경우 이중주파수 수신기로 전리층오차를 제거한 다음 대류권오차를 추정하는 방식으로 위치정보를 산출한다. 그러나 휴대용 단말기의 경우 고가의 이중주파수 수신기를 사용할 수 없기 때문에 추가로 전리층오차 정보를 적용할 필요가 발생한다. 또한 대류권오차를 추정하지 않고 실험적인 모델을 적용하거나 별도의 채널을 통해 획득한 대류권오차 보정정보를 적용할 수 있다 (Kim et al., 2012). 해외의 경우 Heroux and Kouba (1995)가 최초로 PPP라는 용어를 사용하기 시작하면서 최근까지도 매우 다양한 관련연구가 진행되고 있다. 특히 Zumbege et al.(1997)은 매일 수백~수천 개소의 전 세계 기준국 데이터를 PPP로 신속하게 처리하는 기술로 발전시킴으로써 이 때부터 PPP가 GPS 자료처리의 획기적인 방법으로 자리매김 하였다. 국내에서는 최근 Choi et al.(2011)가 PPP 알고리즘을 개발해 정지측위의 경우 2-3cm 정확도의 위치정보를 산출한 경우가 유일한 연구성과이다. 하지만, 앞서 기술한 국내·외 연구는 모두 코드의사거리가 아닌 반송파 위상 기반이므로 휴대용 단말기에 적용할 수 없다는 한계가 있다.

이 연구에서는 휴대용 단말기 적용을 목적으로 코드의사거리 관측치를 이용한 PPP 알고리즘의 핵심 모듈을 개발하였다. 이를 위해 가장 정확한 GPS 오차모델을 적용해 PPP의 최고성능을 파악하고, DGPS와의 동시측위를 통한 성능비교를 수행 하였다.

## 2. PPP 측위를 위한 GPS 오차모델 적용 방법

코드의사거리 관측치 기반 PPP 알고리즘 개발을 위

해 GPS 오차를 크게 두 분류로 나누어 적용하였다. 첫 번째 분류는 기본적인 GPS 오차모델로 그룹 딜레이(GD; Group Delay), 상대성 효과, 위성의 위상중심오프셋(PCO; Phase Center Offset)이다. 두 번째는 실시간 보정정보로 제공되어야 할 GPS 위성의 궤도 및 시계오차, 대류권과 전리층 오차이다.

### 2.1 기본 모델

코드의사거리 관측방정식은 각종 오차를 포함하여 식(1)과 같이 나타낼 수 있다(Misra and Enge, 2011).

$$p = \rho + c(\delta t_r - \delta t^s) + I + T + M + P + \delta + \epsilon \quad (1)$$

식(1)의 각 항은 아래와 같다.

- $p$  : 코드의사거리 관측치
- $\rho$  : 수신기와 위성의 3차원 거리
- $c$  : 빛의 속도
- $\delta t_r$  : 수신기시계 오차
- $\delta t^s$  : 위성시계 오차
- $I$  : 전리층 오차
- $T$  : 대류권 오차
- $M$  : 다중경로 오차
- $P$  : 위상중심 오차
- $\delta$  : 수신기 바이어스
- $\epsilon$  : 확률 오차

일반적인 단독측위에서는 위성시계 오차인  $\delta t^s$ 와  $\rho$ 의 계산에 필요한 위성의 좌표정보로 GPS 위성에서 실시간 제공하는 방송궤도력을 사용한다. 그러나 방송궤도력의 좌표 정확도는 1m, 위성 시계오차 정확도는 5ns 수준으로 정밀단독측위에 사용할 수 없는 수준이다. 이 연구에서는 정확한 위성 좌표 및 시계오차 정보가 실시간 제공되는 환경을 가정하였으며, 이를 위해 정밀궤도력을 사용하였다. 전리층과 대류권 오차의 경우 단독측위에서는 단순한 경험적인 모델을 적용하지만, 정밀단독측위에서는 별도의 채널을 통해 실시간 전리층과 대류권 보정정보를 제공받는다. 다중경로오차는 두 경우 모두 무시하게 되는데 이는 코드의사거리 관측치를 이용한 측위의 큰 한계로 남게 된다(Misra and Enge, 2011). 위상중심 오차  $P$ 는 위상중심변동 오차와 위상중심오프셋 오차로 분류된다. 방송궤도력 기반의 단독측위 알고리즘에서는 위상중심 오차를 고려하지 않지만, 이 연구에서 개발한 정밀단독측위 알고리즘에서는 정밀궤도력 기반의 위성좌표를 사용하기 때

문에 위상중심오프셋 오차를 모델링 하였다(2.1.2절 참고). 그리고 마지막 항인 수신기 바이어스는 수신기시계 오차 추정에 포함된다.

