

WAAS-EGNOS 중첩 영역 내 위성기반 보강시스템 선택 기법 연구

Selection Methods of Multi-Constellation SBAS in WAAS-EGNOS Overlap Region

김민규·김정래*

한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

Mingyu Kim · Jeongrae Kim*

School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Gyeonggi-do 10540, Korea

[요 약]

SBAS는 실시간으로 사용자에게 GNSS 궤도 및 시계, 전리층 보정정보와 이에 대한 무결성정보를 제공하여 SBAS 사용 시 정밀한 위치추정이 가능하다. 각국의 SBAS 개발 및 추가 지상관측소 설치로 SBAS 서비스 영역이 확대됨에 따라 2개의 SBAS 서비스 영역이 겹쳐 다중 SBAS 신호가 수신되는 영역이 존재하는데, 이에 대한 신호 선택 방법에 관한 연구는 진행되지 않았다. 이에 본 연구에서는 WAAS와 EGNOS 정보가 동시에 전송되는 영역에서 WAAS 정보 우선 사용 방법, EGNOS 정보 우선 사용 방법, 그리고 보정정보 오차 공분산 비교 선택 방법을 사용하여 저궤도위성에 SBAS 정보를 적용한 후 위치추정 결과를 비교하였다. WAAS 정보를 우선으로 사용할 때 3D 위치오차는 2.57 m로 가장 작았으며, 오차 공분산 비교 방법을 사용했을 경우에는 WAAS와 EGNOS의 관측소와 가장 먼 중첩 영역 중심에서 위치추정 정확도가 가장 높았다. EGNOS 정보를 우선 사용 시 중첩 영역의 EGNOS와 가까운 동쪽 지역에서 WAAS 우선 사용 방법보다 위치오차가 8% 더 작았다.

[Abstract]

Since SBAS provides users with GNSS orbit, clock, and ionospheric corrections and integrity, the more precise positioning is possible. As the SBAS service area is expanded due to the development of the SBAS and the installation of the additional ground stations, there is a region where two or more SBAS messages can be received. However, the research on multi-constellation SBAS selection method has not carried out. In this study, we compared the result of positioning accuracy after applying the SBAS correction selected by using WAAS priority, EGNOS priority, or error covariance comparison method to LEO satellites in the regions where WAAS and EGNOS signals are transmitted simultaneously. When using WAAS priority method, 3D orbit error is smallest at 2.57 m. The covariance comparison method is outperform at the center of the overlap region far from each WAAS and EGNOS stations. In the eastern region near the EGNOS stations, the 3D orbit errors using EGNOS priority method is 8% smaller than the errors using the WAAS priority method.

Key word : Low earth orbit satellites, Satellite-based augmentation system, SBAS correction, SBAS selection.

<https://doi.org/10.12673/jant.2019.23.3.237>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 27 May 2019; Revised 29 May 2019

Accepted (Publication) 15 June 2019 (30 June 2019)

*Corresponding Author; Jeongrae Kim

Tel: +82-2-300-0110

E-mail: jrkim@kau.ac.kr

I. 서론

최근 사용자 위치추정 방법으로 GNSS (global navigation satellite system)를 이용하는 방법이 많이 사용된다. 단일 주파수 수신기를 사용하는 경우 전리층에 대한 보정이 필요한데, 보정 모델로 GPS (global positioning system) Klobuchar 모델, SBAS (satellite-based augmentation system) 전리층 보정정보 및 IGS (international GNSS service) 전 세계 전리층 지도 등을 사용할 수 있다. GPS 궤도 및 시계 보정도 필요한데, 이는 IGS에서 제공하는 정밀궤도력이나 IGS RTS (real-time service), 또는 이들 보정정보를 모두 제공하는 SBAS를 사용할 수 있다.

SBAS는 사용자에게 GNSS에 관한 각종 보정정보와 함께 무결성정보를 제공하는 시스템이다. 현재 개발된 SBAS로 미국의 WAAS (wide-area augmentation system), 유럽의 EGNOS (European geostationary navigation overlay service), 일본의 MSAS (multi-functional satellite augmentation system), 인도의 GAGAN (GPS-aided GEO augmented navigation), 러시아의 SDCM (system for differential corrections and monitoring)이 있다[1]. GAGAN과 SDCM은 비교적 최근에 개발되어 서비스를 시작하고 있는데, SDCM은 GPS에 관한 정보뿐만 아니라 GLONASS에 관한 보강정보도 추가로 제공하는 것이 특징이다. 추가로 개발되고 있는 SBAS로는 한국의 KASS (Korea augmentation satellite system), 중국의 SNAS (satellite navigation augmentation system) 등이 있다. KASS는 2022년에 정식 서비스를 실시할 계획으로, 단계적으로 APV-I 급부터 시작하여 최종적으로 CAT-I 급 성능을 가진 시스템을 개발할 예정이다[2].

