

IGS 정밀궤도력을 이용한 SBAS 위성궤도 및 시계보정정보의 정확도 분석

Accuracy Analysis of SBAS Satellite Orbit and Clock Corrections using IGS Precise Ephemeris

정명숙*, 김정래*

Myeong-Sook Jeong*, Jeong-Rae Kim*

요 약

SBAS(Satellite Based Augmentation System) 시스템에서는 GNSS 사용자들의 위치 정확도 향상을 위해 위성궤도 및 시계보정정보를 제공하고 있는데, 본 논문에서는 이러한 보정정보의 정확도에 대해 분석하였다. IGS(International GNSS Service)에서 제공하는 GPS 위성의 정밀궤도력을 참값으로 가정하고, 그에 대한 오차를 이용하여 정확도를 분석/수행하였다. 이때 IGS 정밀궤도력과의 정확한 비교를 위해 GPS 위성에 대한 안테나 위상중심 편차와 P1-C1 편이를 고려하였다. SBAS 위성궤도 및 시계보정 정보로는 미국의 WAAS와 일본의 MSAS 보정정보를 이용하였다. 정확도 분석을 통해 SBAS에서 제공하는 위성궤도 보정정보와 위성시계 보정정보가 상당한 상관관계를 가지고 있음을 확인하였다. 또한 보정정보의 정확도는 SBAS 시스템의 지상 네트워크 크기와 위성의 궤적에 영향을 받는 것을 확인하였다.

Abstract

SBAS(Satellite Based Augmentation System) provides GNSS satellite orbit and clock corrections for positioning accuracy improvement of GNSS users. In this paper, the accuracy of SBAS satellite orbit and clock corrections were analyzed by comparing with the IGS(International GNSS Service) precise ephemeris. The GPS antenna phase center offsets and the P1-C1 bias are considered for the analysis. The correction data of the US WAAS and the Japanese MSAS were analyzed. The analysis results showed that the SBAS satellite orbit and clock corrections are highly correlated. The correction data accuracy depends on the SBAS ground network size and orbit trajectories.

Key words : Satellite Based Augmentation System, Broadcast Ephemeris, IGS Final Ephemeris, Wide Area Augmentation System, Multi-functional Satellite Augmentation System

I. 서 론

GPS에서 제공하는 방송궤도력 (Broadcast

Ephemeris, BRDC)은 수 미터 내외의 위성궤도 및 시계오차를 갖는다. 이러한 오차는 사용자의 위치해 계산시 위치오차를 증가시키는 요인이 되는데, SBAS

* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부(School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University)

· 교신저자 (Corresponding Author) : 김정래

· 투고일자 : 2009년 4월 2일

· 심사(수정)일자 : 2009년 4월 3일 (수정일자 : 2009년 4월 20일)

· 게재일자 : 2009년 4월 30일

에서는 이들 오차 성분을 보정하기 위해 다른 여러 보정정보들과 함께 위성의 궤도 및 시계오차에 대한 보정정보를 제공하고 있다.

현재 운영되고 있는 SBAS 시스템으로는 미국의 WAAS(Wide Area Augmentation System), 일본의 MSAS(Multi-functional Satellite Augmentation System), 유럽의 EGNOS(European Geostationary Navigation Overlay Service), 인도의 GAGAN(GPS Aided Geo Augmented Navigation)등이 있다.

SBAS 시스템은 단일주파수 사용자의 위치해 향상을 위해 개발되었지만, 외국의 경우 이들 보정정보의 적용을 단일주파수 사용자에게만 국한시키지 않고, 다양한 방법으로 활용하기 위한 연구를 진행하고 있다. 캐나다의 경우 WAAS에서 제공하는 위성궤도 및 시계보정정보를 이중주파수 사용자에게 적용하여 사용자의 위치해를 향상시키기 위한 연구를 진행하였고, 미국은 현재 개발 중인 NDGPS-HP (Nationwide Differential Global Positioning System - High Performance)시스템에 WAAS 위성궤도 및 시계보정정보를 활용하기 위한 연구를 진행하였다[1,2]. 또한 국내에서도 간단한 방법을 통해 SBAS 위성궤도 및 시계보정정보의 정확도를 분석하는 연구가 진행되었다[3,4]. 국내에서도 일본의 MSAS 시스템의 위성궤도 및 시계보정정보를 활용할 수 있는 가운데, 그 활용에 앞서 MSAS 시스템에서 제공하는 위성궤도 및 시계보정정보의 정확도를 먼저 확인할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 IGS 정밀궤도력(Precise Ephemeris) 기준으로 정확한 SBAS 위성궤도 및 시계보정정보를 계산하는 방법에 대해 제시하고, 두 보정정보 간의 상관관계에 대해 분석함으로써 SBAS 위성궤도 및 시계보정정보의 정확도와 그 보정정보가 사용자의 위치해 계산 시 미치는 영향에 대해 분석하였다. 이를 위해 IGS 정밀궤도력에 대해 BRDC에 SBAS 위성궤도 및 시계보정정보를 적용하기 전/후의 오차 변화에 대해 각각 분석하고, 얻어진 궤도 및 시계오차를 사용자와 위성간의 거리오차인 URE(User Range Error)로 나타내어 위성궤도와 위성시계 보정정보 간의 상관관계에 대해 분석해 보았다. 이때 IGS 정밀궤도력과의 정확한 비교를 위해 BRDC와 SBAS 위성궤도 및 시계 보정정보에 GPS 위성의 안테나 위상중심 편차(antenna

phase-center offset)와 P1-C1편이에 대한 보정을 취한 후 비교를 수행하였다.