### 2.1.1 그룹 딜레이의 상대성 효과

그룹 딜레이와 상대성 효과는 단일차분과 이중차분을 이용하는 상대측위의 경우에는 제거되지만 단독측위(point positioning)에서는 제거되지 않으므로 단독측위 알고리즘에 반드시 적용되어야 하는 오차이다. 이와 같은 이유 때문에 GPS 위성의 항법메시지에 두 오차에 관련된 정보가 실시간으로 제공된다. 먼저 그룹 딜레이  $T_{GD}$ 는 L1과 L2의 코드의사거리 관측치 사이에 발생하는 신호전달경로의 차이로 위성 제조사에서 제공하는 값이지만, 위성 발사 후 운용단계에서도 지속적으로 갱신되고 있다(Misra and Enge, 2011). 그룹 딜레이는 위성시계오차  $\delta t^s$ 에 추가적인 보정량으로 아래 식(2)과 같이 적용한다.

$$\delta t^s = a + b(t - t_{oc}) + c(t - t_{oc})^2 - T_{GD} \quad (2)$$

여기서  $a$ ,  $b$ ,  $c$ 는 각각 위성시계오차의 bias, drift, drift rate이고,  $t_{oc}$ 는 기준시각(time of ephemeris)이다. 만약 L2 주파수로 전송되는 코드인 P2와 L2C를 이용할 경우는 식(2) 대신에 아래 식(3)을 사용해야 한다.

$$\delta t^s = a + b(t - t_{oc}) + c(t - t_{oc})^2 - \left( \frac{f_{L_1}}{f_{L_2}} \right)^2 T_{GD} \quad (3)$$

여기서  $f_{L_1}$ 과  $f_{L_2}$ 는 각각 L1과 L2 주파수로 1575.42MHz와 1227.60MHz이다.

위성과 수신기의 상대운동에 따라 다르게 발생하는 상대성 효과는 GPS 위성의 궤도와 신호전달경로에 영향을 주고 위성과 수신기의 시계에 다양한 오차를 발생시키지만, 가장 중요하게 고려해야 하는 효과는 위성시계오차이다(Misra and Enge, 2011). 이 연구에서는 상대성 효과가 위성시계오차에 미치는 영향만을 고려하였다. 상대성효과를 위성시계오차에 적용하는 방법은 식(4)와 같다.

$$\delta t^s = a + b(t - t_{oc}) + c(t - t_{oc})^2 + \delta t_{RL} \quad (4)$$

식(4)에 나타난 상대성효과인  $\delta t_{RL}$ 은 식(5)로 계산된다(Misra and Enge, 2011).

$$\delta t_{RL} = -4.4428076333 \cdot 10^{-10} e \sqrt{a} \sin E \quad (5)$$

여기서  $e$ ,  $a$ ,  $E$ 는 각각 궤도이심률(eccentricity), 궤도장반경(semi-major axis), 이심근점이각(eccentric anomaly)이다.

### 2.1.2 위상중심오프셋

코드의사거리 관측치는 GPS 위성 안테나의 위상중심과 수신기 안테나의 위상중심 사이의 거리를 의미한다. 그러나 이 연구에서 사용하는 정밀궤도력은 방송궤도력과는 달리 GPS 위성의 3차원 좌표를 위상중심이 아닌 위성의 질량중심 기준으로 제공한다(3.2절 참고). 그러므로 정밀궤도력의 좌표를 위성 안테나 위상중심의 좌표로 변환하는 과정이 필요하다(Xu, 2007).

위상중심변동(phase center variations)이란 안테나의 기하학적 중심점이 실제로 전파가 송·수신되는 위치와 일치하지 않는 현상을 의미하며, 그 영향은 GPS 위성과 수신기의 기하학적 상대위치에 따라 달라진다.

위상중심오프셋은 위상중심변동의 평균값을 의미한다. 반송파위상 관측치를 이용하는 정밀측위에서는 위상중심변동까지 고려하지만, 코드의사거리를 이용한 단독측위의 경우에는 위상중심변동을 고려하지 않고, 위상중심오프셋을 적용하는 것으로 충분하다(Misra and Enge, 2011).