각 국에서 SBAS가 개발됨에 따라 전 세계적으로 SBAS 가용 영역이 증가하고 있으며 2개 이상의 SBAS 정보가 동시에 수신되는 영역이 존재할 수 있다. 다중 SBAS 정보가 수신되는 지점에서 SBAS를 선택하는 방법은 최근에 연구되고 있다. 먼저, 개발된 SBAS의 전체 서비스 영역에서 4가지 SBAS 선택 방법에 따른 전 세계 SBAS 가용성을 비교한 연구가 있다[3, 4]. 연구에서 제시된 SBAS 선택 방법으로는 각 SBAS별로 HPL (horizontal protection level) 또는 VPL (vertical protection level)을 계산하여 값이 작은 시스템을 선택하는 방법, SBAS 정보가 전송되는 위성 개수가 가장 많은 시스템을 선택하는 방법, 그리고 DFRE (dual frequency range error)의 오차 공분산이 가장 작은 시스템을 선택하는 방법이 있었다. Sakai는 GAGAN과 MSAS의 서비스 영역이 중첩되는 영역에서 SBAS 선택 방법에 따른 가용성을 분석하였다[5]. 분석에 사용된 SBAS 선택 방법은 [3]에서 제시된 방법과 더불어 고도각이 더 높은 시스템 신호를 선택하는 방법도 제시되었다.

연구된 내용들은 SBAS 신호도달 영역에서 각 SBAS 선택 방법에 따른 가용성 분석에 중점을 두고 있으며, 선택된 SBAS 신호 사용 시 사용자 위치오차의 변화에 관한 내용은 존재하지 않았다. 또한 동시에 수신되는 SBAS 신호를 융합하는 것이

아니라 제시된 기준에 따라 시스템을 선택하는 알고리즘을 제안한 것이다. 본 연구는 SBAS 보강정보 선택 기법으로 WAAS 정보 우선 사용 방법, EGNOS 정보 우선 사용 방법, 그리고 두 개 시스템의 오차 공분산을 비교하는 방법을 고안하여 테스트 하였다. WAAS 및 EGNOS 정보 우선 사용 방법은 1개의 SBAS를 선택하는 기존 알고리즘과 유사하지만, 공분산 비교 방법은 동시에 전송된 WAAS와 EGNOS 정보를 융합하는 방법으로 기준에 제시된 SBAS 선택 방법과 차이가 있다. WAAS와 EGNOS의 중첩영역 전체에 대하여 오차의 분포를 확인하기 위해 저궤도위성 데이터를 사용하였으며, 각 SBAS 선택 기법으로 획득한 SBAS 정보를 저궤도위성용 보강정보로 변환한 후 저궤도위성의 위치추정 오차를 비교하였다. WAAS와 EGNOS의 중첩 영역에서 WAAS와 EGNOS 정보 가용성도 분석하였다.

II. SBAS 보정정보 및 다중 SBAS 선택기법

2-1 SBAS 보정정보

SBAS는 GPS 궤도 및 시계, 거리, 그리고 전리층 보정정보 및 무결성정보를 제공한다. 이들 정보는 각각 MT (message type) 2~5, 25, 26에 포함되어 있으며, GPS 방송궤도력과 관측값에 적용할 수 있다. 전리층 정보는 전리층 지도 형태로 정보가 제공되며, 사용자 위치 주변의 전리층 격자점의 가중합으로 계산한다. 무결성정보는 사용자 위치 추정오차를 의미하며 SBAS에서 제공되는 각 보정정보의 오차 공분산을 조합하여 계산할 수 있다. 자세한 알고리즘은 [6]에 명시되어 있다.

2-2 저궤도위성용 SBAS 보정정보

SBAS 정보는 지상 및 항공기용으로 개발되어 저궤도위성은 정보의 수정 없이 SBAS를 사용할 수 없다. 특히 전리층 정보는 신호 수신 고도가 다르기 때문에 이에 대한 보정이 필요하다. 지상 환경과 저궤도위성 환경의 차이를 나타내는 척도 인자를 사용하면 지상에서 수신된 SBAS 전리층 정보를 저궤도위성에서도 사용할 수 있는데, 이 때 척도 인자는 3차원 전리층 분포를 제공하는 모델인 NeQuick 모델을 사용하여 저궤도위성 지상에서의 전리층 지연값 비율을 통해 계산할 수 있다. GPS 위성의 궤도와 시계, 거리 보정정보는 저궤도위성 환경과 지상 환경의 차이가 없기 때문에 지상에서 수신된 값을 그대로 사용할 수 있으며, 대류층 보정값은 GPS 신호가 대류층을 통과하지 않기 때문에 0으로 사용한다.

SBAS에서 적용되는 보정정보에 대한 공분산도 저궤도위성용으로 변환이 필요하다. 보정정보와 마찬가지로 궤도와 시계, 거리 정보에 대한 공분산은 지상에서 수신된 값과 동일한 값을 사용하며 대류층은 0으로 사용한다. 전리층 보정정보에 대한 공분산 값은 지상에서 추정된 오차에 대한 공분산을 나

타내기 때문에, 지상에서 수신된 전리층 오차 공분산 값에 대해 척도 인자(α)의 제곱을 적용하여 사용할 수 있다. 저궤도위성용 SBAS 보강정보 변환에 관한 자세한 식은 [7]에 명시되어 있다.

