

한반도 지역 SBAS 대류층 지연 보정 모델의 정확도 검증

Accuracy Verification of the SBAS Tropospheric Delay Correction Model for the Korean Region

김동욱¹ · 한덕화¹ · 기창돈^{1*} · 이철수² · 이충희²

¹서울대학교 기계항공공학부, 정밀기계설계공동연구소

²LIG 넥스원

Dong-uk Kim¹ · Deok-hwa Han¹ · Chang-don Kee^{1*} · Chul-soo Lee² · Choong-hee Lee²

¹Department of Mechanical and Aerospace Engineering and SNU-IAMD, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

²LIG Nex1, Gyeonggi-do 13488, Korea

[요 약]

본 논문에서는 한반도 지역에서 SBAS (satellite based augmentation system) 대류층 지연 보정 모델의 정확도 성능을 검증하였다. 정확도 분석을 위한 대류층 지연량 참값으로 IGS (International GNSS Service)에서 제공하는 정밀 대류층 천정 지연량인 ZPD (zenith path delay) 데이터를 활용하였다. 그리고 대표적인 대류층 지연 모델인 Saastamoinen 모델 및 Hopfield 모델과 성능을 비교하였다. 그 결과 SBAS 대류층 지연 보정 모델의 잔여 오차는 약 50 mm 수준으로, Saastamoinen 모델 및 Hopfield 모델보다 성능이 떨어졌다. 이 대류층 지연 모델에 의한 잔여 오차는 SBAS 정확도 요구조건에는 문제가 없지만, 사용자 측위 성능에는 영향을 미칠 수 있다. 만약 한반도 기상 환경에 적합하도록 SBAS 대류층 보정 모델의 기상 파라미터를 수정한다면, 더 좋은 성능의 SBAS 서비스를 한반도에 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

[Abstract]

In this paper, we verified accuracy of the satellite based augmentation system (SBAS) tropospheric delay correction model for the Korean region. We employed the precise data of the tropospheric zenith path delay (ZPD) which is provided by the international GNSS service (IGS). In addition, we compared the verification results with that of the Saastamoinen model and the Hopfield model. Consequently, the bias residual error of the SBAS tropospheric delay correction model is about 50 mm, whereas the Saastamoinen model and the Hopfield model are more accurate. This residual error by the tropospheric delay model can affect the SBAS user position accuracy, but there is no problem in SBAS accuracy requirement. If we modified the meteorological parameters for SBAS tropospheric model to appropriate in Korean weather environment, we can provide better SBAS service to the Korean user.

Key words : Tropospheric delay error, SBAS tropospheric delay correction model, IGS ZPD tropospheric product.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2016.20.1.23>



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 10 December 2015; **Revised** 5 February 2016
Accepted (Publication) 11 February 2016 (28 February 2016)

***Corresponding Author; Chang-don Kee**

Tel: +82-2-880-1912

E-mail: kee@snu.ac.kr

I. 서 론

SBAS (satellite based augmentation system)는 GPS (global positioning system) 단독 측위 시 발생하는 다양한 오차요인들을 보정함으로써 사용자에게 더 높은 수준의 정확도와 신뢰도를 가지는 위치정보를 제공하는 위성기반 광역 보정 항법시스템이다. 현재 미국의 WAAS (wide area augmentation system), 유럽의 EGNOS (European geostationary navigation overlay service), 일본의 MSAS (MTSAT satellite based augmentation system)가 개발 및 구축되어 운용되고 있으며, 인도의 GAGAN (GPS aided GEO augmented navigation)도 개발을 완료하고 운용 시작 단계에 있다 [1]. 우리나라도 2014년부터 국토교통부 (MOLIT; Ministry of Land, Infrastructure and Transport) 주관으로 한국형 SBAS인 KASS (Korea augmentation satellite system) 개발 및 구축 사업을 시작하였으며, 2022년 APV-I (approach operation with vertical guidance-I) 급 SoL (safety of life) 서비스를 목표로 하고 있다 [2].