이 연구에 사용된 위성 블록별 위상중심오프셋 값의 통계치는 Fig. 1과 같다(Kim, 2013). Fig. 1에 나타난 GPS 위성의 위상중심오프셋은 IGS08 모델로 산출한 위상중심좌표계의 Z축 방향 값이다(IGS homepage). 여기서 Z 방향은 GPS 위성의 질량중심에서 지구의 질량중심으로의 방향을 의미한다. 일반적으로 GPS 위성 안테나의 위상중심오프셋은 Z 방향 값이 가장 크기 때문에 X와 Y방향의 보정량은 이 연구에서 고려하지 않았다. GPS 위성을 블록(Block)으로 구분할 때 I, II,

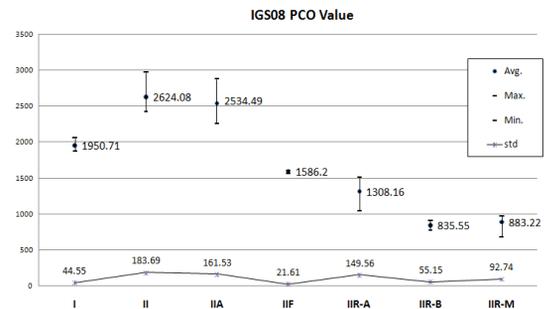


Figure 1. Statistics of Phase Center Offsets in the direction of Z for each IGS08 Block

II-A, II-R, II-RM, IIF로 나누지만, 위상중심오프셋과 관련해서는 II-R을 II-RA와 II-RB로 세분하는 것이 원칙이다. 그 이유는 Block II-R의 10번째 위성부터 위성안테나 패널의 설계가 변경되었기 때문이다(Steigenberger, 2009).

Fig. 1을 보면 GPS 위성 안테나 위상중심오프셋이 블록별로 상이한 특성을 보이고 있음을 알 수 있고, 같은 블록이라도 상당한 차이의 표준편차를 가지기 때문에 이 연구에서는 관측되는 각 위성에 대해 IGS에서 제공하는 개별적인 위상중심오프셋 값을 적용하였다(IGS homepage).

## 2.2 보정 정보

### 2.2.1 위성궤도 및 위성시계 오차

이 연구에서는 GPS 보정정보가 실시간 제공되는 환경을 가정하여 PPP 알고리즘을 개발하였기 때문에, 위성 좌표와 시계오차 정보로 IGS 산출물(IGS Products)을 적용하였다. IGS 분석센터에서 제공하는 정밀궤도력은 3차원 궤도 정확도가  $\sim 2.5\text{cm}$ 로 방송궤도력의  $\sim 100\text{cm}$ 보다 높으며, 위성시계오차의 경우에도 75ps로 높은 정확도를 갖는다(IGS homepage). IGS 정밀궤도력은 SP3 포맷으로 제공되고 15분 간격의 위성 좌표를 포함하고 있기 때문에 이를 관측시각의 좌표로 환산하기 위해 13차 라그랑지 다항식(Lagrange Polynomial) 보간법을 적용하였다(Kim, 2009).

위성시계오차의 경우 정밀궤도력으로 제공되는 15분 간격의 SP3 파일을 사용하지 않고 CLK 파일의 정보를 적용하였다. CLK 파일의 경우 30초 간격의 위성시계오차를 제공하기 때문에 앞서 정밀궤도력과 같이 특정 시각의 위성시계오차로 보간하는 과정이 필요하다. 이 연구에서는 선형보간을 사용하였는데, 그 이유는 Fei et al.(2010) 및 유사 연구결과에서 30초 또는 5초 간격으로 제공되는 위성시계오차의 경우 보간법에 따른 영향은 없으므로 자료처리속도 향상을 위해 선형보간법을 권장하고 있기 때문이다.

### 2.2.2 대류권 오차

GPS 신호는 대류권을 통과하면서 건조가스와 수증기에 의해 신호지연현상이 발생한다. 대류권오차는 온도, 습도, 기압의 함수이며, 전리층오차와는 달리 L 밴드 대역에서 주파수에 따른 굴절정도가 동일하기 때문에 이중주파수 수신기를 이용한다 하더라도 정확하게 계산할 수 없다(Misra and Enge, 2011). 따라서 PPP에서는 대류권 오차를 통계적 추정을 통해 결정하거나 경험적 모델을 적용해야 한다. 통계적 추정을 위해서는

측위알고리즘이 복잡해지기 때문에 이동형 단말기에서 측위알고리즘을 구현하기에는 전원 및 CPU에 제한적인 문제가 발생하고, 경험적 모델만을 사용할 경우 측위정확도가 낮아진다는 단점이 있다. 따라서 이 연구에서는 대류권오차를 보정하기 위해 별도의 채널을 통해 격자형의 대류권오차 보정정보를 수신하는 환경을 가정하였다(Kim et al., 2012).