2-3 다중 SBAS 선택 기법

SBAS 정보 제공 범위는 각 국가의 SBAS 개발 및 추가 지상관측소 설치를 통해 확장될 수 있다. EGNOS의 경우는 아프리카 북부 지역에 추가로 관측소를 설치하고 있으며, 이에 따라 EGNOS 서비스 가용 면적이 증가하고 있다. WAAS와 EGNOS 정보는 동시에 제공되는 지역이 존재하는데, 해당 영역에서는 수신된 메시지 중 한 개를 선택하여 사용해야 한다. 이 때 WAAS 또는 EGNOS 정보를 우선적으로 선택하여 사용할 수 있다. WAAS 정보를 우선적으로 사용하는 경우는 EGNOS 정보가 동시에 수신될 때 WAAS의 궤도 및 시계, 거리, 그리고 전리층 정보를 사용하며, WAAS 정보가 수신되지 않으면 EGNOS 정보를 사용하는 방법이다. EGNOS 우선 사용 방법은 WAAS 우선 사용 방법과 반대로 동시에 수신된 경우 EGNOS 정보를 사용하는 방법이다. 전송된 보정정보에 대한 오차 공

분산 정보를 비교하여 해당 값이 더 작은 정보를 선택하여 사용하는 방법도 사용할 수 있다.

각 보정정보의 오차 공분산 비교 방법은 각 보정정보의 오차 공분산을 서로 비교하여 값이 작은 시스템의 정보를 사용하는 방법이다. 먼저 SBAS 궤도 및 시계, 거리 보정정보의 선택 알고리즘은 표 1과 같다. 1개의 GPS 위성에 대해 WAAS와 EGNOS에서 수신된 보정정보의 오차 공분산을 비교하여 더 작은 공분산을 가진 보정정보를 선택하여 해당 GPS 위성에 적용한다. 나머지 GPS 위성에 대해서도 오차 공분산을 비교한 결과를 따라 보정정보를 선택하므로 1개 시점의 전체 GPS 가시위성에 단일 시스템 보정정보만 적용되는 경우가 거의 없다. 전리층 보정정보에 대한 공분산 비교 방법의 선택 알고리즘은 표 2와 같다. 전리층 보정정보는 격자점 형태의 전리층 지도로 보정정보가 제공되며, 사용자는 자신의 IPP 주변 격자점의 전리층 보정정보의 가중합으로 보정값을 계산한다. 따라서 1개의 GPS 위성 관측치에 적용된 전리층 보정값은 2개 시스템으로부터 전송된 정보가 융합된 형태가 될 수 있다.

III. 데이터처리

저궤도위성의 실제 궤도와 관측값은 미국 NASA 및 독일 DLR에서 개발된 GRACE 위성을 사용하였다. GRACE 위성은 2002년 3월에 동일한 위성 2대가 발사되었으며, 지구 중력장을 측정하는 임무를 수행하였다. GRACE 위성의 공전 주기는 약 90분, 초기 고도는 480 km이며, 고도 변화는 350~500 km 사이에서 변화하였다. 본 연구에서 사용된 GRACE 위성은 GRACE B로, 분석 기간에 대해 GRACE A 위성보다 이상 데이터가 더 적기 때문이다[8]. GRACE B 위성의 실제 궤도데이터는 JPL의 PO.DAAC (physical oceanography distributed active archive center)에서 제공하는 Level-1B (L1B) 데이터를 사용하였다[9]. L1B 궤도 데이터에는 5초 간격으로 GRACE 위성의 ECEF 위치 및 속도와 이들에 대한 추정오차가 포함되어 있다. 궤도는 JPL의 GIPSY-OASIS 프로그램에서 반송파를 사용해 생성된 것으로 궤도정확도는 2 cm 이하로 알려져 있다[10].

SBAS는 미국의 WAAS와 유럽의 EGNOS를 사용하였다. 이는 그림 1과 같이 현재 서비스되고 있는 SBAS 중에서 두 개 시스템 영역이 중첩되는 지역이 존재하기 때문이다. 중첩 영역은 WAAS 영역에서 북동쪽, EGNOS 영역에서 북서쪽에 해당하는 영역으로, WAAS 전체 영역 대비 약 16%, EGNOS 전체 영역 대비 약 18%를 차지한다. WAAS는 미국, 캐나다, 멕시코 지역 등 넓은 영역에 대해 매우 높은 가용성을 보장하며, 전리층 보정정보의 정확도도 높다고 알려져 있다. EGNOS는 유럽 및 아프리카 북부 지역에 대해 가용성 높지만, 이를 벗어난 지점에 대해서는 외곽 영역으로 갈수록 가용성이 급격히 감소한다. EGNOS 영역의 남부 지역은 저지각위도 지역에 포함되어 있기 때문에 보정정보에 대한 정확도도 급격히 감소한다.

표 1. SBAS 궤도 및 시계, 거리 보정정보 선택 알고리즘 (공분산 비교 방법)

Table 1. The selection algorithm of SBAS fast and long-term correction (covariance comparison method).

Step	Algorithm
1	Calculate GPS satellite orbit/clock/range correction error covariance received from WAAS and EGNOS
2	Compare error covariances and select SBAS correction with smaller covariance
3	Apply selected correction to related GPS satellite ephemeris and observation
4	Repeat step 1 for the remaining GPS visible satellites

표 2. SBAS 전리층 보정정보 선택 알고리즘 (공분산 비교 방법)

Table 2. The selection algorithm of SBAS ionospheric correction (covariance comparison method).