SBAS는 사용자가 정확하고 신뢰성 높은 위치 정보를 계산할 수 있도록, GPS 위성의 궤도 및 시계 오차 보정정보와 전리층 지연 오차 제거를 위한 격자 전리층 보정정보를 정지궤도 위성 (GEO; geostationary earth orbiting satellite)을 통해 제공한다. 하지만 대류층 지연 오차의 경우 보정정보를 따로 제공하지 않고, 보정 모델을 사용하여 사용자가 직접 대류층 지연량을 제거하게 된다.

대표적인 SBAS 대류층 지연 보정 모델로 1997년 Collins과 Langley가 처음 제안한 UNB3 모델이 있다. 이 모델은 별도의 기상정보 없이도 사용자 위도에 따른 기상 파라미터 보간을 통해 사용자의 대류층 지연 오차 제거가 가능하다는 장점이 있다. 모델의 대류층 천정 지연 (zenith delay) 추정 정확도는 북미 지역에서 평균 약 5 mm, 표준편차 약 50 mm 수준으로, 미국의 WAAS 사용자는 대부분의 대류층 지연 오차를 보정 모델로 제거하는 것이 가능하다 [3].

본격적으로 개발될 한국형 SBAS인 KASS도 대류층 지연 오차 제거를 위해 기상정보가 불필요한 전 지구적 모델인 UNB3 모델을 사용할 것으로 예상된다. 하지만 비슷한 위도임에도 북미와 한반도는 기후조건이 다른 만큼 한반도 지역에서 SBAS 대류층 지연 보정 모델에 대한 정확도 분석 및 검증에 대한 연구가 KASS 개발 과정에서 반드시 수행되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 한반도 지역에서 SBAS 대류층 지연 보정 모델의 정확도 검증을 통해 KASS 적용 가능성을 검토한다. Ahn(2011)은 기상 관측 장비의 예측 값 비교를 통해 한반도 지역에서 UNB3 모델의 적용 가능성에 대한 실험을 진행한 바 있다 [4]. 본 연구에서는 Ahn(2011)과 다르게 IGS (International GNSS Service)에서 제공하는 정밀 대류층 천정 지연 값인 ZPD (zenith path delay) 데이터를 사용하여 SBAS 대류층 지연 보정 모델의 정확도를 분석해 보았다. 그리고 대표적인 대류층 지연 모델인 Saastamoinen 및 Hopfield 모델과 성능을 비교하였다.

II. 대류층 지연 오차 모델링

대류층 지연 오차는 대기의 굴절률이 1보다 크기 때문에 GPS 위성 신호의 경로가 굴절되면서 나타나는 신호 지연 효과이다. 대류층 지연 오차는 건조한 성분 (dry part)과 습윤한 성분 (wet part)의 합으로 나타낼 수 있으며, 각 성분에 따른 대류층 지연은 서로 다른 양상으로 나타난다. 건조한 성분은 주로 기압에 따라 변하며, 상대적으로 변화율이 작고 안정하다. 반면 습윤한 성분은 기온 및 습도에 의한 영향이 주요하며, 기상 조건에 따른 변화율이 급격하기 때문에 모사하기가 매우 어렵다. 그러나 대류층 지연 효과의 약 90%가 건조한 성분이기 때문에 위성 신호가 통과한 경로의 대기 굴절률을 통해 대류층 지연 오차의 크기를 상당히 정확하게 추정하고 모델링하는 것이 가능하다. 이때 위성 신호는 천정으로부터 일정한 각도를 가지고 사용자에게 도달하므로, 이에 대한 고려가 필요하다. 대류층 천정 지연 (zenith delay)과 경사 지연 (slant delay) 사이의 관계를 모델링한 식을 mapping function이라고 하며, 경사 대류층 지연은 위성 양각이 5°일 때 천정 대류층 지연의 약 10배의 효과를 가지게 된다.

