JPNT 12(2), 113-119 (2023)
https://doi.org/10.11003/JPNT.2023.12.2.113

JPNT Journal of Positioning, Navigation, and Timing

Ionospheric Model Performance of GPS, QZSS, and BeiDou on the Korean Peninsula

Serim Bak†, Beomsoo Kim, Su-Kyung Kim, Sung Chun Bu, Chul Soo Lee

Creative Commons Attribution Non-Commercial License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

JPNT 12(2), 113-119 (2023)
https://doi.org/10.11003/JPNT.2023.12.2.113

JPNT Journal of Positioning, Navigation, and Timing

Ionospheric Model Performance of GPS, QZSS, and BeiDou on the Korean Peninsula

Serim Bak†, Beomsoo Kim, Su-Kyung Kim, Sung Chun Bu, Chul Soo Lee

Satellite System Laboratory, LIG Nex1, Gyeonggi-do 16911, Korea

ABSTRACT

Satellite navigation systems, with the exception of the GLObal NAvigation Satellite System (GLONASS), adopt ionosphere models and provide ionospheric coefficients to single-frequency users via navigation messages to correct ionospheric delay, the main source of positioning errors. A Global Navigation Satellite System (GNSS) mostly has its own ionospheric models: the Klobuchar model for Global Positioning System (GPS), the NeQuick-G model for Galileo, and the BeiDou Global Ionospheric delay correction Model (BDGIM) for BeiDou satellite navigation System (BDS)-3. On the other hand, a Regional Navigation Satellite System (RNSS) such as the Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) and BDS-2 uses the Klobuchar Model rather than developing a new model. QZSS provides its own coefficients that are customized for its service area while BDS-2 slightly modifies the Klobuchar model to improve accuracy in the Asia-Pacific region. In addition, BDS broadcasts multiple ionospheric parameters depending on the satellites, unlike other systems. In this paper, we analyzed the different ionospheric models of GPS, QZSS, and BDS in Korea. The ionospheric models of QZSS and BDS-2, which are based in Asia, reduced error by at least 25.6% compared to GPS. However, QZSS was less accurate than GPS during geomagnetic storms or at low latitude. The accuracy of the models according to the BDS satellite orbit was also analyzed. The BDS-2 ionospheric model showed an error reduction of more than 5.9% when using GEO coefficients, while in BDS-3, the difference between satellites was within 0.01 m.

Keywords: GNSS, ionospheric delay, ionospheric coefficients, Klobuchar model, BDGIM

1. 서론

세계 각국의 위성항법시스템은 오차 주요 원인인 전리층 지연을 보정하기 위해 기존의 전리층 모델을 채택하거나 새로운 모델을 개발하였다. 한국형 위성항법시스템 (Korean Positioning System, KPS) 개발 사업이 착수됨에 따라 서비스 지역 및 요구 성능 등을 충족시킬 수 있는 한반도에 적합한 전리층 모델이 필요하다. Global Navigation Satellite System (GNSS)인 Global Positioning System (GPS), Galileo, BeiDou Navigation Satellite System (BDS)-3은 각각 Klobuchar 모델, NeQuick-G 모델, Ionospheric delay correction Model (BDGIM) 이라는 시스템 고유 모델을 사용한다 (European Commission 2016, China Satellite Navigation Office 2017). KPS와 같은 Regional Navigation Satellite System (RNSS)인 QZSS, BDS-2는 자체 모델 대신 GPS의 Klobuchar 모델을 활용한다. 사용자는 항법메시지에 담긴 각 시스템의 전리층 보정 계수를 활용하여 전리층 모델에 따라 약 50~80%의 전리층 지연을 보정할 수 있다 (Klobuchar 1987, Yuan et al. 2019, Zhao et al. 2020).

전리층 모델마다 요구되는 전리층 보정 계수의 수는 상이하며, Klobuchar 모델은 8개, NeQuick-G는 3개, BDGIM은 9개의 계수가 방송된다. QZSS는 GPS와 동일한 Klobuchar 모델을 사용하지만 지역 특성을 고려하여 서비스 지역에 한해서 자체 전리층 계수를 제공한다. QZSS에서 제공하는 전리층 계수는 QZSS의 서비스 지역에서만 사용 가능하며, 이외 지역에서는 GPS의 보정 계수를 적용한다 (Cabinet Office 2021). BDS는 2가지 전리층 모

Received Mar 10, 2023 **Revised** Mar 27, 2023 **Accepted** Mar 31, 2023
†**Corresponding Author**
E-mail: serim.bak@lignex1.com
Tel: +82-31-5179-7293
Serim Bak https://orcid.org/0000-0003-4532-5426
Beomsoo Kim https://orcid.org/0000-0003-0116-6013
Su-Kyung Kim https://orcid.org/0000-0001-6488-267X
Sung Chun Bu https://orcid.org/0000-0002-5133-4540
Chul Soo Lee https://orcid.org/0000-0001-5557-0682

Copyright © The Institute of Positioning, Navigation, and Timing
http://www.ipnt.or.kr Print ISSN: 2288-8187 Online ISSN: 2289-0866

델을 채택하였다. BDS-2는 중국 및 인근 지역에 특화된 수정된 Klobuchar 모델을 사용한다. 반면, BDS-3는 전세계를 대상으로 서비스를 시작하면서 전지구적 전리층 특성을 고려하여 개발한 자체 모델 BDGIM을 도입하였다. BDGIM 전리층 계수는 BDS-3 위성으로 방송된다. 현재 BDS-2에서 BDS-3로의 전환 단계이므로 BDS-3 위성은 BDS Klobuchar 모델과 BDGIM의 전리층 계수를 모두 방송한다 (China Satellite Navigation Office 2018, Zhao et al. 2020). BDS는 방송 위성 및 시간에 따른 모든 전리층 계수를 항법메시지로 전송하며, GEO 위성이 방송하는 파라미터가 1순위로 권장된다.