Step	Algorithm
1	Calculate IPP using GPS satellite orbit and user position
2	Search the ionospheric grid point around the IPP
3	Calculate ionospheric error covariances of WAAS and EGNOS for one ionospheric grid point
4	Compare error covariances and select SBAS correction with smaller covariance
5	Repeat step 3 for the remaining ionospheric grid points
6	Calculate the weighted sum of the ionospheric correction in each grid point and apply it to the GPS observations.
7	Repeat step 1 for the remaining GPS visible satellites

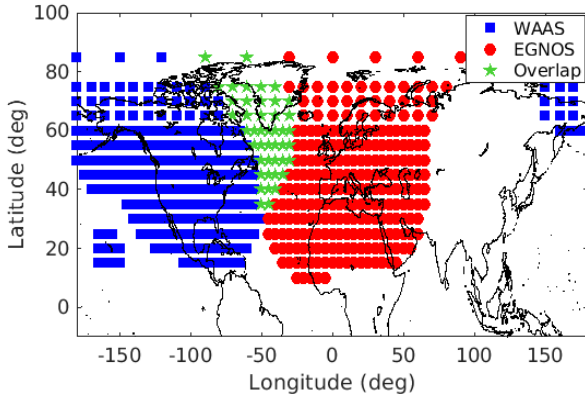


그림 1. WAAS 및 EGNOS 전리층 정보 제공 영역과 해당 SBAS의 중첩 영역
Fig. 1. Ionospheric grid points of WAAS and EGNOS, and its overlap region.

데이터 처리 기간은 2015년 9월 22일부터 28일까지로 설정하였다. 이는 2015년 한 해 GRACE 위성의 지상 궤적을 분석하였을 때 경도 편차가 가장 작아 중첩 영역에서 위치추정 결과를 분석하기 용이하기 때문이다. 또한 2016년에는 GRACE 위성의 임무가 종료된 기간으로 관측 데이터 품질이 떨어진다.

IV. 시스템별 정보 가용성 및 위치추정 결과

4-1 가용성 분석

2015년 9월 22일 하루에 대해 중첩 영역에서 WAAS와 EGNOS 정보의 가용성을 분석하였다. 궤도 및 시계 정보의 가용성은 비정밀접근 시 보강정보 시간 초과 기준인 360초 이내에 수신되었으며, 각 전리층 격자점을 사용자 위치로 가정하였을 때 GPS 가시위성에 대한 정보가 전송된 비율을 계산한 것이다. 거리 정보의 가용성은 사용자 위치에서 GPS 가시위성 대비 UDRE (user differential range error) index가 14 이하인 거리 정보가 전송된 비율로 계산하였다. 전리층 정보의 가용성은 각 전리층 격자점의 GIVE 지수가 14 이하로 전송된 비율을 계산한 것이다.

그림 2는 GRACE-B 위성의 일주일 간 지상궤적을 나타낸 것이다. 분석 기간동안 GRACE-B 위성이 WAAS-EGNOS 중첩지역을 하루에 3~4회 통과하며, 최대 28분, 최소 17분, 평균 23분간 비행한다. 중첩 영역을 통과하는 기간에서 SBAS에 따라 보정정보 및 위치추정 성능 차이가 크기 때문에 적절한 SBAS 선택 알고리즘이 필요하다.

먼저 궤도 및 시계 정보의 평균 가용성은 각각 94.8%, 94.0%이며, 최소 가용성은 각각 94.6%, 93.6%으로 큰 차이가 없었다. 거리 정보의 평균 가용성도 각각 94.0%, 96.7%로 차이가 크지 않았다. WAAS와 EGNOS 모두 가용성에 대한 편차는 1% 이내

로, 중첩 영역 내 어디에서든 가용성은 거의 동일하였다.

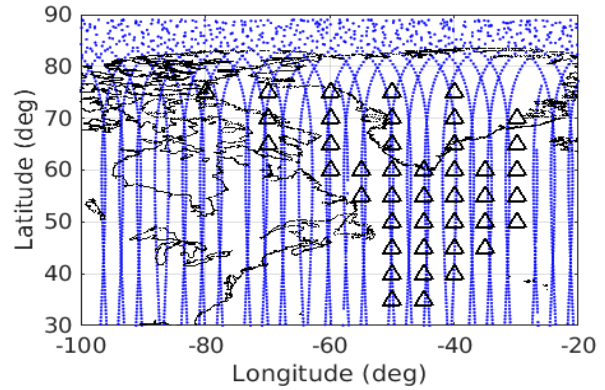


그림 2. GRACE-B 위성의 지상 궤적 (2015년 9월 22~28일)
Fig. 2. The ground-track of GRACE-B satellite (September 22~28, 2015).

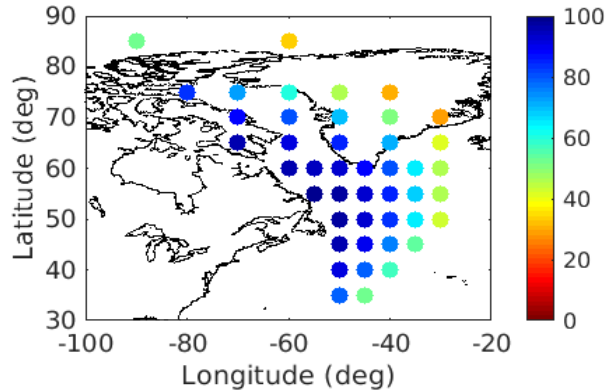


그림 3. 중첩 영역 내 WAAS 전리층 정보 가용성 (2015년 9월 22일, 단위: %)
Fig. 3. The availability of WAAS ionospheric information in overlap region (September 22, 2015, Unit: %).