2-1 대류층 지연 오차 모델링

대류층 지연 효과를 정확하게 모델링하기 위한 노력이 GPS 개발 이전부터 이루어졌으며, 여러 가지 경험적인 대류층 지연 모델이 제시되었다. 대표적으로 1969년 Hopfield가 제안한 모델과, 1972년 Saastamoinen이 제안한 모델이 있다. 이 두 가지 모델은 대류층 건조 지연과 습윤 지연을 각각 기온, 기압, 습도에 대한 함수로 모델링 한다. 각 모델에 대한 구체적인 식은 참고문헌으로 대체한다 [5],[6].

두 모델의 대류층 건조 천정 지연 모델링 정확도는 수 mm 수준으로 알려져 있다. 구체적으로는 저양각 위성(EI = 5°)에 대해서 Hopfield 모델은 경사 지연 효과를 5 cm 이내로 보정이 가능한 반면, Saastamoinen 모델은 6 mm 이내로 제거 가능하다는 문헌적 결과가 존재한다. 대류층 습윤 천정 지연의 모델링 정확도는 일반적으로 건조 지연 모델링 정확도 보다 조금 낮은 수십 mm 수준이며, Hopfield 모델은 20 mm 수준, Saastamoinen 모델은 30 mm 수준으로 모델에 따른 정확도 차이가 약간 존재한다 [5].

Saastamoinen 모델과 Hopfield 모델은 간단한 모델링으로 대류층 지연 효과의 대부분을 상당히 정확하게 제거하는 것이 가능하다는 장점이 있다. 하지만 기상정보(기온, 기압, 습도)를 제공받아야 한다는 점에서 기준국이 아닌 일반 GPS 사용자가 대류층 지연 오차 제거를 위해 사용하기에는 약간의 문제가 있다. 따라서 SBAS에서는 사용자가 기상정보를 제공받지 않더라도 비교적 정확한 수준으로 대류층 지연 효과 보정이 가능하도록 새로운 모델을 제안하여 사용하고 있다.

2-2 SBAS 대류층 지연 보정 모델

미국의 WAAS는 1997년 Collins과 Langley가 제안한 UNB3 모델을 기반으로 기상정보 없이도 SBAS 사용자의 대류층 지연 오차를 효과적으로 제거할 수 있는 모델을 제시하였다. 이 모델은 내장된 5개의 기상 파라미터(기압, 기온, 수증기압, 온도 변화율, 수증기압 변화율)의 평균값 및 계절에 따른 변화량 바탕으로 사용자 위도와 날짜(DOY; day-of-year)에 따른 보간을 통해 전 지구 사용자의 대류층 지연량을 계산할 수 있다. 표 1은 사용자 위도에 따른 기상 파라미터의 평균값 및 계절에 따른 변화량이다. 표 1의 각 파라미터 값(ξ)은 day-of-year(D)와 해당 위도(ϕ)에 따라 식 (1)과 같이 계산된다. 이때 D_{min} 은 북반구에서 28, 남반구에서 211이다.

$$\xi(\phi, D) = \xi_0(\phi) - \Delta\xi(\phi) \cos\left(\frac{2\pi(D - D_{min})}{365.25}\right) \quad (1)$$

사용자 위도에 따른 기상 파라미터는 식 (2), (3)과 같이 선형 보간을 통해 계산이 가능하다.

$$\xi_0(\phi) = \xi_0(\phi_i) + [\xi_0(\phi_{i+1}) - \xi_0(\phi_i)] \frac{(\phi - \phi_i)}{(\phi_{i+1} - \phi_i)} \quad (2)$$

$$\Delta\xi(\phi) = \Delta\xi(\phi_i) + [\Delta\xi(\phi_{i+1}) - \Delta\xi(\phi_i)] \frac{(\phi - \phi_i)}{(\phi_{i+1} - \phi_i)} \quad (3)$$