또한 WAAS와 MSAS 두 시스템에서 제공하는 위성궤도 및 시계보정정보의 정확도를 서로 비교 분석하고, 두 시스템간의 보정정보의 정확도 차를 GPS위성의 지상궤적을 통해 분석해 보았다. 뿐만 아니라 보정정보의 보정효과 확인을 위해 각 시스템에서 제공하는 위성궤도 및 시계보정정보 적용 전/후 GPS 위성의 의사거리 관측값의 잔차(殘差) 변화를 비교/분석해 보았다.

II. 보정정보의 정확도 분석방법

SBAS에서 제공하는 위성궤도 및 시계보정정보의 정확도를 분석하기 위해서는 정확한 GPS 위성의 궤도 및 시계오차 정보가 필요한데, 본 연구에서는 IGS에서 제공하는 가장 정밀한 궤도력인 final orbit을 참값으로 가정하고, 이에 대해 BRDC에 SBAS 위성궤도 및 시계오차 보정정보를 적용하기 전/후의 오차를 비교 분석해 보았다.

BRDC에서 제공하는 위성궤도 및 시계오차 정보의 경우 궤도정보는 약 1.6m, 시계정보는 약 2.10m의 오차를 갖는다. 이에 반해 IGS final orbit의 경우 위성궤도정보는 약 0.05m 이하, 위성시계정보는 약 0.03m 이하의 매우 낮은 오차값을 갖는다[3]. 따라서 IGS final orbit을 참값으로 가정하는 것에 큰 무리가 없다. 한편, BRDC의 경우 실시간으로 사용자가 위성궤도 정보를 이용할 수 있지만, final orbit은 궤도정보를 생성하기까지 약 2주의 시간이 소요됨으로 사용자가 실시간으로 정보를 활용할 수 없으며, GPS 데이터 후처리에 많이 이용되고 있다.

IGS 궤도에 대해 BRDC 및 SBAS 시스템에서 제공하는 위성궤도 및 시계정보를 정확하게 비교하기 위해서는 다음의 두 가지 사항을 반드시 고려 및 적용해야 한다.

첫째, BRDC와 SBAS 위성궤도정보의 경우 GPS위성의 안테나 위상중심(Antenna Phase-Center)을 기준으로 위성의 위치 정보를 추정하여 제공하고 있는데 반해, IGS의 경우 위성의 질량중심(Mass Center)을 기준으로 위성의 위치정보를 추정하여 제공하고 있다. 따라서

BRDC와 IGS 간의 궤도오차를 비교하기 위해서는 서로 다른 위성의 기준점을 일치시켜 주어야 한다[1,2,4].

이를 위해 IGS에서는 2005년 이전까지 모든 GPS Block IIA 위성에 대해 위성동체좌표계에서 X축 방향으로 0.279m, Y축 방향으로 0m, Z축 방향으로 1.023m 만큼의 동일한 안테나 위상중심 편차 값을 제공하였고, GPS Block IIR 위성에 대해서는 안테나 위상중심 편차를 적용하지 않았다[6,7]. 그러나 2005년 이후부터 IGS는 좀 더 정확한 위성 위상중심 편차를 제공하기 위해 ANTEX (Antenna Exchange Format) 파일을 통해 GPS 위성 동체좌표계(Body Frame)에서 각 위성 별 위성의 질량중심에 대한 안테나 위상중심 편차값을 제공하고 있다. 이때 GPS 위성의 동체좌표계의 Z축은 위성에서 지구중심방향을 가리키고, Y축은 Z축과 위성에서 태양을 가리키는 축 사이의 외적을 통해 결정된다. 또한 X축은 앞에서 얻어진 Y축과 Z축의 외적을 통해 얻어지게 된다. 본 연구에서는 안테나 위상중심 편차를 적용함에 있어, 의사거리오차에 대한 영향이 매우 작은 X축 성분을 무시하고 값이 가장 큰 Z축 성분의 편차만을 적용하였다[2].

둘째, GPS 위성에서 전송하는 코드 및 반송파 정보의 경우 서로 다른 주파수 및 관측값에 따라 신호처리 과정의 하드웨어적인 차이로 인해 관측값 간에 위성 clock bias와 수신기 clock bias가 존재 하게 된다. IGS의 경우 C1 코드와 P2 코드 관측값을 이용한 ionosphere-free linear combination 을 통해 시계오차를 추정하기 때문에 두 코드간의 위성 clock bias가 발생 하게 되고 이를 보정하지 않을 경우 추정된 위성시계 정보에 해당 clock bias가 포함되게 된다. GPS의 경우 항법메시지를 통해 P1 코드와 P2 코드간의 clock bias인 interfrequency bias를 제공하는데 이를 이용할 경우 위성시계오차에 포함된 P2-P1 clock bias를 보정 할 수 있다. IGS의 경우 추정한 위성시계오차에 포함된 P2-C1 clock bias를 interfrequency bias를 이용하여 보정해 주기 때문에 최종적으로 P1-C1 편이를 포함한 위성시계오차를 제공하게 된다[8,9].

반면에 SBAS 시스템의 경우 C1 코드만을 이용하는 단일주파수 사용자를 위해 보정정보가 제공되어 지기 때문에 전송되는 보정정보의 시간 기준은 오직 C1 코드에만 맞춰지게 되어 코드정보간의 clock bias

가 발생하지 않는다. 따라서 SBAS 시스템에서 제공하는 위성시계 보정정보에는 P1-C1 편이가 존재하지 않는다. IGS에서 제공하는 위성시계오차와의 정확한 비교를 위해서는 SBAS에서 제공하는 위성시계 보정정보에 P1-C1 편이를 보정해 주어야 한다. P1-C1 편이는 GPS 위성별로 다른 값을 가지며, 그 크기는 약 1m 이하로 매우 천천히 변하는 값이다. IGS에서는 각 위성별 P1-C1 편이에 대해 한 달에 한번 그 값을 갱신하여 GNSS 사용자에게 제공하고 있다.