전리층 모델 성능 분석에 관한 연구는 과거부터 진행되었다. GPS Klobuchar (GPSK), BeiDou Klobuchar (BDSK), Galileo NeQuick 모델의 추정 성능을 위도 및 태양 활동에 따라 분석한 연구가 수행되었다 (Farah 2020, Tian et al. 2022). BDGIM 모델 오차를 GIM 및 Jason-2 관측 Vertical Total Electron Content (VTEC)에 대해 분석한 연구도 수행되었다 (Wang et al. 2021). 전세계에 분포한 25개 international GNSS Monitoring and Assessment System (iGMAS) 관측소에서의 전리층 지연을 GPSK, BDSK, BDGIM로 추정하고, Center of Orbit Determination in Europe (CODE) Global Ionospheric Map (GIM)을 기준으로 모델 정확도를 비교 분석한 연구도 있었다 (Zhao et al. 2020).

다만 과거 연구는 한반도로부터 먼 곳에 위치한 관측소 혹은 전세계를 범위로 전리층 지연 오차를 비교하였으며, QZSS Klobuchar (QZSK) 모델에 대한 분석은 수행되지 않았다. 본 논문에서는 GPS, QZSS, BDS의 전리층모델을 이용하여 한반도에서의 전리층 지연을 추정하고, International GNSS Service (IGS) GIM을 기준값으로 사용하여 전리층 지연 오차를 계산하였다. 또한 태양활동 및 지자기활동에 따른 영향도 분석하였고 추가로 BDS위성의 경우 전리층 계수를 방송하는 위성(GEO, IGSO, MEO)에 따른 전리층 지연값도 비교하였다.

2. IONOSPHERIC MODELS

일반적으로 전리층 모델은 장기간 전리층 관측 데이터로부터 얻어진 경험적 모델과 함수로 피팅된 수학적 모델로 구분된다 (Su et al. 2019, Zhao et al. 2020). 다음은 본 연구에서 사용된 전리층 모델에 대한 간략한 설명이다.

2.1 Klobuchar 모델

Klobuchar 모델은 전리층이 고도 350 km에 위치한 얇은 층이라고 가정한 2차원 모델로, 전리층 지연을 cosine 함수의 진폭 및 주기로 표현한다 (Klobuchar 1987). 낮 시간대의 전리층 지연은 지방시 (Local Time, LT) 14시에 위상이 최대인 half-cosine 함수로, 밤 시간에는 전리층 지연이 5 ns로 일정하다고 가정한다. Klobuchar 모델의 수직 전리층 지연 식은 Eq. (1)과 같다.

$$T_{iono} = \begin{cases} 5\times10^{-9} + AMP\left(1-\frac{x^2}{2}+\frac{x^4}{24}\right) & (|x|<1.57) \\ 5\times10^{-9} & (|x|\geq 1.57) \end{cases} \quad (1)$$

여기서 T_{iono}는 수직 전리층 지연, AMP는 진폭, x는 위상을 의미한다. Cosine 함수의 진폭, 주기, 위상은 사용자의 위경도 및 시간과 항법메시지로 방송되는 8개의 전리층 보정 계수에 의해 결정된다. GPS 주관제국 (Master control station)은 Day Of Year (DOY) 및 태양 Flux 값인 F10.7을 고려하여 전리층 파라미터를 제공한다 (Klobuchar 1987, Farah 2020).

QZSS 또한 Klobuchar 모델을 사용하지만, 전지구적인 전리층 보정 계수를 제공하는 GPS와는 다르게 서비스 제공 지역에 적합한 QZSS만의 자체 보정 계수를 제공한다 (Cabinet Office 2021). QZSS는 일본 인근 지역인 Japan-area와 아시아-태평양을 커버하는 Wide-area로 서비스 지역을 구분하며, 전리층 보정 계수를 서비스 지역에 따라 2가지로 방송한다. 이때, 전리층 계수는 대상 서비스 지역을 벗어난 범위에서 사용 불가하며 (Cabinet Office 2021), 이외 지역에서는 GPS의 방송 보정 계수를 사용한다.