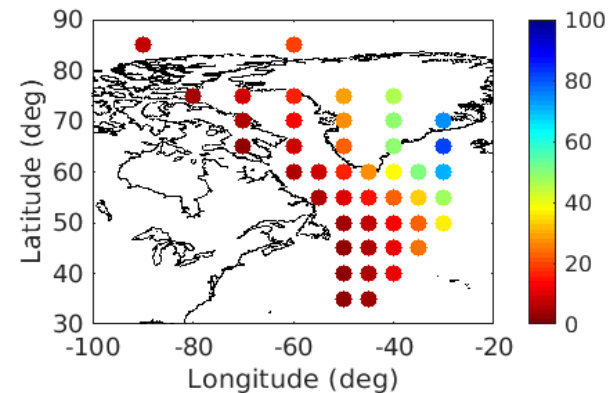


그림 4. 중첩 영역 내 EGNOS 전리층 정보 가용성 (2015년 9월 22일, 단위: %)
Fig. 4. The availability of EGNOS ionospheric information in overlap region (September 22, 2015, Unit: %).

WAAS와 EGNOS 정보를 모두 사용할 경우 거리 정보와 궤도 및 시계 정보의 평균 가용성은 99.7%로 나타났다.

그림 3과 4는 중첩 영역에서 각각 WAAS와 EGNOS의 전리층 정보 가용성을 나타내는 그림이다. 그림 3에서 평균 전리층 정보는 WAAS 전리층 제공 영역 외곽으로 갈수록 감소하였으며, 최소 가용성은 위도 70°, 경도 -35° 지역에서 27.9%로 나타났다. EGNOS의 전리층 정보는 최소 가용성이 0.8%, 최대 가용성이 81.8%으로 EGNOS 전리층 제공 영역 외곽에서 전리층 정보의 가용성이 상당히 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 WAAS-EGNOS 중첩 영역이 EGNOS 지상관측소와 더 멀리 떨어져 있기 때문이다. WAAS와 EGNOS 정보를 모두 사용하는 경우 최소 가용성은 51.7%, 평균 가용성은 86.9%이다.

4-2 위치추정 오차 분석

WAAS-EGNOS 중첩 영역에서 일주일 간 3가지 SBAS 선택 방법에 따른 저궤도위성의 위치 추정 결과를 비교하였다. 저궤도위성의 위치는 C/A 거리 관측치에 선택된 SBAS 정보를 적용한 후 kinematic 방법을 사용하여 추정하였다. 동일 기간 GPS 단독으로도 위치추정을 수행하여 결과를 비교하였다. GPS만 사용한 경우 전리층 보정은 Klobuchar 모델을 사용하였으며, 전리층 척도 인자는 SBAS에 적용한 척도 인자와 동일한 값을 사용하였다.

저궤도위성의 위치추정에 앞서 저궤도위성이 중첩영역을 비행할 때 각 SBAS별 궤도 및 시계, 거리 보정정보를 방송궤도력에 적용한 후 방송궤도력 오차를 비교하였다. SBAS는 궤도 및 시계, 거리 보정정보를 제공하므로 GPS 위성의 궤도와 시계 오차를 합한 개념인 URE (user range error) 값으로 비교를 수행하였다. URE는 GPS 위성 궤도를 사용자 시선벡터로 투영한 후 시계 오차를 더한 개념이다[11]. GPS 위성 궤도 오차 계산에 사용된 참값은 IGS에서 제공하는 정밀궤도력인 final 데이터를 사용하였다. IGS final 데이터의 위성 좌표는 위성의 질량중심에 대한 값으로, 방송궤도력과 오차를 비교하기 위해선 PCO (phase center offset) 보정도 필요하다[12]. 이는 위성별 APC (antenna phase center) 값이 포함되어 있는 IGS ANTEX 데이터로부터 획득하였다.

궤도 및 시계, 거리 보정정보의 추정오차 공분산과 WAAS, EGNOS의 URE의 상관관계를 분석한 결과 각각의 상관계수는 0.26, 0.24로 크지 않았다. 이는 공분산 값이 보정정보에 대한 추정오차뿐만 아니라 위치해 계산 시 GPS 위성의 가중치 역할을 하는 등 여러 요소가 결합된 복합적인 값이기 때문이다. 따라서 각 SBAS별 방송궤도력 오차를 직접적으로 비교하는 대신 중첩영역에서 위치추정을 수행하여 오차를 비교하였다.

그림 5는 2015년 9월 22일 저궤도위성이 중첩 영역을 지나 한 구간에 대해 저궤도위성용 SBAS 전리층 보정정보를 나타낸 것이다. 동일 위성의 전리층 보정값이라도 보정값의 차이는 2 m 이상이 나타날 수 있으며, 공분산 비교 방법을 사용했을 때의 전리층 보정값은 WAAS와 EGNOS의 전리층 정보값 사이

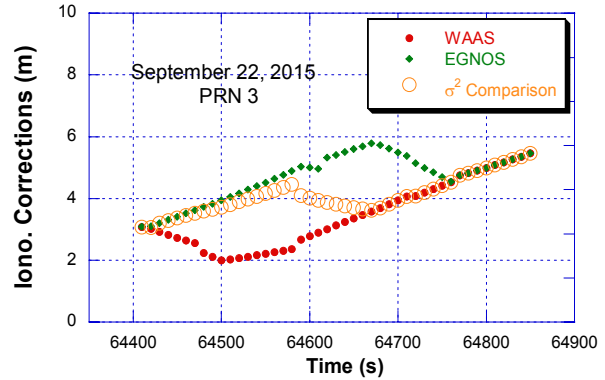


그림 5. 각 SBAS 선택 방법별 저궤도위성용 전리층 보정정보 (2015년 9월 22일)

Fig. 5. Ionospheric corrections of LEO satellites for each SBAS selection methods (September 22, 2015).