코드의사거리 기반 PPP의 성능을 파악하기 위해 가장 정확한 대류권오차정보로써 고정밀 과학기술용 GPS 자료처리 프로그램인 GIPSY로 산출한 대류권오차가 이 연구의 보정정보로 사용하였다. 대류권오차의 천정방향의 총 지연량(ZTD, Zenith Total Delay)은 약 90%의 건조지연(ZHD, Zenith Hydrostatic Delay)과 약 10%의 습윤 지연(ZWD, Zenith Wet Delay)으로 구분할 수 있다. GIPSY로 산출한 건조지연과 습윤지연의 천정방향 값을 수신기 안테나와 GPS 위성간의 시선방향에 대한 지연값으로 환산하는 과정은 식(6)과 같다.

$$\delta T = \delta T_h + \delta T_w = m_h(e)ZHD + m_w(e)ZWD \quad (6)$$

여기서 시선방향 대류권오차  $\delta T$ 는 시선방향의 건조지연량  $\delta T_h$ 과 시선방향의 습윤지연량  $\delta T_w$ 의 합으로 나타내며, 천정방향 건조지연과 습윤지연은 고도각( $e$ )에 의한 건조 사상함수( $m_h$ )와 습윤 사상함수( $m_w$ )를 사용하여 시선방향으로 환산된다.

식(4)에서 사상함수는 천정방향의 지연량을 시선방향의 지연량으로 변환하는 함수로써 적용하는 사상함수에 따라서 좌표의 정확도 및 편향, 그리고 오차의 주기성 등이 상이하게 발생하기 때문에 적절한 사상함수의 선택이 중요하다(Won et al., 2010). 이 연구에서는 최신 사상함수 중에서 VMF(Vienna Mapping Function)와는 달리 실시간 적용이 가능하고, VMF와 유사한 정확도를 가진 GMF(Global Mapping Function)를 사상함수로 채택하였다(Boehm et al., 2006).

### 2.2.3 전리층 오차

위성에서 송신된 GPS 신호는 전리층을 통과하며 자유전자들과 충돌하게 되는데 이 과정에서 신호가 굴절되고 지연되는 현상이 발생한다. GPS 신호가 전리층을 통과하면서 발생하는 오차는 이중주파수 수신기를 이용할 경우 무전리층 선형조합을 이용하여 대부분 제거할 수 있다. 무전리층 선형조합을 사용할 수 없는 단일주파수 사용자는 전리층 오차 정보를 제공받아야 하는데 항법메시지에 포함된 Klobuchar 모델과 IGS에서

제공하는 GIM(Global Ionosphere Model) 모델을 사용하는 것이 일반적이다. Klobuchar 모델은 항법메시지로 제공되기 때문에 간편하게 사용할 수 있다는 장점이 있으나 전리층 오차의 약 60% 밖에 제거할 수 없다(Klobuchar, 1987). 따라서 이 연구에서는 정밀한 전리층 오차 정보를 제공받을 수 있는 환경을 가정하기 위해 보다 정확한 GIM 모델을 사용하여 전리층 오차를 보정하였다.

GIM 모델은 자유전자가 450km 상공의 단일층에 밀집되어 있다고 가정하고 천정방향의 총전자수(VTEC, Vertical Total Electron Contents)를 TECU 단위로 제공한다. 1 TECU는 1m<sup>2</sup> 단위면적을 가지는 기둥(column)에 1×10<sup>16</sup>개의 자유전자가 분포한다는 것을 의미하고, 1 TECU는 L1 주파수의 코드의사거리에서 대략 0.164m의 거리오차로 환산된다. GIM 모델은 위경도 2.5°×5.0° 격자 간격과 2시간의 시간 간격을 갖는 IONEX 포맷으로 제공되는데, GIM 모델에서 제공되는 VTEC를 측위 알고리즘에 적용하기 위해 GPS 신호가 450km 상공의 가상의 전리층을 통과하게 되는 지점(IPP, Ionospheric Pierce Point)의 좌표를 산출하였으며(Schaer et al., 1998), Multi-Quadratic 보간법을 사용하여 IPP 지점의 VTEC을 산출하였다(Skone, 1998). 또한 이렇게 산출된 VTEC은 전리층 사상함수를 이용하여 시선방향에 대한 전리층오차로 최종 변환하였다(Mannucci et al., 1993).

### 3. PPP 측위 정확도 평가

#### 3.1 관측데이터

이 연구에서는 보정정보 적용에 따른 PPP 정확도 평가를 위해 인화대학교에 위치한 IHU1 관측소를 이용하여 측위를 수행하였다. IHU1 관측소는 Ashtech UZ-12 수신기, ASH701945E\_M 안테나를 보유하고 있으며, 보정정보 적용에 따른 측위 정확도 평가에는 IHU1에서 관측한 2008년 9월 29일(DOY 273)과 2010년 11월 1일(DOY 305)의 데이터를 사용하였다. 또한 Paroscientific MET-4A 기상센서를 이용하여 압력과 온도를 관측하여 대류권오차를 건조지연과 습윤지연으로 구분하였다. IHU1 관측소의 정밀좌표는 GIPSY로 계산하고, 이를 기준으로 PPP 알고리즘의 측위오차를 검증하였다. 코드의사거리 기반의 PPP 알고리즘은 2.1절에서 설명한 기본모델은 모두 적용하였으며, 2.2절의 보정정보가 실시간 제공된다는 가정으로 정확도 분석을 수행하였다.