2.2 BeiDou Klobuchar 모델

BDS는 북반구 중위도 지역에 적합하도록 기존 Klobuchar 모델을 약간 수정한 모델로 이를 사용하면 중국 및 아시아-태평양 지역에서 전리층 지연을 70%까지 보정할 수 있다 (Zhao et al. 2020). BDS Klobuchar (BDSK) 모델은 남반구에서의 데이터 부족으로 인하여 남반구의 전리층 특성을 고려하지 않고 북반구와 대칭으로 표현하므로 남반구에서는 정확도가 감소한다 (Zhang et al. 2014). 또한, GPS와 달리 위도 제한이 없으며, 지리 좌표계 (Geographic coordinates)를 사용한다. BDSK는 수직 전리층 지연은 Eq. (2)와 같다.

$$T_{iono} = \begin{cases} 5\times10^{-9} + A_2\cos\left[\frac{2\pi(t-50400)}{A_4}\right] & (|t-50400|<A_4/4) \\ 5\times10^{-9} & (|t-50400|\geq A_4/4) \end{cases} \quad (2)$$

이때, T_{iono}는 수직 전리층 지연, A_2와 A_4는 각각 Cosine 함수의 진폭 및 주기, t는 지방시이다. A_2, A_4는 3차 다항식으로 계산되며, Eqs. (3-4)와 같다.

$$A_2 = \begin{cases} \sum_{i=0}^{3}\alpha_i|\varphi_M|^i & (A_2\geq 0) \\ 0 & (A_2<0) \end{cases} \quad (3)$$

$$A_4 = \begin{cases} 72000 & (A_4\leq 72000) \\ \sum_{i=0}^{3}\beta_i|\varphi_M|^i & (72000\leq A_4\leq 172800) \\ 172800 & (A_4\geq 172800) \end{cases} \quad (4)$$

여기서, α_i, β_i는 방송되는 전리층 보정 파라미터이며, φ_M은 Ionospheric Pierce Point (IPP) 위도이다. 전리층 보정 파라미터는 중국 내 감시국의 이중 주파수 관측값을 이용하여 계산되어 2시간마다 업데이트 된다 (Liu et al. 2022). Eqs. (3-4)로부터 BDSK는 남반구, 북반구의 전리층 지연을 대칭 형태로 표현하는 것을 확인할 수 있다.

BDGIM이 도입됨에 따라 BDSK는 점차 BDGIM으로 대체될 예정이다. 다만, 현재까지는 BDSK, BDGIM의 전리층 계수가 모두 방송되고 있으며 완전한 전환이 이루어지지 않았다.

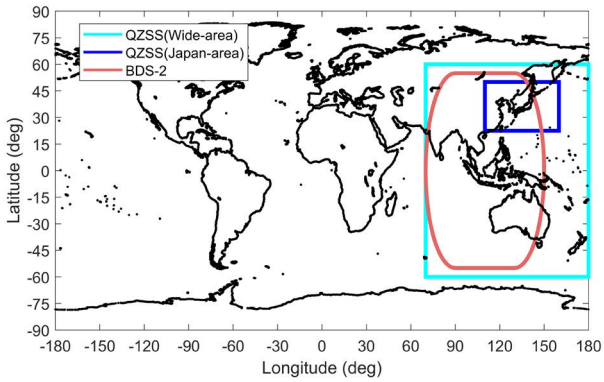


Fig. 1. Service coverages of QZSS and BDS-2.

2.3 BDGIM

BDGIM은 BDS-3의 전세계 서비스를 위하여 도입된 전세계 전리층 모델이다. Klobuchar 모델과 같이 전리층을 얇은 층으로 가정한 2차원 모델이며, 전리층이 고도 400 km에 위치한다고 가정한다. 구면조화 함수전개 (Spherical harmonic expansion)에 기반하여 개발되었으며 연산 효율을 고려하여 차수 (degree)를 결정하였다 (Yang et al. 2020, Wang et al. 2021). BDGIM은 수직 전리층 지연을 항법메시지의 전리층 파라미터로부터 계산되는 Estimation part와 경험적 모델로부터 계산되는 Prediction part의 합으로 표현한다 (Wang et al. 2021). BDGIM은 BDS-3 위성으로 9개의 전리층 파라미터를 방송하며, 전리층 모델링 정확도 개선을 위하여 17개의 내장 파라미터를 가진다. BDS-3 사용자는 Eq. (5)를 이용하여 전리층 지연을 계산할 수 있다.

$$T_{iono} = \sum_{i=0}^{9} \alpha_i A_i + \sum_{j=1}^{17} \beta_j B_j \qquad (5)$$

여기서 T_{iono}는 수직 전리층 지연, α_i는 방송 전리층 보정 계수, β_j는 내장된 전리층 파라미터로부터 계산된 구면조화 파라미터, A_i,B_j는 정규화된 르장드르 다항식 (Normalized Legendre polynomial)이다.

3. DATA SETS

IGS, China Satellite Navigation Office-Test and Assessment Research Center (CSNO-TARC)의 BRoadCast ephemeris (BRDC) 파일의 Header에 포함된 전리층 보정 파라미터를 이용하여 전리층 지연 추정을 수행하였다. 2023년 1월 기준, IGS BRDC를 비롯한 (MGEX) 파일에는 BDGIM의 전리층 계수가 포함되지 않아 BDGIM의 전리층 계수는 CSNO-TARC 데이터를, 나머지 모델은 IGS BRDC 데이터를 이용하였다.