다음은 본 연구에서 IGS 궤도와 비교를 위해 안테나 위상중심 편차와 P1-C1 편이를 고려한 위성궤도 및 시계오차 식을 정리한 것이다.

$$\vec{BO} = \vec{XYZ}_{BRDC.orbit} - \vec{APC} \tag{1}$$

$$BC = \Delta t_{BRDC.clock} \tag{2}$$

$$\vec{SO} = \vec{XYZ}_{BRDC.orbit} + \delta \vec{XYZ}_{SBAS.orbit} - \vec{APC} \tag{3}$$

$$SC = \Delta t_{BRDC.clock} + \delta t_{SBAS.clock} + b_{P1C1} \tag{4}$$

식 (1)과 식 (2)는 각각 BRDC의 위성궤도(\vec{BO}) 및 시계오차(BC) 식을 나타낸 것이고, 식 (3)과 식 (4)는 BRDC에 SBAS 보정정보가 적용된 위성궤도(\vec{SO}) 및 시계오차(SC) 식을 나타낸 것이다. 위 식에서 \vec{APC} 는 안테나 위상중심 편이를 의미하며, Z축 성분의 편이를 IGS에서 제공한 위성위치와 사용자간의 LOS(Line of Sight) 단위벡터를 이용해 내적을 취한 후 적용하였다. $\vec{XYZ}_{BRDC.orbit}$ 와 $\Delta t_{BRDC.clock}$ 는 BRDC에서 제공한 위성궤도정보와 위성시계정보를 각각 의미하고, $\delta \vec{XYZ}_{SBAS.orbit}$ 와 $\delta \Delta t_{SBAS.clock}$ 는 SBAS 시스템에서 제공한 위성궤도 및 시계보정정보를 각각 의미한다.

식 (1) ~ (4)로부터 얻어진 위성궤도 및 위성시계 오차를 식 (5)와 식 (6)처럼 IGS 궤도의 위성궤도 및 시계 오차에 대한 차로 계산하게 되면, BRDC와 SBAS 보정 후 BRDC의 위성궤도 및 시계오차를 얻을 수 있다.

$$\vec{DR} = \vec{BO}(\text{or } \vec{SO}) - \vec{XYZ}_{IGS.orbit} \tag{5}$$

$$DT = BC(\text{or } SC) - \Delta t_{IGS.clock} \tag{6}$$

$$URE = \vec{DR} \cdot \left(\frac{\vec{LOS}}{|\vec{LOS}|} \right) + DT \tag{7}$$

또한 식 (5)와 식 (6)을 이용하여 얻어진 위성궤도

오차 DR와 위성시계오차 DT를 식 (7)과 같이 계산하면 두 오차 성분을 거리오차로 변환한 URE를 얻을 수 있는데, 이때 위성궤도오차는 위성과 사용자 간의 LOS 단위벡터를 이용하여 거리오차로 변환이 된다. 한편, 모든 위성의 URE를 계산해 보면 BRDC 위성시계정보로 인해 일정한 크기의 편이가 생기는 것을 볼 수 있는데, 이는 최소자승법을 이용한 위치해 계산 시 수신기 시계오차에 흡수되기 때문에 각 위성에 대한 최종적인 URE는 식 (8)과 같이 얻어진다.

$$URE = URE - mean(UREs) \quad (8)$$

여기서 mean(UREs)는 모든 위성의 URE 평균을 의미한다.

일반적으로 GPS 위성의 궤도를 추정할 때 위성궤도와 위성시계는 함께 추정되기 때문에 SBAS에서 제공하는 두 보정정보 간에는 서로 상관관계가 있을 것으로 추측된다. 따라서 이러한 상관관계를 분석하기 위해 URE가 이용된다.

III. 보정정보 정확도 분석결과

3-1 WAAS 위성궤도 및 시계보정정보의 정확도

2007년 10월 27일 미국의 중심부인 Colorado Boulder에 위치한 IGS 상시관측소인 NISU에서 수신된 GPS와 WAAS보정정보를 자체 개발한 SBAS 보정정보처리 프로그램인 GPP(GNSS Positioning Program)를 이용하여 데이터 처리한 후, IGS 궤도와 비교하여 WAAS에서 제공한 위성궤도 및 시계보정정보의 정확도에 대해 분석해 보았다.

그림1은 NISU에서 관측된 모든 GPS 위성들에 대해 BRDC로부터 얻어진 위성의 궤도 및 시계오차 정보를 IGS 궤도를 기준으로 그 오차를 각각 나타낸 것이다. 또한 위성궤도오차와 위성시계오차를 URE로 변환하여 나타내었는데, 이는 이들 오차 성분들이 실제 사용자 위치해 계산 시 위치해 오차에 미칠 영향 및 두 정보간의 상관관계 분석을 위해 나타내었다.

그림 1을 보면 BRDC에서 제공하는 위성궤도 오차

의 RMS는 0.877m 이고, 위성시계오차의 RMS는 1.560m로 나타났다. 그러나 이들 오차를 URE로 나타내면, RMS가 0.886m로 그 오차가 감소하는 것을 볼 수 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 위성궤도와 위성시계가 함께 추정이 되기 때문에 두 정보간의 상관관계(correlation)로 인해 URE로 나타낼 경우 서로 거리오차를 보정해주어 URE가 감소하는 것을 볼 수 있다.