3.3절에서는 코드의사거리 PPP의 측위성능을 DGPS

와 비교 분석하였으며 이를 위해 IHU1과 약 1m 떨어진 곳에 위치한 IHU3 관측소를 이용하여 실험을 진행하였다. IHU3 관측소는 Trimble NetRS 수신기와 TRM41249.00 안테나로 구성되어 있다. DGPS와의 성능비교에는 팔미도의 의사거리보정치(PRC; Pseudorange Correction) 확보가 가능했던 2013년 6월 24일(DOY 175)와 25일(DOY 176)의 데이터가 사용되었다.

#### 3.2 보정정보 적용에 따른 측위성능 향상

PPP 기법에서 GPS 위성 궤도와 시계오차는 전리층 오차나 대류권오차보다 그 영향은 작지만 측위 정확도에 직접적인 영향을 미치기 때문에 반드시 정확하게 보정해 주어야 한다. 기존의 코드의사거리 기반 단독측위 알고리즘은 1m 수준의 정확도를 가진 방송궤도력을 이용하지만 이 연구에서 개발한 정밀단독측위의 경우 궤도보정정보가 적용된 정확한 GPS 궤도정보를 활용하는 것으로 가정하였다. 현재 IGS에서 제공하는 실시간 궤도보정정보를 적용할 경우 IGS 정밀궤도력에 근접하는 약 5cm 정확도 확보가 가능하기 때문에(IGS homepage) 이 연구에서는 정밀궤도력과 방송궤도력의 측위오차 영향을 비교하였다. Table 1은 2008년 9월 29일 IHU1 데이터를 방송궤도력과 정밀궤도력으로 각각 처리한 결과로 산출된 측위오차를 RMSE(Root-Mean-Square Error)로 비교한 것이다. Table 1을 보면 정밀궤도력을 이용함으로써 측위정확도가 수평방향과 수직방향으로 각각 0.18m와 0.97m 향상되었다. 그러나 전리층과 대류권 오차가 보정되지 않아 수평방향으로 약 2m, 수직방향으로 약 10m 수준의 다소 큰 좌표오차가 남아 있는 것을 확인할 수 있다.

다음으로 전리층오차와 대류권오차 보정여부에 따른 측위성능을 분석하기 위해 정밀궤도력을 적용한 측위 알고리즘에 GIM 모델로 전리층오차를 보정하고, GIPSY로 산출한 대류권오차를 차례대로 적용하였다. Table 2는 전리층과 대류권 오차 보정에 따른 측위오차 변화를 RMSE와 향상률로 나타낸 것이며, Fig. 2는 전리층오차만 보정한 경우와 대류권오차까지 모두 보정한 좌표오차를 시계열로 나타낸 것이다. Table 2의 (a)는 Table 1에 제시한 성과로 위성궤도(SO; satellite

Table 1. Comparison of positioning errors using broadcast and precise orbits (unit: meters)

Error	broadcast	precise
Horizontal	2.08	1.90
Vertical	11.48	10.51
3-D	11.62	10.68

Table 2. Comparison of positioning errors after ionospheric and tropospheric corrections [SO; satellite orbit correction, SC; satellite clock correction, I; ionosphere correction, T; troposphere correction]

Error	(a) SO/SC	(b) SO/SC/I		(c) SO/SC/I/T	
	RMSE[m]	RMSE[m]	Accuracy Improvement[%]	RMSE[m]	Accuracy Improvement[%]
Horizontal	1.90	1.85	2.6	1.56	15.7
Vertical	10.51	7.50	28.6	2.04	72.8
3-D	10.68	7.73	27.6	2.57	66.8

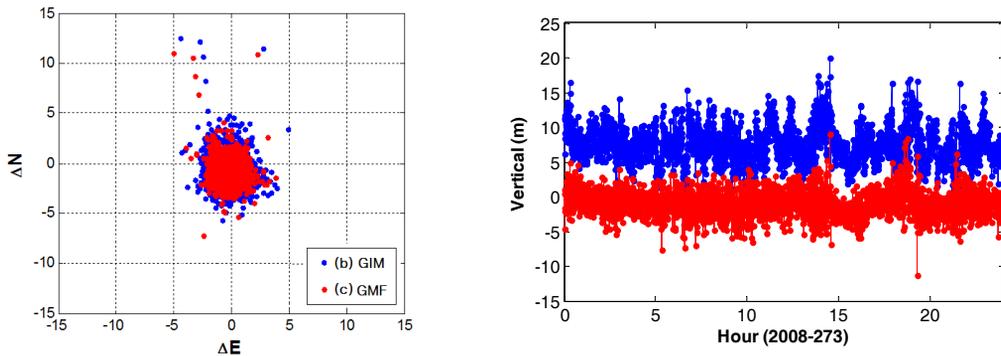


Figure 2. Horizontal and vertical PPP positioning errors after correcting ionospheric and tropospheric effects