BDS는 타 항법시스템과 달리 방송 위성 및 시간에 따른 전리층 계수를 모두 항법메시지 Header에 실어 방송한다. RINEX 3.04는 BDS 전리층 파라미터의 우선순위를 GEO, IGSO, MEO 위성 순으로 권고한다 (IGS 2018). 본 연구에서는 BDSK, BDGIM 성능 분석을 위해 GEO 위성이 방송한 전리층 계수를 사용하였다.

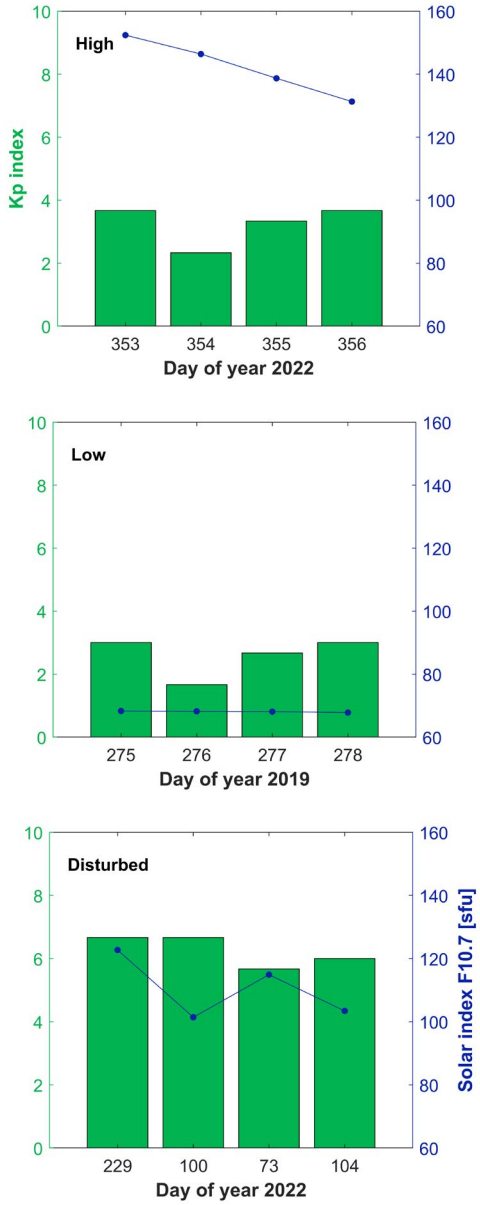


Fig. 2. F10.7 and maximum Kp index during the selected periods in 2019 and 2022.

본 연구에서는 한반도 및 인근 지역에서의 전리층 모델에 따른 성능을 분석하기 위하여 분석 지역을 위도 22.5˚N~50˚N, 경도 110˚E~160˚E로 설정하였다. Fig. 1은 QZSS와 BDS-2의 서비스 지역을 나타낸 것으로 위성항법시스템 간의 공통 서비스 지역이면서 한반도에서의 영향을 볼 수 있는 Japan-area를 중심으로 테스트 지역을 결정하였다. 또한, 참값으로 사용한 IGS GIM의 격자 간격과 동일하게 위도 2.5˚, 경도 5˚ 간격으로 설정하였다.

태양활동에 따른 전리층 모델 성능 분석을 위하여 태양활동 세기에 따라 총 3개 기간을 선정하여 분석을 수행하였다. Fig. 2는 각 분석 기간의 태양 및 지자기활동 지표를 나타낸 것이다. 지자기폭풍이 발생한 날을 Disturbed라 표현하였다.

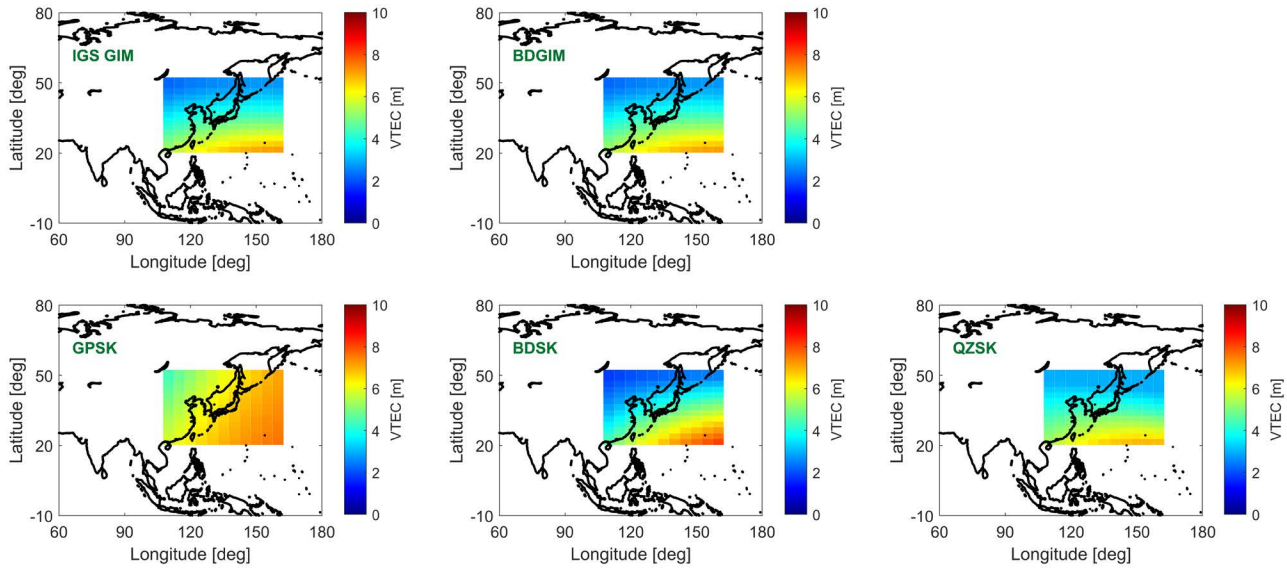


Fig. 3. Regional VTEC maps from different ionospheric models near Korean peninsula on December 20 2022 at 2:00 UT.