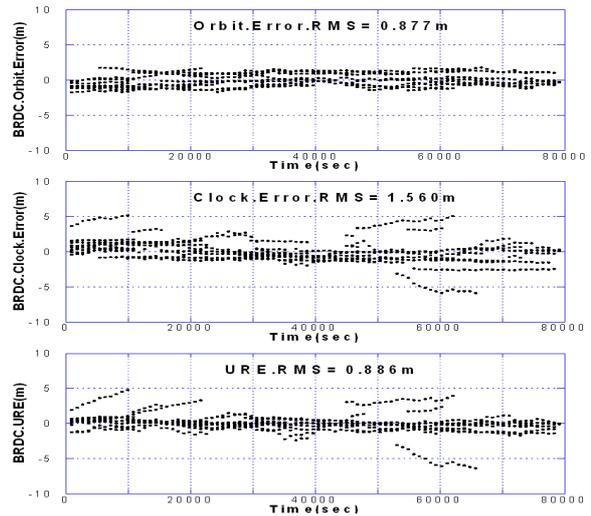


그림 1. BRDC 위성궤도 및 시계오차와 URE (NISU, 2007.10.27)

Fig. 1. BRDC orbit/clock errors and URE (NISU, 2007.10.27)

그림 2는 NISU에서 수신된 WAAS의 궤도 및 시계보정정보를 BRDC에 적용하였을 경우에, 위성궤도 및 시계오차와 URE 변화를 나타낸 것이다. 결과를 살펴보면 WAAS 보정정보를 적용할 경우 위성궤도오차의 RMS는 0.964m, 위성시계오차의 RMS는 1.402m로, 그림 1과 비교하여 위성궤도오차 RMS가 0.087m 증가하고, 위성시계오차 RMS가 0.158m 감소한 것을 볼 수 있다. 그러나 URE의 경우 RMS가 0.414m로 보정정보 적용 후 0.472m 감소하였다. 이러한 결과로부터 위성궤도와 시계오차 사이의 상관관계가 BRDC 뿐만 아니라 WAAS 보정정보에도 존재한다는 것을 확인할 수 있다. GPP를 이용한 실제 사용자 위치해 오차 결과에 있어서도 WAAS 궤도 및 시계오차 보정정보를 같이 적용할 경우 약 1~2m의 위치오차가 감소하는 결과를 얻을 수 있었지만, 각각 따로 적용할 경우 위치 오차가 오히려 증가하는 것을 볼 수 있었다. 한편 P1-C1 편이에 대한 보정의 중요성을 확인하기 위해 P1-C1 편이 적용 전후의

URE 변화를 분석해 보았는데, P1-C1 편이를 적용하지 않고 WAAS 보정정보만 적용했을 때, URE는 0.484m로 증가하였다.

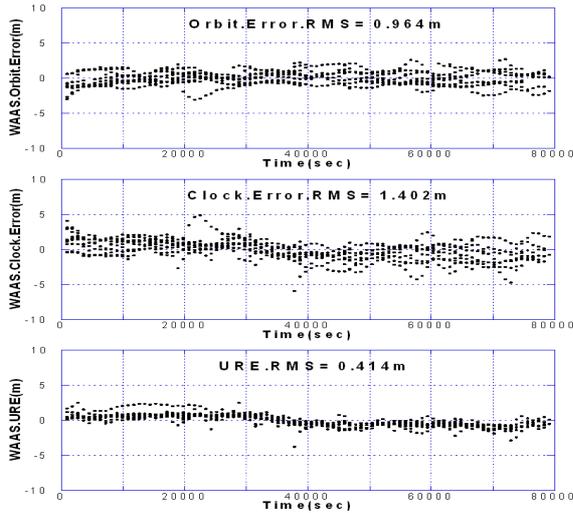


그림 2. WAAS 보정 후 위성궤도 및 시계오차와 URE(NISU, 2007.10.27)
 Fig. 2. WAAS-corrected orbit/clock errors and URE(NISU, 2007.10.27)

그림 3은 NISU에서 WAAS 보정정보 적용 후 PRN 13 위성의 궤도 및 시계오차와 URE 변화를 나타낸 것이다. 그림 3을 보면, 위성궤도오차와 시계오차는 값의 크기는 서로 비슷하지만 값의 부호가 반대로, 대칭된 변화 양상을 보인다. 이는 WAAS 보정정보를 적용한 대부분의 GPS 위성에서 나타난 결과로, 이러한 두 오차 성분의 역 상관관계로 인해 URE 계산 시 그림 2와 같이 URE가 감소하는 결과를 가져 온다.

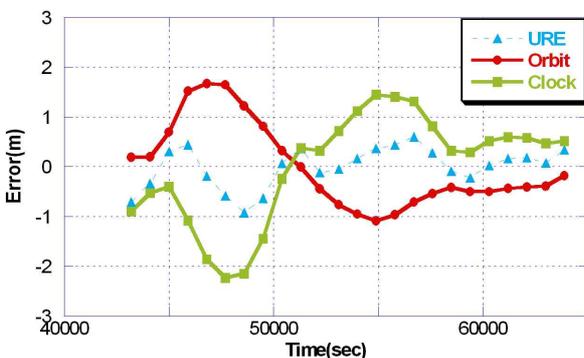


그림 3. WAAS 보정 후 위성궤도와 시계오차의 상관관계(PRN13, 2007.10.27)
 Fig. 3. Correlation of WAAS-corrected orbit and clock errors(PRN13, 2007.10.27)