orbit)와 위성시계오차(SC; satellite clock) 보정정보를 적용한 경우이다. (b)는 (a)에 전리층오차(I; ionosphere)를 적용한 것이고, (c)는 (b)에 추가적으로 대류권오차(T; troposphere)를 적용한 성과이다.

Table 2에 나타난 바와 같이 GIM 모델을 사용하여 전리층 오차를 보정한 경우와 GIPSY로 산출한 대류권 오차를 보정한 경우 모두 수평방향의 정확도 항상 보다는 수직방향의 정확도 향상이 훨씬 큰 것을 확인 할 수 있다(Fig. 2). 추가적인 특징으로 전리층 보정에 따른 효과보다 대류권 보정에 따른 정확도 향상률이 더 큰 것으로 나타나는데 이는 대류권 보정정보는 GIPSY로 정확하게 적용할 수 있었던 반면, 전리층 보정에 사용된 GIM 모델은 Klobuchar 모델보다는 정확하지만 2~8 TECU 수준의 정확도를 갖기 때문에 상대적으로 보정효과가 크지 않은 것으로 판단된다(IGS homepage). 따라서 향후 한반도 특성에 맞는 지역전리층모델(RIM; Regional Ionosphere Model)이 가용하게 될 경우 추가적인 정확도 향상이 기대된다.

Table 2와 Fig. 2에 나타난 결과는 2008년 9월 29일의 데이터를 처리한 결과로, 개발한 알고리즘의 성능의 일관성을 파악하기 위해 추가적으로 2010년 11월 1일 데이터를 Table 2에 나타난 동일한 방법(SO/SC/I/T)로 처리하였다. 그 결과 수평, 수직, 3차원 오차가 각각 1.56m, 2.18m, 2.68 m로 나타나 두 실험 날짜에 대해

동일한 수준의 성과를 얻을 수 있었다. 실험결과를 정리하면 이 연구에서 개발된 코드의사거리 기반 PPP 알고리즘에 정확한 보정정보가 제공된다고 가정하면, 대략 수평방향으로 1.5m, 수직방향으로 2.0m 수준의 측위 성능이 가능할 것으로 판단된다. 이와 같은 결과는 충분한 정확도를 갖춘 보정정보가 실시간 제공될 경우 PPP는 DGPS와 유사한 수준의 측위 정확도를 달성할 수 있음을 보여준다. 3.3절에서는 이와 같은 가능성을 확인하기 위해 동일한 데이터를 PPP로 처리한 결과와 현재 해양수산부 위성항법중앙사무소에서 제공하는 DGPS 서비스 기반의 측위 결과를 비교하였다.

### 3.3 PPP와 DGPS 측위 정확도 비교

이 연구에서 개발한 PPP 알고리즘과 보정정보 적용에 따른 정확도를 DGPS 성능과 비교하기 위해 2013년 6월 24일과 25일에 24시간 동안 IHU3 관측소에서 생성된 30초 간격 자료를 사용하였다. DGPS 측위를 위해서는 NTRIP을 이용하여 팔미도(PALM) 관측소의 PRC를 실시간으로 수신해 저장한 다음 기본적인 단독 측위 알고리즘에 PRC를 보정하는 방식으로 후처리 DGPS 측위를 수행하였다. 그 결과는 Table 3과 같다. PPP의 경우 수평방향 측위오차가 2일 모두 1미터 이하로 산출되어 이 연구에서 개발한 알고리즘의 유효성을 재차 확인할 수 있었다.