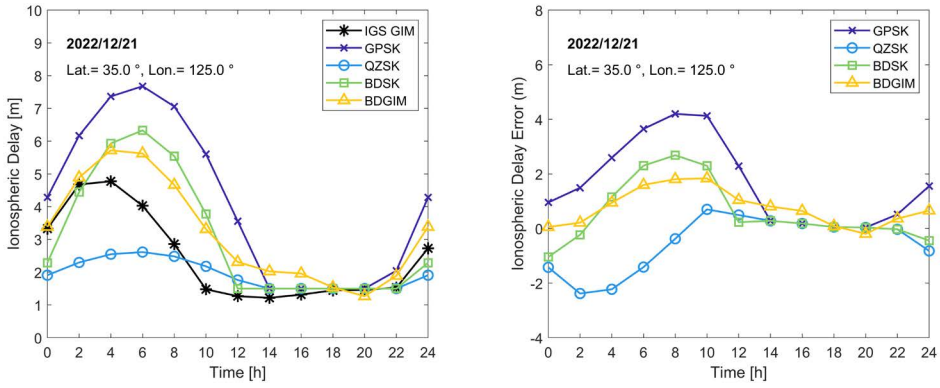


Fig. 4. Ionospheric delay and errors on December 21, 2022.

4. RESULTS AND DISCUSSION

GPS, QZSS, BDS의 전리층 지연 모델 성능 분석을 위해 수직 전리층 지연값을 계산하고, IGS GIM을 참값으로 가정하여 오차를 계산하였다. IGS는 8개의 독립적인 Ionospheric Associate Analysis Centers (IAACs)에서 각각 산출한 전리층 지도를 Ionospheric Associate Combination Center (IACC)에서 가중치를 적용하여 결합된 전리층 지도를 생성한다. 본 연구에서 참값으로 사용한 Final TEC grid는 2-8 TECU의 정확도를 가진다 (IGS 2023). 다만, 격자 기반으로 추정된 값에는 Averaging effect가 포함되어 있어 지역적인 전리층 교란 등을 고려한 성능 분석에는 한계가 있을 것으로 판단된다.

Fig. 3은 2022년 12월 20일 2시의 모델별 VTEC을 위경도에 따라 나타낸 것이다. 한반도 지역에서 GPSK가 타 모델 대비 VTEC을 크게 추정하며, QZSK, BDSK, BDGIM으로 추정한 VTEC의 위경도에 따른 경향성은 IGS GIM과 유사하였다.

Fig. 4는 대전관측소 부근의 IGS GIM 격자점인 위도 35˚, 경도 125˚에서의 1일 수직 전리층 지연 및 오차 변화를 나타낸 것이다. Klobuchar 기반 전리층 모델들은 모두 동일한 시점에서 최댓값을 갖는 반면, BDGIM과 IGS GIM은 그보다 2시간 더 빠른 시점에서 최댓값을 갖는다. GPSK, BDSK, QZSK는 전리층 지연 최대값이 최대 5.06 m 차이 났으며, QZSK는 모델 중 유일하게 IGS GIM보다 전리층 지연을 작게 추정하는 경향이 있었다. BDGIM의 1일 RMS 오차가 1.01 m로 GPSK 대비 약 56% 정확한데, 이는 BDGIM은 중국 내 관측데이터에 기반하기 때문이다.

Fig. 5는 위도에 따른 전리층 지연 및 오차의 RMS를 나타낸 것이다. GPSK는 위도가 높아질수록 오차가 증가하는 반면, QZSK는 오차가 감소하였다. 특히 QZSK는 저위도 지역에서 오차가 다른 모델 대비 4배 이상 크게 나타나는데, 이는 QZSK 특성과 연관된 것으로 생각된다. QZSK은 GPSK 대비 상대적으로 낮은 α_i를 방송하여 전리층 지연의 진폭이 작게 산출되는데, 이로 인하여 전리층 지연이 최대인 저위도 지역에서 전리층 지연 추정값이 다른 모델의 절반 수준에 그친다. 또한, QZSK 오차가 최대인 지점은 QZSS Japan-area의 경계 지역으로 Japan-area에 최적화된 전리층 보정 계수의 정확도가 감소하는 것으로 추정된다.