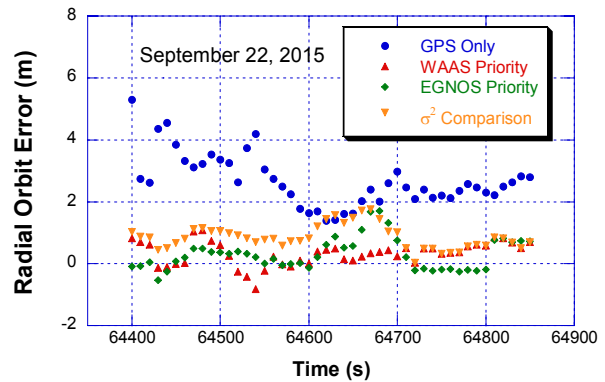


그림 6. 저궤도위성의 radial 방향 위치추정 오차 (2015년 9월 22일)

Fig. 6. Radial orbit errors of LEO satellite (September 22, 2015).

에 항상 분포하였다. 공분산 비교 방법은 WAAS와 EGNOS 값 중에서 작은 공분산 값을 선택하기 때문에 공분산 값이 모든 시점에서 가장 작았다. 64,750초 이후 EGNOS의 GIVE 값이 15로 전송되는 영역을 통과하면서 EGNOS 우선 및 공분산 비교 방법 모두 WAAS 전리층 보정값을 사용하였다.

그림 6은 2015년 9월 22일 하루에 대해 중첩 영역을 지날 때 각 경우에 대해 저궤도위성의 radial 방향 위치오차를 나타낸 결과이다. 공분산 비교 방법 사용 시 radial 방향 바이어스가 WAAS 정보 우선 사용 방법에 비해 0.231 m 증가하였는데, 이는 공분산 값이 더 작더라도 더 큰 위치오차를 유발할 수 있음을 의미한다. EGNOS 우선 방법은 그림 5에서 나타났듯이 64,750초 이후에는 WAAS에서 전송된 전리층 정보를 사용하였지만, 궤도 및 시계, 거리 정보는 EGNOS에서 전송된 정보를 사용하여 WAAS와 위치추정 결과가 다르게 나타났다.

그림 7~10은 GPS, WAAS 정보 우선, EGNOS 정보 우선, 그리고 공분산 비교 방법을 적용하였을 때 3D 위치추정 오차의

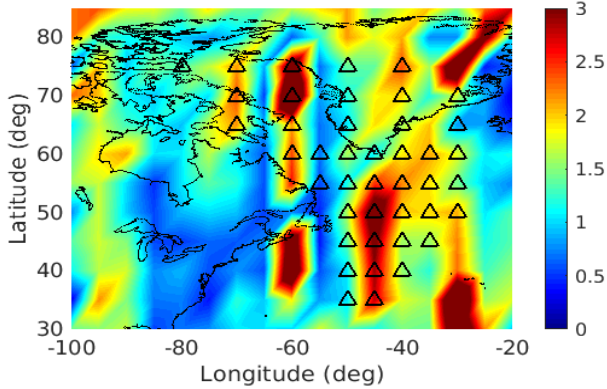


그림 7. 저궤도위성 3D 위치오차의 표준편차 분포 (2015년 9월 22~28일, GPS 단독, 단위: m)
Fig. 7. Standard deviation of LEO satellite 3D orbit error (September 22~28, 2015, GPS only, Unit: m).

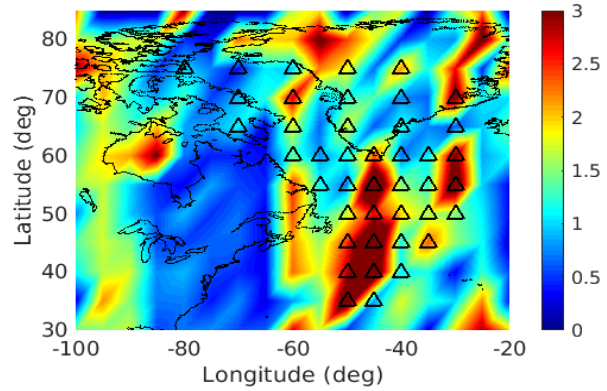


그림 9. 저궤도위성 3D 위치오차의 표준편차 분포 (2015년 9월 22~28일, EGNOS 우선 사용, 단위: m)
Fig. 9. Standard deviation of LEO satellite 3D orbit error (September 22~28, 2015, EGNOS Priority, Unit: m).

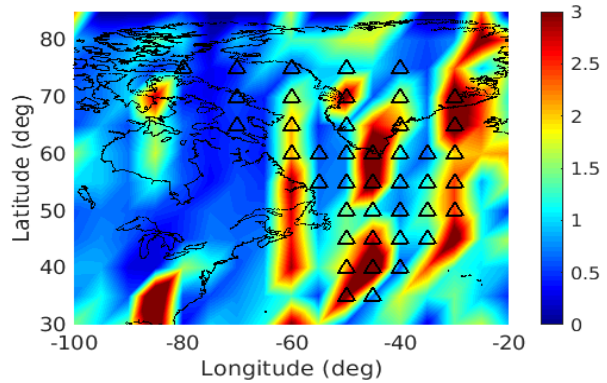


그림 8. 저궤도위성 3D 위치오차의 표준편차 분포 (2015년 9월 22~28일, WAAS 우선 사용, 단위: m)
Fig. 8. Standard deviation of LEO satellite 3D orbit error (September 22~28, 2015, WAAS Priority, Unit: m).