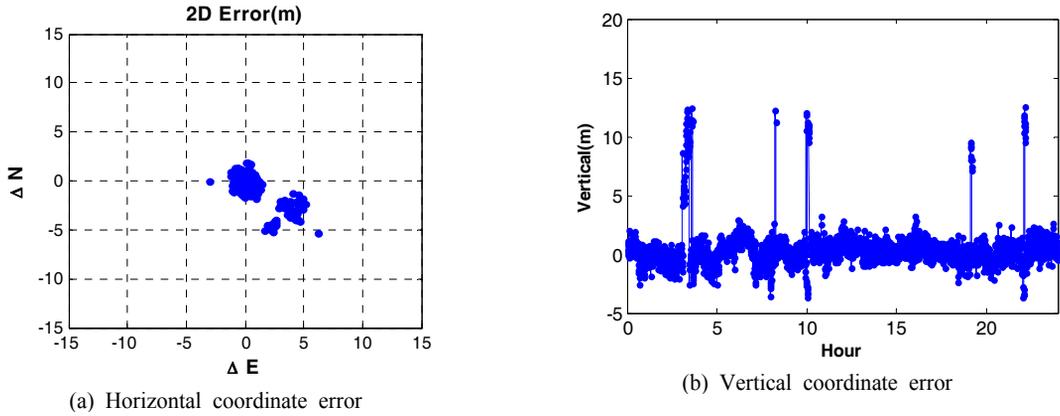


Figure 3. DGPS coordinate error time series with epochs without PRC receptions

Table 3. Comparison of PPP and DGPS positioning errors (unit: m)

Error	June 24th, 2013		June 25th, 2013	
	PPP	DGPS	PPP	DGPS
Horizontal	0.76	1.26	0.78	1.06
Vertical	1.56	2.75	1.60	1.87
3-D	1.74	3.02	1.78	2.15

Table 3을 보면 모든 방향에서 PPP가 DGPS에 비해 대략 20-70% 수준으로 정확도가 높게 나타난다. 2013년 6월 25일에 각 epoch에서의 DGPS 측위의 오차를 수평방향과 수직방향으로 분석한 Fig. 3을 보면 일부 구간에서 높은 오차를 보이는 이상점(outlier)이 나타나고 있음을 알 수 있다. DGPS 로그파일을 면밀히 검토한 결과 이상점이 발생하는 구간에서 팔미도 기준국 PRC가 NTRIP을 통해 수신되지 않았음을 파악하였다.

PRC 미수신에 의한 이상점 발생시기를 제외하고 측위오차를 분석한 결과 수평오차는 1.06m에서 0.61m로, 수직오차는 1.87m에서 0.90m로 줄어들었다.

Fig. 4에는 2일간 진행한 실험의 PPP, 일반DGPS측위(DGPS(a)), 수정DGPS측위(DGPS(b)) 세 가지 측위 오차를 시각적으로 비교하였다. 여기서 “수정”DGPS측위란 PRC가 수신되지 않아 이상점이 발생한 구간을 제외한 결과이다. 결론적으로 DGPS 기준국의 보정정보만 원활하게 수신된다면 DGPS가 이 연구에서 개발한 PPP보다 측위성능이 우수한 것으로 판단된다. 그러나 실험대상이 된 IHU3는 팔미도 기준국과의 기선거리가 10km에 불과해 아주 짧은 기선거리이므로 두 관측소에서 발생하는 공통오차가 거의 완벽하게 제거되었기 때문에 DGPS 성능이 매우 우수하게 나온 것으로 판단된다. DGPS의 특성 상 기준국으로부터 기선거리

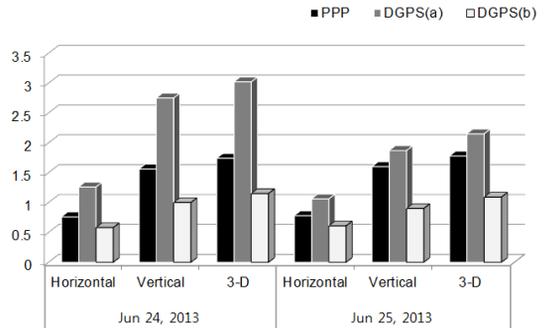


Figure 4. Comparison of PPP and DGPS positioning errors

가 멀어질수록 측위성능이 저하되지만, 이 연구에서 개발한 PPP는 기선거리 제약을 받지 않아 서비스 전역에 균일한 성능을 제공할 것으로 기대된다(Misra and Enge, 2011). 또한 국내에서 유일하게 전국망 DGPS 서비스를 제공하는 해양수산부의 NDGPS(Nationwide DGPS)의 경우 인터넷 기반의 NTRIP 프로토콜의 불안정성 때문에 DGPS 보정정보 수신에 원활하지 않아 Fig. 4에서 나타낸 DGPS(a)와 같이 PPP보다 측위정확도가 낮아지는 상황이 빈번히 발생할 수 있다는 한계를 고려할 때 PPP의 효용성이 더욱 높다고 할 수 있다 (Ministry of Maritime Affairs and Fisheries in Korea, 2012).