Fig. 6은 태양 및 지자기활동에 따라 IGS GIM의 VTEC 값을

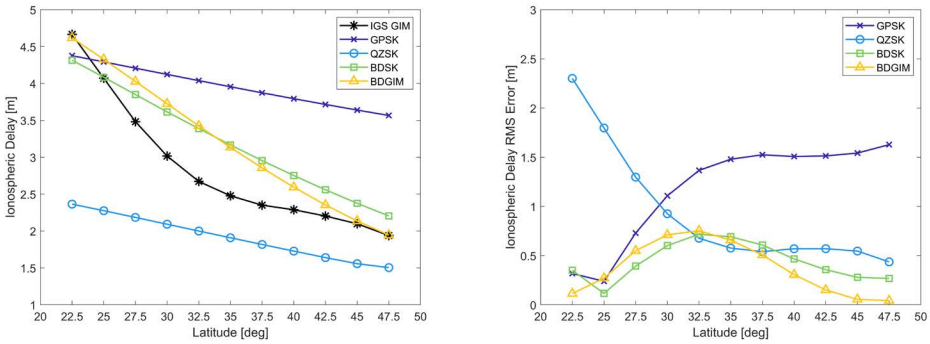


Fig. 5. Ionospheric delay and error of different ionospheric models along latitudes on December 20-23, 2022.

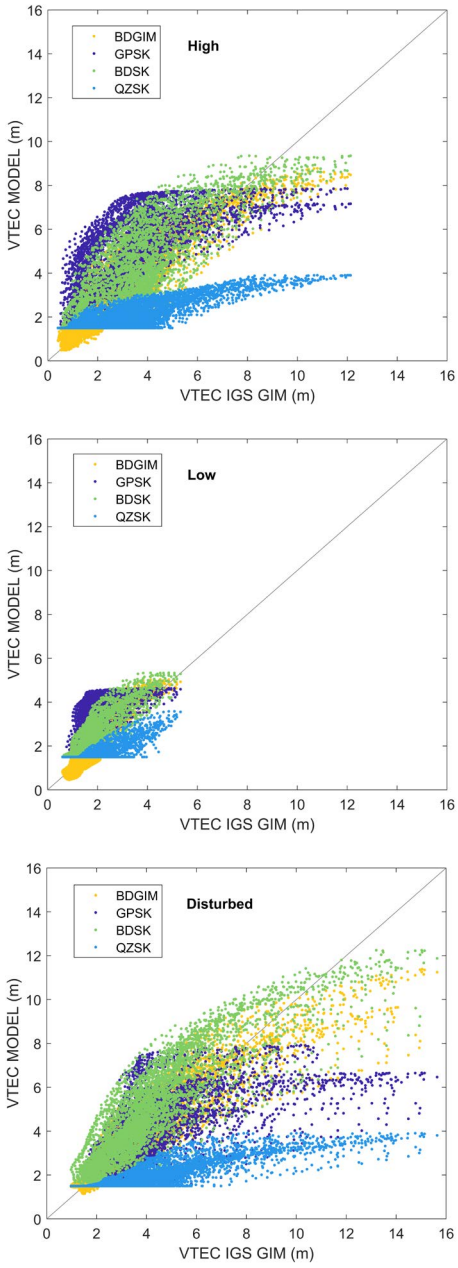


Fig. 6. Comparison of modeled VTEC values along the IGS GIM in 3 different periods which is distinguished in solar activities.

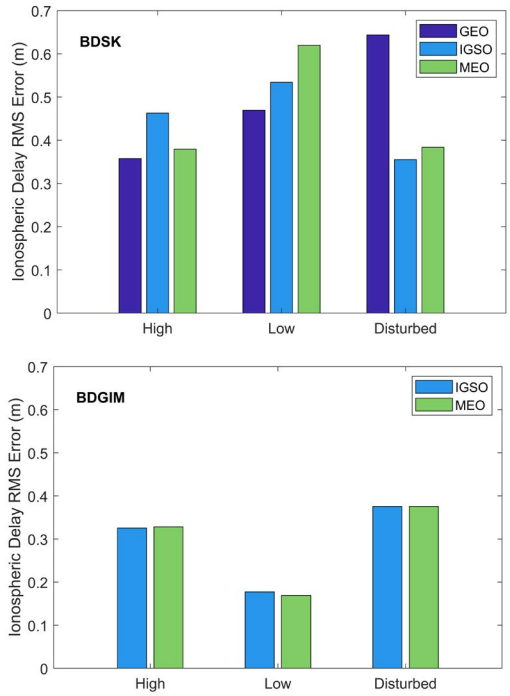


Fig. 7. Accuracy of BDS ionospheric models with different types of broadcast satellites.

Table 1. RMS errors of the ionospheric models relative to IGS GIM for 3 periods (unit: m).

Solar activity	Model			
	GPSK	QZSK	BDSK	BDGIM
High	1.17	0.87	0.36	0.33
Low	0.87	0.07	0.47	0.18
Disturbed	1.03	2.47	0.64	0.38

기준으로 모델 별 VTEC 값을 나타낸다. GPSK는 IGS GIM보다 전리층 지연을 더 크게, QZSK는 더 작게 추정하는 경향을 보이며, 태양활동이 강할 때 경향성이 크게 나타났다. 반면, BDS 모델들은 중심선을 기준으로 상대적으로 고르게 분포하며, 이는 전리층 지연 추정 성능이 안정적임을 나타낸다. 또한, 지자기폭풍 발생 시 전리층 지연값의 크기가 전체적으로 증가한 점을 제외하면 특별한 변화는 관측되지 않았다. BDGIM과 달리 GPSK, QZSK, BDSK 모델은 Klobuchar 모델의 특성상 밤 동안 고정된 값을 사

용하므로, 원점 근처에서 IGS GIM이 0 m에 가까운 값을 가질 때, Klobuchar 모델들은 약 1.6 m의 편차가 발생하였다.

