

QZSS TEC Estimation and Validation Over South Korea

Byung-Kyu Choi[†], Dong-Hyo Sohn, Junseok Hong, Woo Kyoung 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.

QZSS TEC Estimation and Validation Over South Korea

Byung-Kyu Choi[†], Dong-Hyo Sohn, Junseok Hong, Woo Kyoung Lee

Space Science Division, Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 34055, Korea

ABSTRACT

The ionosphere acts as the largest error source in the Global Navigation Satellite System (GNSS) signal transmission. Ionospheric total electron content (TEC) is also easily affected by changes in the space environment, such as solar activity and geomagnetic storms. In this study, we analyze changes in the regional ionosphere using the Quasi-Zenith Satellite System (QZSS), a regional satellite navigation system. Observations from 9 GNSS stations in South Korea are used for estimating the QZSS TEC. In addition, the performance of QZSS TEC is analyzed with observations from day of year (DOY) 199 to 206, 2023. To verify the performance of our results, we compare the estimated QZSS TEC and CODE Global Ionosphere Map (GIM) at the same location. Our results are in good agreement with the GIM product provided by the CODE over this period, with an averaged difference of approximately 0.1 TECU and a root mean square (RMS) value of 2.89 TECU.

Keywords: GNSS, TEC, QZSS, GIM

1. INTRODUCTION

전리층은 Global Navigation Satellite System (GNSS) 신호 전달과정에서 가장 큰 오차로 작용한다. 전리층 내의 자유전자들은 GNSS 신호의 지연(delay) 또는 앞섬(advance) 현상을 일으킨다. 또한 전리층내 총전자량(Total Electron Contents, TEC) 변화를 일으키는 주요 원인으로는 일일, 계절, 태양활동, 지자기 폭풍 등이 있다 (Davis & Hartmann 1997, Mannucci et al. 1999, Afraimovich et al. 2001, Otsuka et al. 2002). 그리고 전리층은 대류권 변화 및 지진활동 등 지구 활동에 의해서도 쉽게 영향을 받는다 (Calais & Minster 1998, Fu & Jin 2023).

GNSS는 전리층의 변화를 감시하는 도구로써 널리 사용되고 있다. GNSS 위성들은 이중주파수 신호를 송신하고, 지상에 설치된 GNSS 기준국은 이 신호들을 수신한다. 즉, 서로 다른 주파수를 갖는 신호는 전리층에 의해 굴절, 감쇄, 흡수, 반사 등 다른 영향을 받는다.

GPS 위성을 이용한 전리층 TEC 추정에 대한 많은 연구가 지

난 30년 이상 지속되어 왔다 (Hofmann-Wellenhof et al. 1993, Wilson & Mannucci 1993). 최근에는 러시아 GLObal NAVigation Satellite System (GLONASS), 중국 BeiDou, 그리고 유럽연합 Galileo 위성을 활용한 전리층 연구가 증가하는 추세이다 (Zakharenkova et al. 2016, Wang et al. 2022).

특히, 일본 준천정 위성시스템(Quasi-Zenith Satellite System, QZSS)은 지역 위성항법시스템으로 개발 단계에 있으며, 정지궤도(Geostationary Earth Orbit, GEO) 위성 1기와 지구경사동기궤도(Inclined Geosynchronous Orbit, IGSO) 3기 등 총 4기를 운영 중에 있다. QZSS는 아시아-오세아니아 지역을 대상으로 항법서비스를 하기 때문에 특정지역을 대상으로 전리층 연구 수행이 가능하다 (Heki 2022). 또한 정지궤도 위성은 지구자전과 동기되어 특정위치에서의 전리층 변화를 추정하고 감시하는데 매우 효과적이다. 따라서, 한반도 상공에서 전리층 TEC 변화특성을 보다 잘 이해하기 위해서는 QZSS 위성의 관측자료를 활용할 필요성이 있다.

본 연구에서는 한반도에서 수신된 QZSS 관측자료를 이용하여 전리층 TEC를 추정하고 변화특성을 분석한다. 또한 추정된 TEC 값의 검증을 위해 국제 GNSS 분석센터인 Center for Orbit Determination in Europe (CODE)에서 제공하는 Global Ionosphere Map (GIM)과 비교하여 분석한다.