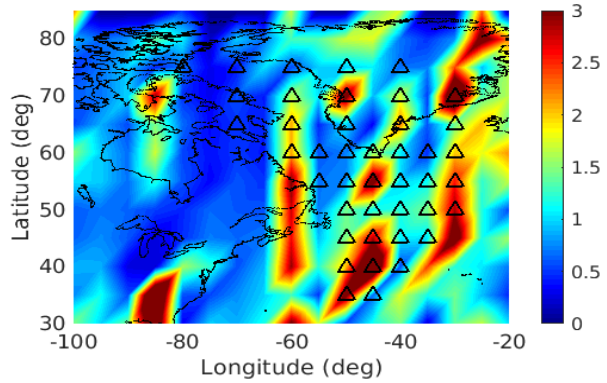


그림 10. 저궤도위성 3D 위치오차의 표준편차 분포 (2015년 9월 22~28일, 공분산 비교 방법, 단위: m)
Fig. 10. Standard deviation of LEO satellite 3D orbit error (September 22~28, 2015, Covariance comparison, Unit: m).

표준편차를 나타낸 결과이다. 그림을 작성할 때 4σ 이상의 데이터는 통계에서 제외하였다. 그림 8은 WAAS 우선 사용 방법을 적용한 결과로, 중첩 영역의 동쪽 지역에서는 오차가 소폭 증가하였으며, 나머지 지역에서는 GPS 단독에 비해 오차가 크게 감소하였다. 동쪽 지역은 전리층 가용성이 감소함에 따라 전리층 보정값의 정확도도 감소하여 위치 오차가 증가한 것으로 분석된다. WAAS 우선 적용 시 수평 오차는 GPS 단독과 큰 차이가 없었지만, 수직 성분인 radial 방향에서 오차가 63%가 감소함에 따라 3D 오차가 크게 감소하였다.

EGNOS를 우선적으로 적용한 결과는 그림 9와 같은데, WAAS 우선 결과에 비해 동쪽 지역의 위치오차는 감소하였지만, 북서쪽 지역과 남쪽 지역에서 오차가 증가하였다. 이는 그림 4의 EGNOS 전리층 정보 가용성 분포와 유사하며, EGNOS 남쪽 영역의 전리층 정보 오차가 큰 특징이 그림에서도 나타났다. 북서쪽 지역은 EGNOS 정보가 수신 비율이 30% 미만인 영역으로, WAAS 정보를 사용하면서 남쪽 지역에 비해 오차 증가

량이 크지 않았다. 경도 -45° 를 기준으로 동쪽 지역의 위치오차는 WAAS 우선 방법의 80% 수준으로 나타났다.

그림 10은 공분산 비교 방법을 적용한 결과이다. 경도 -45° 를 기준으로 서쪽 지역은 WAAS 우선 결과에 비해 오차가 12%, 동쪽 지역은 EGNOS 우선 결과에 비해 오차가 14% 증가하였다. 이는 오차 공분산 정보와 무관하게 각 SBAS 영역과 가까운 지역의 정보를 사용할 때 위치 추정오차가 가장 작게 나타나는 것을 의미한다. 중첩 영역 중 가운데 영역인 경도 -45° 지역에서 발생한 큰 위치오차는 공분산 값이 작은 WAAS와 EGNOS를 사용함에 따라 WAAS 우선 방법에 비해 radial 방향 오차가 15% 감소하였다.

중첩 영역에서 계산된 저궤도위성 위치오차의 통계를 계산하였으며, 이를 Table 3에 나타내었다. 궤도는 RTN (radial, transverse, normal) 및 3D 방향으로 구분하여 통계를 계산하였다. Radial 방향은 지구 중심에서 저궤도위성을 향하는 벡터로

표 3. 중첩 영역 내 저궤도위성 위치오차 통계 (2015년 9월 22~28일, 단위: m)

Table 3. LEO satellites positioning error statistics in overlap region (September 22~28, 2015, Unit: m).

	GPS Only	WAAS Priority	EGNOS Priority	Covariance Comparison
R Mean	1.782	0.320	0.654	0.306
T Mean	0.516	0.072	0.146	0.024
N Mean	-0.232	-0.827	-1.053	-0.901
R STD	2.030	0.745	1.001	0.729
T STD	0.859	0.694	0.787	0.718
N STD	0.834	1.428	1.605	1.441
3D rms	3.410	2.565	2.964	2.585

정의되며, normal은 궤도면과 수직인 벡터로 정의된다. Transverse는 radial과 normal 방향의 외적으로 정의되며, 위성 속도의 방향과 거의 동일하다. 공분산 비교 방법은 WAAS 정보 사용 비율이 약 92%로 나타났으며, EGNOS 정보가 전송되는 기간에 한해서도 WAAS 정보 사용 비율이 78%로 나타났다. Radial 방향 추정 정확도는 WAAS 우선 사용 방법보다 작았지만 수평 방향 정확도가 감소함에 따라 3D 오차는 0.02 m 더 컸다. EGNOS 우선 사용 방법은 MT 18에서 전송되는 전리층 격자점 정보에 비해 가용 비율이 작아서 WAAS 정보를 전체기간 중 약 65% 사용하였으며, 중첩 영역의 동쪽 지역에서 WAAS 우선 사용 방법에 비해 3D 오차가 8% 감소하였다.