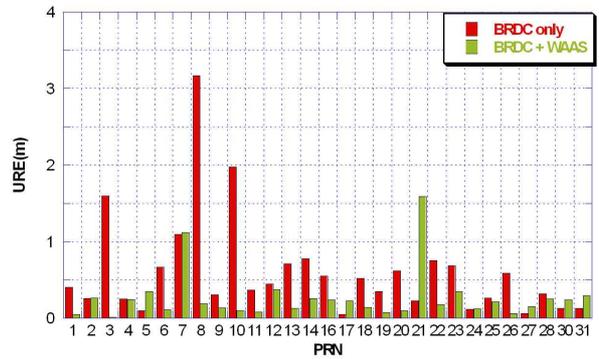


그림 4. WAAS 위성궤도 및 시계보정 전/후 URE 변화 (NISU, 2007.10.27)
 Fig. 4. URE variations of BRDC and WAAS -corrected(NISU, 2007.10.27)

그림 4는 NISU에서 수신된 각각의 GPS 위성 별로 WAAS 위성궤도 및 시계보정 정보의 적용 전/후 URE변화를 나타낸 것인데, 그림에서 보듯이 WAAS 보정정보 적용 후 20개의 위성에서 URE가 감소되는 것을 볼 수 있다.

그림 5는 2007년 10월 27일 NISU에서 관측된 GPS 위성들 중 URE가 감소된 몇몇 위성의 지상궤적을 나타낸 것으로, 동그라미로 표시된 부분은 UTC 0시를 기준으로 각 위성들의 관측시작 시점을 의미한다. 그림에서 보듯이 대부분의 GPS 위성들은 남서쪽에서 관측되기 시작하여 동쪽으로 이동하며 미국 상공을 통과하고 있다. 이러한 위성들의 경우 미국 상공을 포물선을 그리며 통과하기 때문에 미국 내에 위치한 대부분의 WAAS 지상기준국 (Reference Station)에서 관측이 가능하다. 이는 많은 WAAS 기준국에서 다양한 경사 고도각 및 방위각으로 관측이 가능함을 의미하고, 결과적으로 궤도 추정 정확도를 높일 수 있는 조건이 된다.

그림 6은 NISU에서 관측된 GPS 위성들 중 URE가 증가된 몇몇 위성의 지상궤적을 나타낸 것이다. 이러한 위성들의 경우 관측 초기 미국 서북 쪽에서 관측되어 적도 쪽으로 이동하거나, 미국 서쪽 끝에서 관측되어 미국 서부지역 일부 상공만을 통과한 후 사라지는 것을 볼 수 있다. 그리고 PRN 17과 PRN 31 위성은 NISU에서 관측초기 위성 경사각이 각각 6도와 9도로 다른 위성들에 비해 낮은 것으로 나타났다. 이들 위성은 미국에 위치한 일부 WAAS 기준국에서만 관측되거나, 또는 위성관측 초기 낮은 경사각으로 관

측이 되었다가 점점 사라지는 위성들로 수집된 GPS 데이터가 적거나, 데이터 품질이 좋지 않아 위성궤도를 추정하는 것이 쉽지 않다.

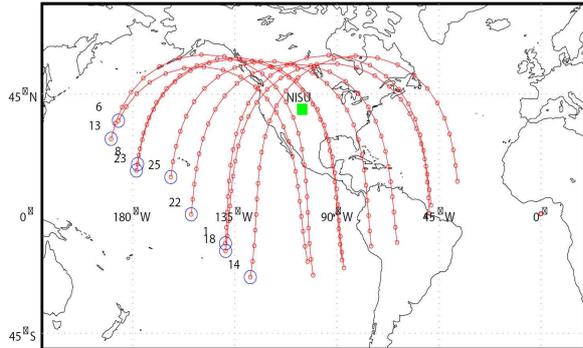


그림 5. URE가 감소된 GPS 위성의 지상궤적 (NISU, 2007.10.27)

Fig. 5. Ground track of GPS satellites with decreased URE(NISU, 2007.10.27)

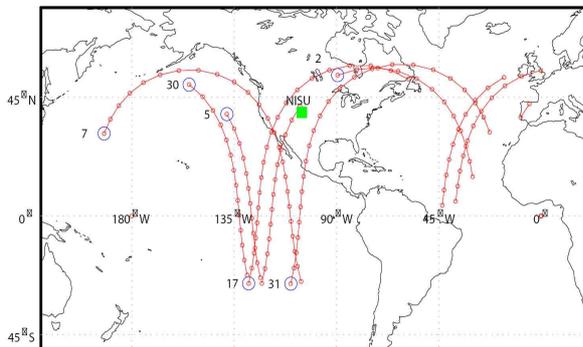


그림 6. URE가 증가된 GPS 위성의 지상궤적 (NISU, 2007.10.27)

Fig. 6. Ground track of GPS satellites with increased URE(NISU, 2007.10.27)

한편, WAAS 보정정보의 보정효과는 그림 7의 GPS 의사거리 관측값의 잔차 변화에서도 확인 할 수 있다. 의사거리 잔차는 추정된 위성과 사용자 간의 거리에 대해 실제 측정된 의사거리 관측값의 차를 의미하며, 이 값이 클수록 위치해 오차는 증가하게 된다. URE의 경우 위성궤도 및 시계오차를 거리오차로 환산하여 나타낸 것인데 반면에, 의사거리 잔차는 위성궤도 및 시계오차와 함께 다른 오차 성분들도 함께 나타낸 것이다.

그림 7은 2007년 10월 27일 NISU에서 수신된 GPS 신호에 WAAS 위성궤도 및 시계오차 보정정보 적용 전/후의 C1 의사거리 관측값의 잔차 변화를 비교하

여 나타낸 것이다. WAAS 보정정보 적용 후 모든 위성에 대해 의사거리 잔차가 감소하였으며, 잔차 감소의 평균이 약 0.498m, 표준편차가 약 0.281m 이다. URE의 경우 보정정보 적용 후 약 20여개의 위성에서 정확도가 향상되었으나, 의사거리 잔차의 경우 전체 위성에서 잔차가 감소하는 것을 볼 수 있다.