위와 같이 기상 파라미터를 해당 날짜 및 해당 위치로 보간한 후, 사용자 고도에 대한 대류층 건조 천정 지연($T_{v,dry}$)과 습윤 천정 지연($T_{v,wet}$)을 계산하게 된다. 최종적으로 위성 양각에 대한 mapping function ($m(EI^j)$)을 사용하여 식 (4)와 같이 SBAS 사용자의 대류층 경사 지연을 추정하고 제거한다.

$$T^j = (T_{v,dry} + T_{v,wet}) \times m(EI^j) \quad (4)$$

자세한 알고리즘은 RTCA MOPS (radio technical commission for aeronautics minimum operational performance standards) DO-229D Appendix A 문서에서 확인할 수 있다 [7].

III. SBAS 대류층 지연 보정 모델 검증 및 분석

3-1 대류층 지연 모델 검증 방법

대류층 지연 모델의 성능을 검증하기 위해 IGS에서 제공하는 정밀 대류층 천정 지연 값인 ZPD 데이터를 참값으로 선정하였다. 이 데이터는 IGS 상시 기준국에서 PPP (precise point positioning) 후처리 방식으로 추정되어 300초 간격으로 제공되는 대류층 천정 지연 값으로, 정확도가 4 mm 수준으로 높아 본 연구에서 대류층 지연 참값으로 가정하였다 [8].

본 연구에서는 국내 유일 IGS 기준국인 수원(SUWN) 기준국의 2014년 매월 15일 ZPD 데이터(총 12일)를 사용하여 24시간 300초 간격의 대류층 천정 지연 참값을 계산하였다. 또한 Saastamoinen 모델 및 Hopfield 모델의 정확도를 SBAS 대류층 지연 보정 모델과 비교하기 위해 해당 날짜의 기상정보(기온, 기압, 습도)를 기상청으로부터 획득하여 각 모델 별 대류층 지연 천정 지연량을 계산하였다. 이때 기상정보는 수원(SUWN) 기준국과 가장 가까운 수원 기상관측소의 데이터를 사용하였으며, 기온(temperature) 데이터는 1시간 간격, 기압(pressure) 및 습도(humidity) 데이터는 3시간 간격이다. 획득한 기상정보 데이터는 시간 변화에 대한 보간 없이 가장 가까운 시간에 해당하는 기상정보를 활용하도록 검증 모듈을 단순화 하였다. 그림 1은 대류층 지연 모델 검증을 위한 모듈의 구성도를 나타낸 것이다.

표 1. SBAS 대류층 지연 보정 모델의 기상 파라미터
Table 1. Meteorological parameters for SBAS tropospheric delay correction model.

| Latitude (°) | Average | | | | |
|----------------|--------------------|----------------|-------------------|----------------------|------------------|
| | P_0 (mbar) | T_0 (K) | e_0 (mbar) | β_0 (K/m) | λ_0 |
| 15° or less | 1013.25 | 299.65 | 26.31 | 6.30e-3 | 2.77 |
| 30 | 1017.25 | 294.15 | 21.79 | 6.05e-3 | 3.15 |
| 45 | 1015.75 | 283.15 | 11.66 | 5.58e-3 | 2.57 |
| 60 | 1011.75 | 272.15 | 6.78 | 5.39e-3 | 1.81 |
| 75° or greater | 1013.00 | 263.65 | 4.11 | 4.53e-3 | 1.55 |
| Latitude (°) | Seasonal Variation | | | | |
| | ΔP (mbar) | ΔT (K) | Δe (mbar) | $\Delta \beta$ (K/m) | $\Delta \lambda$ |
| 15° or less | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00e-3 | 0.00 |
| 30 | -3.75 | 7.00 | 8.85 | 0.25e-3 | 0.33 |
| 45 | -2.25 | 11.00 | 7.24 | 0.32e-3 | 0.46 |
| 60 | -1.75 | 15.00 | 5.36 | 0.81e-3 | 0.74 |
| 75° or greater | -0.50 | 14.50 | 3.39 | 0.62e-3 | 0.30 |