#### 4. 결론

이 논문에서는 휴대용 단말기를 이용한 LBS 응용분야에서 중요한 위치를 차지하는 GPS 측위성능의 향상과 안정성 확보를 위해 코드의사거리 기반의 PPP 알고

리즘을 개발하고 그 성능을 검증하였다. 이를 위해 상대측위에서는 공통오차로 제거되지만 PPP와 같은 단독측위에서는 반드시 고려해줘야 하는 그룹 딜레이와 상대성 효과를 모델링하고 GPS 위성의 안테나 위상중심오프셋을 각 위성별로 보정해 주었다. PPP에 반드시 필요한 위성의 궤도와 시계오차정보는 가장 정확한 IGS 산출물에 보간 알고리즘을 적용해 측위 해당시간에의 최적의 값으로 산출하였다. 나머지 고려사항인 대류권오차는 GIPSY로 산출한 천정방향 건조지연과 습윤지연 참값에 최신 GMF 사상함수를 적용하고, 전리층오차는 GIM 모델을 활용하는 방식으로 알고리즘을 구현하였다. 개발된 PPP 알고리즘의 성능을 4일간 테스트한 결과 수평오차는 0.8-1.6미터, 수직오차는 1.6-2.2미터 수준으로 나타났다. 이를 DGPS 측위결과와 비교한 결과 유사한 정확도를 나타내는 것으로 나타남을 확인하였다. 해양수산부에서 제공하는 NDGPS는 기선거리가 증가함에 따라 오차가 비례해서 커지고, 간헐적인 NTRIP 프로토콜 오류가 발생하는 점을 고려한다면 이 연구에서 개발한 PPP 알고리즘의 효용성과 활용도가 높을 것으로 기대된다.

### 감사의 글

이 연구는 기상청 지진기술개발사업(CATER 2013-8090)의 지원으로 수행되었습니다.

### References

- Boehm, J., Niell, A., Tregoning, P. and Schuh, H., 2006, Global mapping function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data, *Geophysical Research Letters*, 33, L07304, doi:10.1029/2005GL025546.
- Choi, B. K., Back, J.-H., Cho, S.-K., Park, J.-U. and Park, P.-H., 2011, Development of precise point positioning method using global positioning system measurements, *Journal of Astronomy and Space Sciences*, 28(3), pp. 217-223.
- Fei, G, Xiaohong, Z, Xingxing, L, and Shixiang, C., 2010, Impact of sampling rate of IGS clock on precise point positioning, *Geo-spatial Inform. Sci*, 13(2), pp.150-156.
- Heroux P., and Kouba, J., 1995, GPS precise point positioning with a difference, *Geomatics '95*, Ottawa, Ontario, Canada.
- IGS homepage, <http://igsceb.jpl.nasa.gov/index.html>.
- Kim, D., Won, J., Son, E.-S., Park, K.-D., 2012, Generation of grid maps of GPS signal delays in the troposphere and analysis of relative point positioning accuracy enhancement, *Journal of Navigation and Port Research*, Vol. 36, No. 10, pp. 825-832.
- Kim, H.-I., 2009, Development of integrated global navigation satellite system simulator for evaluation of positioning availability and accuracy improvement, Master's Thesis, Inha University, pp. 19-26.
- Kim, J. H., 2013, A study on accuracy improvement of precise point positioning based on GPS code pseudo-range measurements, Master's Thesis, Inha University, pp. 28-32.
- Klobuchar, J. A., 1987, Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users, *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, AES-23, pp. 325-331.
- Mannucci A. J., Wilson B. and Edwards C., 1993, A new method for monitoring the Earth's ionospheric total electron content using the GPS global network, *Proceedings of the ION GPS-93*, Salt Lake City, Utah, pp. 1323-1332.
- Ministry of Maritime Affairs and Fisheries in Korea, 2012, Technology development for regional augmentation and commercialization of DGPS based on terrestrial DMB, Final Report, pp. 1-154.
- Misra, P. and Enge, P., 2011, *Global positioning system: Signals, measurements, and performance*, Revised Second Edition, Ganga-Jamuna Press.
- Schaer, S., Gurtner, W., and Feltens, J., 1998, IONEX: The ionosphere map exchange format version 1, In *Proceedings of the IGS AC Workshop*, Darmstadt, Germany.
- Skone S., 1998, Wide area ionosphere grid modelling in the auroral region, Ph.D. Dissertation, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.
- Steigenberger, P., 2009, Reprocessing of a global GPS network, Ph.D. Dissertation, Deutsche Geodatische Kommission.
- Won, J., Park, K.-D., Ha, J. and Cho, J., 2010, Effects of tropospheric mapping functions on GPS data processing, *Journal of Astronomy and Space Sciences*, 27(1), pp.21-30.
- Xu, G., 2007, *GPS: theory, algorithms and applications*, 2nd edn. Springer, Berlin.
- Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M., and Webb, F. H., 1997, Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *Journal of Geophysical Research*, 102(B3), pp.5005-5017.