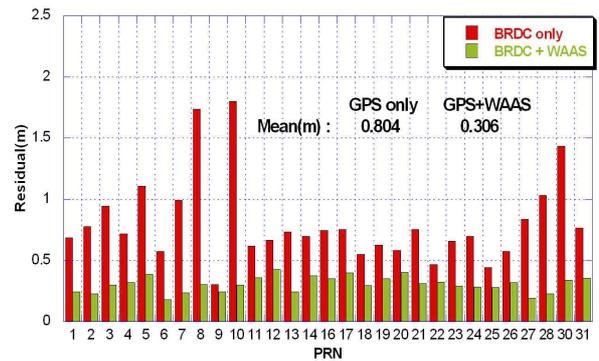


그림 7. WAAS 위성궤도 및 시계보정 전/후 의사거리 잔차 변화(NISU, 2007.10.27)

Fig. 7. BRDC and WAAS-corrected range residuals (NISU, 2007.10.27)

3-2 MSAS 위성궤도 및 시계보정정보의 정확도

MSAS 위성궤도 및 시계보정정보의 정확도에 대한 분석을 위하여 일본의 중심부인 Usuda에 위치한 IGS 상시관측소인 USUD에서 수신된 GPS와 MSAS 보정정보를 사용해 보았다.

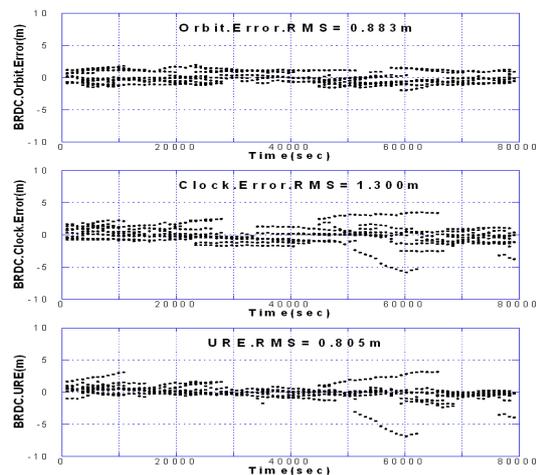


그림 8. BRDC 위성궤도 및 시계오차와 URE (USUD, 2007.10.27)

Fig. 8. BRDC orbit/clock errors and URE (USUD, 2007.10.27)

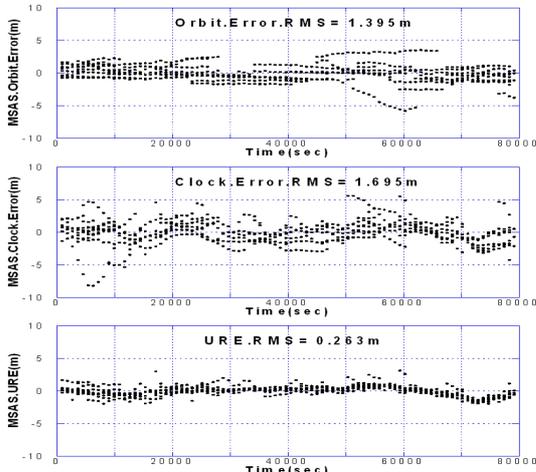


그림 9. MSAS 보정 후 위성궤도 및 시계오차와 URE (USUD, 2007.10.27)

Fig. 9. MSAS-corrected orbit/clock errors and URE (USUD, 2007.10.27)

그림 8은 그림 1과 마찬가지로, USUD에서 관측된 모든 GPS 위성들의 BRDC 위성궤도 및 시계오차와 URE 변화를 각각 나타낸 것이다. BRDC의 위성궤도 및 시계오차의 RMS는 각각 0.883m와 1.300m, URE RMS는 0.805m로 나타났다.

그림 9는 MSAS 보정정보를 BRDC에 적용하였을 경우에 위성의 궤도 및 시계오차 변화와 URE를 나타낸 것인데, 위성궤도오차의 RMS는 그림 8에 나타난 보정 전 보다 0.512m 증가하고, 위성시계오차의 RMS는 0.395m 증가하였다. 그러나 URE를 살펴보면 RMS가 0.542m 감소한 것을 볼 수 있는데, 이는 앞의 WAAS 결과와 마찬가지로 MSAS도 위성궤도 및 시계보정정보를 함께 사용할 경우에만 거리오차에 대한 보정효과를 제공됨을 의미한다.

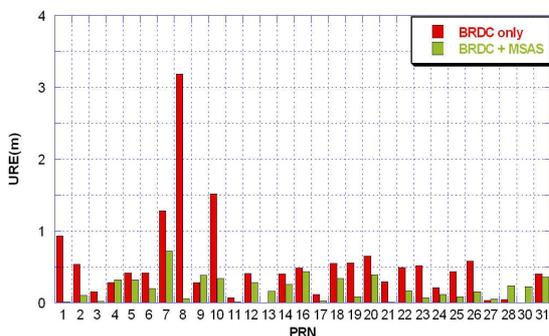


그림 10. MSAS 위성궤도 및 시계보정 전/후 URE 변화 (USUD, 2007.10.27)

Fig. 10. URE variations of BRDC and USUD-corrected (USUD, 2007.10.27)