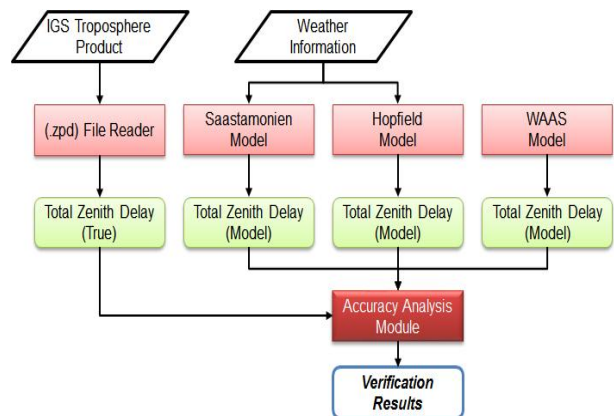


그림 1. 대류층 지연 모델 검증 모듈 구성도
Fig. 1. Block diagram of tropospheric delay model verification module.

3-2 대류층 지연 모델 별 정확도 검증

그림 2는 2014년 월별 수원 기준국의 대류층 천정 지연 값을 연속적으로 나타낸 것이다. 검은 실선은 IGS로부터 제공받은 ZPD 데이터의 대류층 천정 지연 참값을 의미한다. 파란 실선은 SBAS 대류층 지연 보정 모델로 계산된 천정 지연 값, 빨간 실선과 노란 실선은 각각 Saastamoinen 모델과 Hopfield 모델로 추정된 천정 지연 값을 나타낸다. 그 결과 Saastamoinen 모델과 Hopfield 모델로 계산된 천정 지연 값은 거의 동일하며, 대류층 천정 지연 참값의 경향을 상당히 유사한 수준으로 모사하는 것을 확인할 수 있다. 반면 SBAS 대류층 지연 보정 모델은 대류층 지연 참값보다 전반적으로 큰 bias 오차를 가지고 추정 되고 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 SBAS 대류층 지연 보정 모델을 통해 계절별로 변화하는 대류층 지연량 경향은 반영할 수 있지만, 모델 특성 상 하루 사이에 변화하는 대류층 지연 효과를 세부적으로 모델링 할 수 없기 때문에 24시간 내내 동일한 지연 값이 추정됨을 알 수 있다.

그림 3은 각 대류층 지연 모델의 정확성을 확인하기 위해 대류층 천정 지연 참값을 각 모델을 사용하여 보정한 후 잔여 오차를 나타낸 것이다. 앞서 설명한 대로 Saastamoinen 모델과 Hopfield 모델의 정확도는 거의 일치하는 반면, SBAS 대류층 지연 보정 모델은 잔여 오차의 bias 성분이 많이 남아있다. 하지만 SBAS 대류층 지연 보정 모델을 포함하여 3가지 모델 모두 천정 지연 잔차의 최대값이 0.15 m 는 넘지 않는 것을 알 수 있다.

계절별 대류층 지연 오차의 특성을 살펴보면 기온 및 습도가 높고 불규칙한 여름철 대류층 지연량의 절댓값이 크고, 각 대류층 지연 모델의 정확도도 떨어지는 것을 알 수 있다. 이는 대류층의 습윤한 성분이 특히 기온 및 습도에 큰 영향을 받아 모델링이 쉽지 않기 때문이다. 반면 기온 및 습도가 낮은 겨울철은 대류층의 습윤한 성분에 의한 영향력이 작아 천정 지연 모델링 정확도가 상당히 높은 편이다.