Table 1은 전리층 모델의 전리층 지연 오차 RMS를 산출한 것이다. 태양활동이 약한 기간에는 QZSK 모델이 가장 우수한 성능을 보인다. 그러나 태양활동이 강해지면 QZSK 모델의 성능이 나빠지는 경향이 있는데, 특히 지자기 폭풍이 발생할 때 GPSK 모델과 비교하여 약 1.4배 더 큰 오차가 발생한다. QZSK는 태양활동 강도에 따라 1.22 m의 편차를 보이는 반면, GPSK와 BDSK 모델은 각각 0.15, 0.14 m 수준의 작은 편차를 보이며 BDGIM 모델은 가장 낮은 값인 0.10 m를 가진다. 지자기폭풍의 경우를 제외하면, 한반도에서 GPSK보다 중국 혹은 일본을 기반으로 한 모델들이 더 정확하며, 지자기폭풍이 발생하더라도, BDS 모델들은 GPSK보다 더 나은 추정 성능을 보였다.

다음은 BDS 전리층 보정 계수를 방송하는 위성에 따른 전리층 모델의 오차이다. BDSK 전리층 보정 계수는 GEO, IGSO, MEO 위성에서 B1I 신호로 방송되며, BDGIM의 계수는 BDS-3에 도입된 B1C 신호를 통해서 방송된다. BDS-3 GEO 위성은 B1C 신호를 송신하지 않기 때문에 분석에서 제외되었다. Fig. 7은 BDSK 및 BDGIM의 계수에 따른 RMS 오차 그래프이다. BDSK 계수는 GEO, IGSO, MEO 순으로 우선순위가 권고되는데, 지자기 폭풍이 발생한 시점에서는 GEO 위성의 계수를 사용하는 경우 약 40% 이상 오차가 더 크게 발생하였다. BDGIM 모델은 위성에 따른 차이가 없거나 0.01 m 이하로 BDSK와 비교했을 때 방송 위성에 의한 영향이 크지 않았다.

5. CONCLUSIONS

한반도 및 인근지역에서 현재 운용중인 GPS, QZSS, BDS-2의 Klobuchar 전리층 모델과 BDS의 자체적인 모델인 BDGIM의 성능을 분석하였다. 전리층 모델로 계산한 지연값은 IGS GIM을 기준으로 정확도를 평가하였으며, 태양 및 지자기활동에 따른 영향을 확인하기 위하여 3개 기간을 선정하였다.

위경도에 따른 VTEC 분포는 GPSK 대비 다른 세 모델이 IGS GIM과 유사한 경향을 보였는데, 이는 QZSK와 BDSK가 아시아 지역에 최적화된 계수를 사용하기 때문이다. 또한 전세계를 대상으로 서비스를 하는 BDGIM도 중국 내부 관측 데이터를 주로 사용하기 때문에 GPSK와 비교하여 해당 지역의 특성을 더 잘 반영하는 것으로 판단된다. 1일 수직 전리층 지연 추정 결과, BDGIM은 최댓값이 Klobuchar 기반 모델들보다 2시간 더 빠른 시점에 발생하였다. 지자기위도에 따른 Klobuchar 모델의 성능을 비교한 결과 QZSK 모델은 사용 가능 구역의 경계인 저위도 부근에서 다른 모델과 비교하여 약 2배 이상 오차가 크게 발생하였다. 또한, 태양활동에 따른 모델의 오차를 분석한 결과 QZSK는 1.22 m의 큰 편차를 보이는 반면, GPSK와 BDSK 모델은 각각 0.15, 0.14 m의 작은 편차를 보였으며, BDGIM 모델은 0.10 m로 가장 안정적인 성능을 보였다. 그리고 BDS 위성(GEO, IGSO, MEO)별 전리층 보정 계수로 계산한 전리층 오차를 분석하였는데, BDSK 모델은 GEO 위성 계수의 성능이 가장 우수했지만 지자기폭풍 시점에서는 약 40% 이상 오차가 더 크게 발생하였다. 그리고 BDGIM 모델은 IGSO와 MEO 위성에서 계수를 방송하는데, 위성 종류에 무관하게 모델의 성능 차이는 0.01 m 이하로 유사한 성능을 보였다.