V. 결 론

WAAS와 EGNOS 정보가 모두 수신되는 영역에서 SBAS 정보를 선택하는 기법으로 WAAS 정보 우선 사용 방법, EGNOS 정보 우선 사용 방법, 그리고 보정정보 오차 공분산 비교 방법을 제안하였으며, 각 선택 기법에 따른 위치 추정 정확도를 비교하였다.

WAAS와 EGNOS의 궤도 및 시계 정보는 중첩 영역에서 일정한 분포를 가지며, 평균적으로 93~96%의 가용성을 보였다. 전리층 정보는 각 지상관측소에서 멀어질수록 가용성이 감소하였는데, 이에 따라 WAAS 우선 방법과 EGNOS 우선 방법 사용 시 위치오차는 관측소에서 멀 경우 GPS 단독 위치추정 오차에 비해 더 컸다. WAAS 우선 사용 시 3D 위치오차는 2.57 m으로 정확도가 가장 높았다. 보정정보 오차 공분산 비교 방법은 각 영역의 관측소에서 가장 먼 지점인 중첩 영역 중심 지역에서 위치추정 정확도가 가장 높았다. EGNOS 우선 사용 방법은 EGNOS 관측소와 가까운 동쪽 지역에서 오차가 가장 작았는데, WAAS 우선 결과에 비해 radial 방향 오차는 80% 수준으로 나타났다. 이러한 결과를 통해 SBAS 중첩 영역에서는 지상관측소와 가장 가까운 SBAS 정보를 사용할 때 위치정확도가 높으며, 중첩 영역 중심에서는 오차 공분산이 가장 작은 보강정보를 사용할 때 위치추정 정확도가 가장 높은 것을 확인하였다.

Acknowledgments

본 연구는 과학기술정보통신부 우주핵심기술개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다 (NRF-2016M1A3A3A02016943).

References

- [1] C. S. Lim, H. J. Seok, H. Y. Hwang, and B. Park, "Prediction on the effect of multi-constellation SBAS by the application of SDCM in Korea and its performance evaluation," *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 20, No. 5, pp. 417-424, 2016.
- [2] Korea Navigation Institute, Report on establishment of the management and operation system of the GNSS augmentation system for the aviation, MOLIT, 2013
- [3] J. Dennis and M. Hemstad "Assessment of methods to trigger transition between multiple SBAS," in *Proceedings of the 2014 International Technical Meetings of the Institute of Navigation*, San Diego: SD, pp. 201-211, 2014.
- [4] J. Dennis and M. Hemstad, "Refinement of broadcast integrity methods for space based augmentation system selection," in *Proceedings of the 2015 International Technical Meeting of the Institute of Navigation*, Dana Point: DP, pp. 404-414, 2015.
- [5] T. Sakai, K. Hoshino, and K. Ito, "SBAS satellite selection and performance monitoring at the region where multiple SBAS are available," in *Proceedings of the 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, Tampa: TP, pp. 3331-3342, 2014.
- [6] Radio Technical Commission for Aeronautics, Minimum operational performance standards for global positioning system/wide area augmentation system airborne equipment, DO-229D. Radio Technical Commission for Aeronautics (RTCA), Washington: WA, 2001.
- [7] M. G. Kim, J. W. Myung, and J. R. Kim, "The real-time determination of ionospheric delay scale factor for low Earth orbiting satellites by using NeQuick G model," *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 22, No. 4, pp. 271-278, 2018.
- [8] J. R. Kim and M. G. Kim, "Orbit determination of low-Earth-orbiting satellites using space-based augmentation systems," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 55, No. 5, pp. 1298-1301, 2018.
- [9] W. Bertiger, Y. Bar-Sever, S. Desai, C. Dunn, B. Haines, G. Kruizinga, "GRACE: Millimeters and microns in orbit," in

Proceedings of the 15th International Technical Meetings of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Portland: OR, pp. 2022-2019, 2002.

[10] S. Bettadpur, GRACE product specification document, The University of Texas at Austin, GRACE 327-720, CSR-GR-03-02, 2012.

[11] M. S. Jeong, and J. R. Kim, "Accuracy analysis of SBAS

satellite orbit and clock corrections using IGS precise ephemeris," *Journal of Korea Navigation Institute*, Vol. 13, No. 2, pp. 178-186, 2009.

[12] M. G. Kim and J. R. Kim, "An analysis on the long-term variation of the GPS broadcast ephemeris errors," *Journal of Korea Navigation Institute*, Vol. 18, No. 5, pp. 421-428, 2014.



김민규 (Mingyu Kim)

2013년 2월 : 한국항공대학교 항공우주공학과 (공학사)

2013년 2월 ~ 현재 : 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 대학원 석박사과정

※ 관심분야 : 위성항법, 위성궤도



김정래 (Jeongrae Kim)

1991년 2월 : 서울대학교 항공우주공학과 (공학사)

1993년 2월 : 서울대학교 항공우주공학과 (공학석사)

2000년 : 미국 University of Texas at Austin (공학박사)

2000년 ~ 2002년 : 미국 Center for Space Research 연구원

2002년 ~ 2004년 : 한국항공우주원 선임연구원

2004년 ~ 현재 : 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 교수

※ 관심분야 : GNSS, 위성항법, 위성궤도