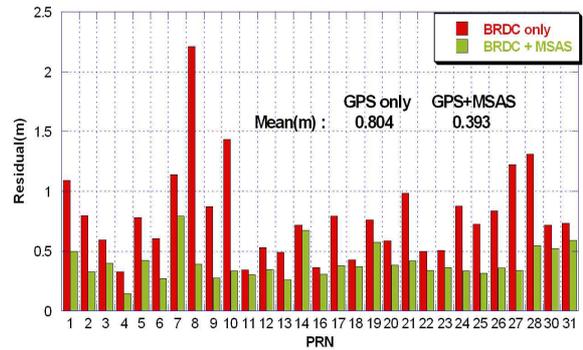


그림 11. MSAS 위성궤도 및 시계보정 전/후 의사거리 잔차 변화(USUD, 2007.10.27)

Fig. 11. BRDC and MSAS-corrected range residuals (USUD, 2007.10.27)

그림 10과 같이 MSAS의 위성궤도 및 시계보정정보 적용 후 22개의 위성에서 URE가 향상되는 효과를 보였고, C1 의사거리 관측값의 잔차는 그림 11에 나타난 것처럼 모든 위성에서 그 값이 감소하였다. 앞에서 보정정보 적용 후 위성궤도 및 시계 오차의 RMS 증가가 WAAS 보다 MSAS 보정정보에서 더 크게 나타나는 것으로부터 MSAS의 위성궤도 및 시계보정정보의 정확도가 WAAS 보다 낮은 것으로 분석할 수 있다.

그림 9의 URE 변화 경향을 살펴보면, MSAS 보정정보를 적용한 URE에서 약간의 주기적 성질을 갖고 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 주기적 성질은 WAAS URE에서도 나타나는데, MSAS에 비해 그 변화 폭이 상대적으로 작은 편이다. URE 변화 주기는 GPS 위성의 궤도주기와 비슷한 12시간을 갖는데, 이러한 URE의 주기적 성질은 위성궤도 및 시계오차를 추정하는 과정에서 이용되는 전리층과 대류층 지연오차, 수신기 및 위성 시계오차 등 여러 GPS 오차 요인들의 주기성이 추정된 궤도 및 시계보정정보에 반영이 되었기 때문이다[4].

3-3 WAAS와 MSAS 정확도 비교

앞에서 분석한 WAAS와 MSAS 위성궤도 및 시계보정정보의 정확도에 대한 통계적 분석 및 비교를 위해 2007년부터 2009년 초까지 특정일에 대해 미국의 NISU와 일본의 USUD에서 관측된 GPS 위성에 대해 WAAS와 MSAS 위성궤도 및 시계보정정보 적용

전/후 위성궤도 및 시계오차의 1일 평균과 1일 URE 평균을 각각 구하고, 이를 표 1과 표 2에 나타내었다.

표 1. 1일 평균 궤도/시계오차와 URE- WAAS (단위 m)
Table 1. Mean of orbit/clock errors and URE- WAAS (unit m)

	BRDC			WAAS-corrected		
	orbit	clock	URE	orbit	clock	URE
07/05/31	0.835	1.307	0.649	1.037	1.246	0.175
07/07/20	0.877	1.275	0.465	1.032	1.283	0.197
08/03/10	0.820	1.218	0.550	1.091	1.532	0.449
08/09/08	0.879	1.486	0.697	1.090	1.350	0.149
09/02/10	0.836	1.216	0.503	1.006	1.348	0.150
평균	0.849	1.300	0.573	1.051	1.352	0.224

표 2. 1일 평균 궤도/시계오차와 URE- MSAS (단위 m)
Table 1. Mean of orbit/clock errors and URE- MSAS (unit m)

	BRDC			MSAS-corrected		
	orbit	clock	URE	orbit	clock	URE
07/05/31	0.827	1.257	0.552	2.314	3.108	0.458
07/07/20	0.848	1.251	0.415	1.348	1.721	0.404
08/03/10	0.859	1.300	0.635	1.813	2.358	0.445
08/09/08	0.867	1.185	0.613	2.040	2.543	0.413
09/02/10	0.854	1.343	0.622	2.323	2.819	0.512
평균	0.851	1.267	0.567	1.968	2.510	0.446

결과를 살펴보면, WAAS의 경우 보정정보 적용 전 5일 평균 궤도오차가 약 0.849m, 시계오차가 약 1.300m, URE가 약 0.573m로 나타났다. 그러나 WAAS 보정 후 궤도오차는 약 0.202m 증가하여 1.051m, 시계오차는 약 0.052m 증가하여 1.352m, URE는 0.349m 감소하여 약 0.224m의 값을 갖는 것을 볼 수 있다. 이는 3-1절에서 분석한 결과와 일치하는 결과로 WAAS 보정 후 위성궤도와 시계오차는 증가하지만, URE는 감소되는 것을 알 수 있다.

반면에 MSAS는 5일 평균 궤도오차가 약 1.117m, 시계오차가 약 1.243m 각각 증가하고, URE가 약 0.121m 감소하였다. WAAS에 비해 보정정보 적용 후 궤도 및 시계오차의 증가 폭이 크고, URE 감소량은 작은 것을 볼 수 있다. 이는 다시 말해 WAAS 보정정보의 정확도가 MSAS 보다 높다는 것을 의미한다.

이러한 결과는 앞의 그림 5와 6의 지상궤적에 대

한 분석으로부터 그 이유를 추측할 수 있다. MSAS의 경우 미국보다 좁은 일본 본토 내에 위치한 4개의 지상기준국을 통해 수집된 GPS 데이터를 이용해 보정정보를 생성한다. 그런데 4개의 지상기준국 분포 면적이 WAAS처럼 넓지 않기 때문에 동일 위성에 대해 비슷한 위성경사각 및 방위각으로 해당 위성을 관측하게 되고, 결국 비슷한 조건의 GPS 관측값을 이용하여 궤도를 추정하게 된다. 반면에 WAAS는 넓게 분포한 지상기준국에 의해 동일 위성에 대해 다양한 방위각과 경사각으로 다양한 조건의 GPS 데이터를 얻을 수 있기 때문에 위성궤도 추정이 유리하다.