한반도에서 GPS 전리층 모델 및 계수를 적용하는 것보다 중국, 일본을 기반으로 한 모델들을 사용했을 때 대체로 우수한 성능을 보인 점을 고려하면, 2022년부터 개발에 착수한 KPS도 자체 전리층 모델이나 한반도 지역에 기반한 수정된 Klobuchar 보정 계수를 생성한다면 기존 모델인 GPS Klobuchar 모델보다 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구에서는 Line of sight에서의 경사 전리층 지연 추정이 수행되지 않았는데, 실제 관측값을 이용하여 각 모델의 경사 전리층 지연 추정 성능 분석이 향후 수행되어야 한다.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, S. Bak and S.C. Bu; methodology, S. Bak; software, S. Bak and B. Kim; validation, S. Bak and S.-K. Kim; formal analysis, S. Bak; investigation, S. Bak; resources, S. Bak and S.C. Bu; data curation, S. Bak and B. Kim; writing—original draft preparation, S. Bak; writing—review and editing, S.-K. Kim, S.C. Bu and C.S. Lee; visualization, S. Bak; Supervision, C.S. Lee.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

Cabinet Office 2021, Quasi-Zenith Satellite System Interface Specification Satellite Positioning, Navigation and Timing Service (IS-QZSS-PNT-004)

China Satellite Navigation Office 2017, BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document Open Service Signal B1C (Version 1.0)

China Satellite Navigation Office 2018, BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document Open Service Signal B3I (Version 1.0)

European Commission 2016, European GNSS (Galileo) Open Service Ionospheric Correction Algorithm for Galileo Single Frequency Users, Issue 1.2

Farah, A. 2020, Behavior of Broadcast Ionospheric-Delay Models from GPS, BeiDou, and Galileo Systems, Artificial Satellites, 55, 61-76. https://doi.org/10.2478/arsa-2020-0005

IGS 2018, RINEX the Receiver Independent Exchange Format, Version 3.0, IGS RINEX Working Group and RTCM-SC104

IGS, Atmospheric Parameters [Internet], cited 2023 Mar 27, available from: https://igs.org/products

Klobuchar, J. A. 1987, Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users, IEEE Transactions on aerospace and electronic systems, AES-23, 325-331. https://doi.org/10.1109/TAES.1987.310829

Liu, Z., Fang, R., Hu, Z., Zhang, Q., Liu, X., et al. 2022, A Revised BDS Klobuchar Model with a Non-Symmetrical Processing Strategy, SSRN. https://doi.org/10.2139/ssrn.4111614

Su, K., Jin, S., & Hoque, M. M. 2019, Evaluation of Ionospheric Delay Effects on Multi-GNSS Positioning Performance, Remote Sensing, 11, 171. https://doi.org/10.3390/rs11020171

Tian, Y., Li, S., Shen, H., Zhang, W., & Hao, W. 2022, Comparative analysis of BDGIM, NeQuick-G, and Klobu-char ionospheric broadcast models, Astrophysics and Space Science, 367. https://doi.org/10.1007/s10509-022-04109-7

Wang, N., Li, Z., Yuan, Y., & Huo, X. 2021, BeiDou Global Ionospheric delay correction Model (BDGIM): performance analysis during different levels of solar conditions, GPS Solutions, 25, 97. https://doi.org/10.1007/s10291-021-01125-y

Yang, C., Guo, J., Geng, T., Zhao, Q., Jiang, K., et al. 2020, Assessment and Comparison of Broadcast Ionospheric Models: NTCM-BC, BDGIM, and Klobuchar, Remote Sensing, 12, 1215. https://doi.org/10.3390/rs12071215

Yuan, Y., Wang, N., Li, Z., & Huo, X. 2019, The BeiDou global broadcast ionospheric delay correction model (BDGIM) and its preliminary performance evaluation results, Navigation, 66, 55-69. https://doi.org/10.1002/navi.292

Zhao, K., Yan, W., Yang, X., Yang, H., & Wei, P. 2020, BDGIM Performance evaluation based on iGMAS global tracking network, Advances in Space Research, 66, 2168-2178. https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.07.037

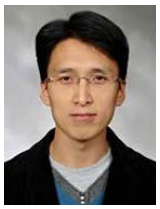
Zhang, Q., Zhao, Q. L., Zhang, H. P., Hu, Z. G., & Wu, Y. 2014, Evaluation on the Precision of Klobuchar Model for BeiDou Navigation Satellite System, Geomatics Inf. Sci. Wuhan Univ., 39, 142-146. https://doi.org/10.13203/j.whugis20120716

Serim Bak received a bachelor's degree in School of Aerospace and Mechanical Engineering from Korea Aerospace University in 2020, as well as a master's degree in 2022. She is currently working for LIG Nex1 as a research engineer. Her research interests include GNSS applications and navigation.

Beomsoo Kim received B.S and M.S degrees in School of Aerospace and Mechanical Engineering from Korea Aerospace University. He works in the KPS technology team of LIG Nex1. His current research focus on the orbit determination and GNSS applications.

Su-Kyung Kim received a Ph.D. in Geomatics at Oregon State University in 2021. Her research interests include GNSS positioning and navigation, GNSS Interferometric Reflectometry (GNSS-IR), ionospheric modeling and monitoring, as well as other geospatial related topics.

Sung Chun Bu is currently senior research engineer in LIG Nex1. He received B.S and M.S degrees in electronics engineering from Konkuk University, Korea in 2022 and 2004 respectively. He is interested in SBAS and GNSS receiver signal processing.



Chul Soo Lee is a principal research engineer in LIG Nex1. He worked as a senior researcher at Agency for Defense Development. He received the Ph.D. degree from Chungnam National University.