표 2는 각 대류층 지연 모델의 보정 정확도를 정량적으로 나타낸 것이다. 그 결과 Saastamoinen 모델과 Hopfield 모델은 참값 데이터의 정확도가 4 mm 수준임을 생각할 때 동일한 오차 보정 정확도를 갖는다고 할 수 있으며, 그 수준은 RMS 약 30 mm 이다. Saastamoinen 모델 또는 Hopfield 모델을 사용할 경우 대류층 지연 오차의 bias 성분은 대부분 제거 가능하며, 기상정보의 신뢰도를 고려할 때 표준편차도 작은 편으로 매우 정확한 대류층 오차 모델링 기법이라고 할 수 있다. 반면 SBAS 대류층 지연 보정 모델은 24시간 동안의 세부적인 대류층 변화 경향성을 반영하지 못하여 표준편차가 다른 모델 보다 클 뿐만 아니라, 모델 보정 후 대류층 천정 지연 오차의 잔여 오차 bias 가 약 50 mm 수준으로 상대적으로 낮은 정확도를 보였다. 북미 지역에서 동일한 모델을 검증한 결과와 비교해보았을 때, 표준편차는 50 mm 수준으로 비슷하다. 하지만 잔여 오차 bias의 경우 북미 지역에서 약 5 mm, 한반도 지역에서는 50 mm로 10배 가까이 차이가 남을 알 수 있다[3].

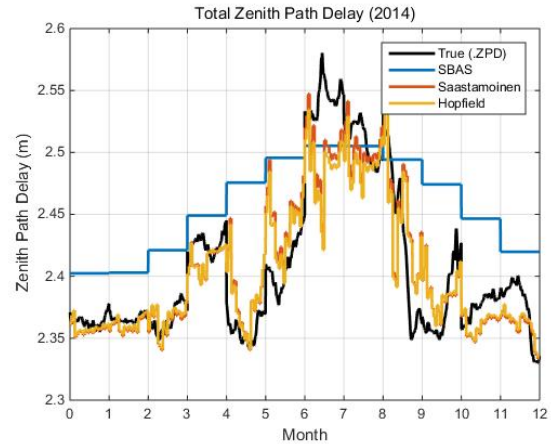


그림 2. 각 대류층 지연 모델의 대류층 천정 지연량
 Fig. 2. Total zenith path delay of each tropospheric delay model.

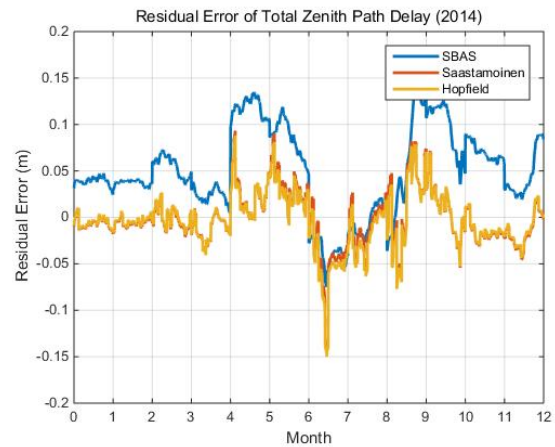


그림 3. 각 대류층 지연 모델 정확도 (모델 잔여오차)
 Fig. 3. Accuracy of each tropospheric delay model (model residual error).

표 2. 대류층 지연 모델 검증 결과 (2014년, 수원 기준국)
 Table 2. Verification results of tropospheric delay model (2014, IGS SUWN station).

| Models | SBAS Model | Saastamoinen Model | Hopfield Model |
|-----------|------------|--------------------|----------------|
| RMS (mm) | 67.9753 | 30.0467 | 30.6649 |
| Bias (mm) | 49.2855 | -2.1399 | -3.8792 |
| STD (mm) | 46.8210 | 29.9747 | 30.4229 |

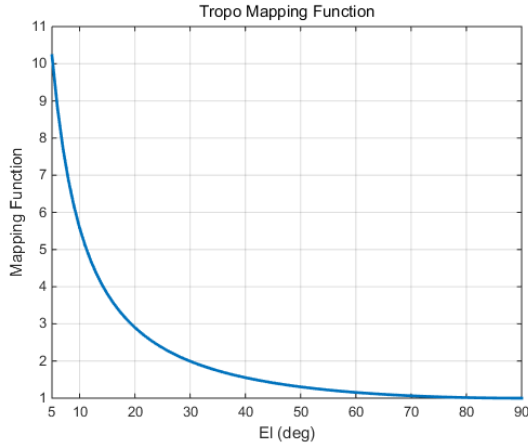


그림 4. 앙각에 따른 대류층 mapping function (SBAS 모델)
 Fig. 4. Tropospheric mapping function for elevation angle (SBAS model).