또한 MSAS와 WAAS 정확도 차의 또 다른 원인은 위성관측 시간에서 찾을 수 있다. WAAS의 경우 MSAS에 비해 지상기준국의 분포 면적이 넓기 때문에 동일위성에 대한 관측시간이 MSAS와 비교하여 약 5~6시간 정도 더 길게 관측된다[3]. 필터를 이용한 위성궤도 추정 초기 궤도 오차가 크게 나타나고 시간이 지날수록 그 오차는 감소하게 되는데, MSAS의 경우 GPS 관측데이터의 양과 품질이 WAAS에 비해 낮기 때문에 초기 추정된 위성궤도의 오차가 크고, 오차의 수렴시간도 길게 된다. 결과적으로 MSAS의 경우 위성이 관측되는 전체 시간 중 궤도오차가 수렴되어 적용되는 시간이 WAAS에 비해 상대적으로 낮게 되어 전체적인 궤도보정 정확도가 떨어지게 된다.

V. 결 론

MSAS와 WAAS에서 제공하는 위성궤도 및 시계보정정보의 정확도를 IGS 정밀궤도력과의 비교를 통해 분석해 보았다. IGS와 직접적인 비교를 위해 방송궤도력(BRDC) 및 SBAS 보정정보에 안테나 위상중심 편차와 P1-C1 편이에 대한 보정을 수행하여, 정확한 비교가 이루어 질 수 있도록 하였다. 두 시스템의 보정정보 모두 위성궤도와 위성시계 보정정보를 각각 따로 적용할 시에는 위성궤도 및 시계오차가 증가하지만, 두 정보를 함께 적용할 시에는 두 보정정보 간의 상관관계로 인해 URE가 감소됨을 확인하였다. 이는 SBAS 보정정보가 BRDC 정보에 대한 보정값인데, BRDC의 위성궤도 및 시계보정정보가 높은 상관

관계를 갖기 때문에 보정정보 또한 상관관계를 갖는 것으로 생각된다.

위성궤도 및 시계보정정보의 정확도를 각각의 GPS 위성별로 확인해 보았으며, 보정정보의 정확도가 해당위성의 지상궤적과 기준국 수 및 분포면적에 영향을 받고 있음을 확인하였다. URE 분석 이외에 의사거리 관측값의 잔차 분석을 통해 SBAS 보정정보가 사용자 위치해 정확도에 미치는 영향을 확인하였다.

SBAS 위성궤도 및 시계보정정보를 적용함에 있어 항상 두 정보를 동시에 이용해야 보정효과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 또한 WAAS 시스템의 보정정보가 MSAS 시스템의 보정정보보다 좀 더 정확한 것을 확인하였으며, 이는 지상기준국의 수 및 분포면적과 연관이 있음을 확인하였다. 따라서 일본과 유사한 지리적 환경을 갖는 한국의 경우, SBAS 개발 시 국내 지리적 제한 조건을 고려한 GPS 위성 궤도 추정 알고리즘의 개발이 필요할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] H. Rho and R. B. Langley, "The Usefulness of WADGPS Satellite Orbit and Clock Corrections for Dual-Frequency Precise Point Positioning", *ION GNSS Meeting, Dallas, USA*, Sep. 2007. pp.939~949
- [2] Y. Zhang and C. Bartone, "A GPS Orbit and Clock Correction Analysis for Long Baseline High Performance DGPS", *ION 61st Annual Meeting, Cambridge, USA*, Jun. 2005, pp.1062~1072
- [3] 정명숙, "위성기반 위성항법 보강시스템 데이터의 처리 및 분석", *한국항공대학교 석사 학위 논문*, 2009
- [4] 김도윤, "GNSS 광역보정시스템의 보정 정보생성 알고리즘에 관한 연구", *서울대학교 박사 학위 논문*, 2007
- [5] International GNSS Service(IGS): <http://igs.csb.jpl.nasa.gov>. Accessed 10 March 2009.
- [6] J. Kouba, "A guide to using International GPS Service(IGS) products", *Geodetic Survey Division*,

Natural Resources, Canada, Feb. 2003.

- [7] R. Jim and K. Senior, "Geodetic Techniques for Time and Frequency Comparisons Using GPS Phase and Code Measurements", *Metrologia*, Vol. 42, pp.215~232
- [8] R. F. Leandro, R. B. Langley, and M. C. Santos, "Estimation of P2-C2 Biases by Means of Precise Point Positioning", *ION AM meeting, Cambridge, USA*, Apr. 2007
- [9] H. Rho and R. B. Langley, "Dual-frequency GPS Precise Point Positioning with WADGPS Corrections", *ION 18th Technical Meeting, Long Beach, USA*, Sep. 2005, pp. 1470~1482
- [10] H. Rho and R. B. Langley, "The Canada-Wide Differential GPS Service initial Performance", *ION 16th Technical Meeting, Portland, USA*, Sep. 2003, pp.425-436

정 명 숙 (鄭明淑)



2007년 2월 : 한국항공대학교 항공 우주공학과(공학사)
 2009년 2월 : 한국항공대학교 항공 우주 및 기계공학(공학석사)
 2009년 2월~현재 : 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학(공학박사)

김 정 래 (金廷來)



1991년 2월 : 서울대학교 항공우주 공학과(공학사)
 1993년 2월 : 서울대학교 항공우주 공학과(공학석사)
 2000년 : 미국 Univ. of Texas at Austin(공학박사)
 2000년~2002년 : 미국 Center for Space Research 연구원
 2002년~2004년 : 한국항공우주연구원 선임연구원
 2004년~현재 : 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 조교수