그림 4는 위성 앙각에 따른 대류층 mapping function을 나타낸 것으로, 저앙각 위성(EI = 5°)에서 mapping function 값이 10 까지 커질 수 있음을 알 수 있다. 즉 SBAS 대류층 지연 보정 모델에 의한 대류층 천정 지연 오차의 잔여 오차가 50 mm 수준이라는 것은 저앙각 위성에서 실제 GPS 측정치의 range 방향 잔여 오차가 0.5 m 까지 발생할 수 있음을 의미한다. 즉 KASS 사용자가 기존 SBAS 대류층 보정 모델을 그대로 사용할 경우 측위 성능이 대류층 지연 오차에 의해 일부 저하될 수 있다.

SBAS 대류층 지연 보정 모델은 전 지구 SBAS 사용자를 대상으로 구현되었기 때문에 광범위한 지역에서는 평균적으로 만족스러운 정확도를 갖는 모델이라고 할 수 있다. 반면 한반도와 같이 일부 지역을 대상으로 할 경우 동일한 수준의 정확도를 기대하기가 어렵다. 또한 북미 지역과 달리 삼면이 바다로 둘러싸인 한반도 지역은 대류층의 습윤한 성분에 의한 영향이 상대적으로 크기 때문에 모델링 성능이 더욱 감소한 것으로 보인다.

IV. 결 론

본 연구에서는 IGS에서 제공하는 정밀 대류층 천정 지연 데이터를 활용하여 한반도 지역에서 SBAS 대류층 지연 보정 모델의 정확도를 검증하고, Saastamoinen 모델 및 Hopfield 모델과 성능을 비교해보았다. 그 결과 Saastamoinen 모델과 Hopfield 모델은 RMS 약 30 mm 수준으로 대부분의 대류층 지연 오차 bias 제거가 가능한 정확한 모델링 기법임을 확인하였다. 반면 SBAS 대류층 지연 보정 모델은 표준편차가 클 뿐만 아니라, 제거하지 못한 대류층 천정 지연 오차 bias가 약 50 mm 수준으로 Saastamoinen 모델 및 Hopfield 모델보다 성능이 떨어졌다. 이는 북미지역에서 SBAS 대류층 지연 보정 모델을 검증한 결과인 평균 5 mm 수준에 못 미치는 결과이며, mapping function 값이 10 정도 되는 저앙각 위성(EI = 5°)에서 GPS 측정

치의 range 방향 잔여 오차가 0.5 m 까지도 발생할 수 있음을 의미한다.

대류층 지연 오차는 다른 GPS 오차 요소들 보다 모델을 사용하여 비교적 정확한 제거가 가능하므로 측위 성능에 큰 영향을 미치지 않는다고 본다. 본 연구에서 검증한 SBAS 대류층 보정 모델도 Saastamoinen 및 Hopfield 모델보다 정확도 성능은 떨어지지만, m급 정확도를 요구하는 SBAS 사용자가 사용함에 있어서 큰 문제는 없다. 하지만 한반도 기상 관측 데이터를 바탕으로 SBAS 대류층 보정 모델의 기상 파라미터를 한반도에 적합하도록 수정한다면 더 정확한 KASS 서비스 제공이 가능할 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 2015년도 서울대학교 항공우주신기술연구소를 통해 계약된 LIG 넥스원의 산학연구 “한국형 SBAS 성능 검증 방안 연구”의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다. 본 연구는 미래창조과학부, 한국연구재단의 지원을 받은 우주핵심기술개발사업의 일환으로 우주교육시스템 구축사업의 지원(NRF-2015M1A3A3A05027630)에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] C. S. Sin, J. H. Kim, and J. Y. Ahn, “Technical development trends of satellite based augmentation system,” *Electronics and Telecommunications Trends*, Vol. 29, No. 3, pp. 74-85, Jun, 2014.
- [2] G. W. Nam, “South Korea launches Korean SBAS,” *CNS TODAY*, Vol. 4, pp. 4-12, Feb, 2015.
- [3] R. Leandro, M. Santos, and R. B. Langley, “UNB neutral atmosphere models: development and performance,” in *Proceedings of Institute of Navigation National Technical Meeting 2006*, Monterey: CA, pp. 564-573, 2006.
- [4] Y. W. Ahn, D. H. Kim, J. Bond, and W. S. Choi, “Performance test of the WAAS tropospheric delay model for the Korean WA-DGNSS,” *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 15, No. 4, pp. 523-535, 2011.
- [5] B. W. Parkinson, *Global Positioning System: Theory and Applications*, Vol. 1, Washington, DC; American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996.
- [6] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and J. Collins, *Global Positioning System Theory and Practice*, 5th ed. New York, NY: Springer, 2001.
- [7] Minimum operational performance standards for global positioning system/wide area augmentation system airborne

equipment, RTCA DO-229D, 2006.

[8] S. H. Byun and Y. E. Bar-Sever, "A new type of troposphere

zenith path delay product of the international GNSS service,"

Journal of Geodesy, Vol. 83, No. 3, pp. 367-373, 2009.



김 동 옥 (Dong-Uk Kim)

2013년 8월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학사)
2013년 9월 ~ 현재 : 서울대학교 대학원 기계항공공학부 석박사통합과정
※ 관심분야 : 보정위성항법시스템, 광역보정위성항법시스템



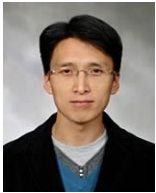
한 덕 화 (Deok-Hwa Han)

2011년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학사)
2011년 3월 ~ 현재 : 서울대학교 대학원 기계항공공학부 석박사통합과정
※ 관심분야 : 광역보정시스템, 전리층 지연



기 창 돈 (Chang-Don Kee)

1984년 2월 : 서울대학교 항공공학과 (공학사)
1986년 2월 : 서울대학교 항공공학과 (공학석사)
1994년 1월 : 미국 스탠포드대학교 항공우주공학과 (공학박사)
1996년 9월 ~ 현재 : 서울대학교 기계항공공학부 교수
※ 관심분야 : 위성항법시스템, 보정위성항법시스템, 광역보정위성항법시스템, 초정밀위치결정시스템, 우주비행체 자세결정, 무인항공기 자동제어 시스템, 실내용 자동항법시스템, 항공교통관제시스템



이 철 수 (Chul-Soo Lee)

2000년 2월 : 한양대학교 전자공학과 (공학사), 2002년 8월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
2010년 8월 : 충남대학교 전자전파정보통신공학과 (공학박사), 2002년 8월~2007년 3월 : 한국전자통신연구원 연구원
2007년 3월~2010년 10월 : 국방과학연구소 선임연구원
2010년 10월 ~ 현재 : LIG Nex1 통신연구센터 수석연구원
※ 관심분야 : 위성항법시스템, 광역보정위성항법시스템, 의사위성항법시스템, 위성항법수신기



이 충 희 (Choong-Hee Lee)

2006년 2월 : 아주대학교 전자공학과 (공학사)
2008년 2월 : 아주대학교 전자공학과 (공학석사)
2015년 2월 : 아주대학교 전자공학과 (공학박사)
2015년 3월 ~ 현재 : LIG Nex1 통신연구센터 선임연구원
※ 관심분야 : 보정위성항법시스템, 광역보정위성항법시스템, 이동통신 시스템, 소형셀, QoS, QoE