2. DATA DESCRIPTION AND METHODOLOGY

Received Oct 10, 2023 Revised Nov 06, 2023 Accepted Nov 06, 2023

[†]Corresponding Author

E-mail: bkchoi@kasi.re.kr

Tel: +82-42-865-3237 Fax: +82-42-861-5610

Byung-Kyu Choi <https://orcid.org/0000-0003-2560-6714>

Dong-Hyo Sohn <https://orcid.org/0000-0001-9719-702X>

Junseok Hong <https://orcid.org/0000-0002-2347-7907>

Woo Kyoung Lee <https://orcid.org/0000-0001-5020-8684>

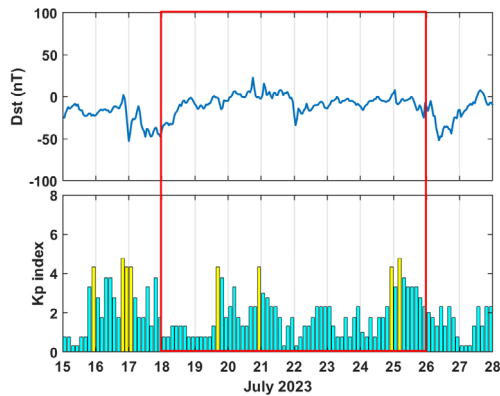


Fig. 1. The variations of geomagnetic activity indices Dst and Kp.

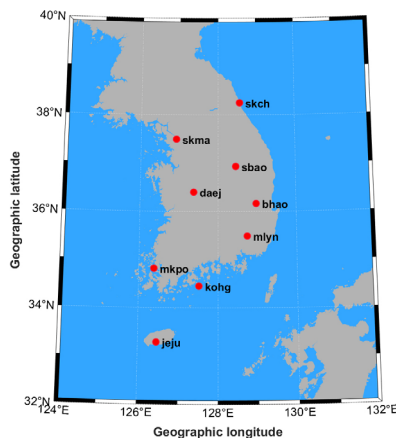


Fig. 2. The distribution of GNSS stations for QZSS TEC estimation. The red circles represent the location of GNSS sites.

QZSS 항법신호를 이용하여 전리층 TEC를 추정하기 위해 한반도에 있는 9개 GNSS 기준국에서 수신된 관측자료를 이용하였다. 관측자료 처리기간은 2023년 7월 18일부터 7월 25까지 8일간이다. 전리층 TEC는 지자기활동에 영향을 받기 때문에 먼저 지자기 활동 지수를 분석하였다. Fig. 1은 해당기간 동안 지자기 활동 정도를 나타내는 Dst와 Kp 지수의 변화를 보여주고 있다. Fig. 1에서 붉은색 사각형은 자료처리 기간을 의미하며, 이 기간 동안에는 Dst와 Kp 지수의 큰 변화가 관측되지 않았다.

Fig. 2는 전리층 TEC를 추정하기 위한 선정한 GNSS 기준국의 분포를 보여주고 있다. 선정된 9곳의 기준국들은 QZSS 위성신호를 수신할 수 있고, 또한 QZSS 관측자료를 제공하고 있다.

QZSS 위성은 GPS와 동일한 중심주파수 (f_1 :1575.42 MHz, f_2 :1227.60MHz)를 사용하고 있다. 본 연구에서는 QZSS 의사거리(pseudo-range) 신호인 C1X와 C2X, 그리고 반송파 신호(carrier phase)인 L1X와 L2X를 이용해서 전리층 TEC를 추정한다. QZSS TEC 값은 식 (1)과 (2)에 의해 계산된다.

$$P_4 \equiv C2X - C1X = I \left(\frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 \cdot f_2^2} \right) + d_r + d^s \quad (1)$$

$$L_4 \equiv L2X - L1X = I \left(\frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 \cdot f_2^2} \right) + (\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2) + d_r + d^s \quad (2)$$

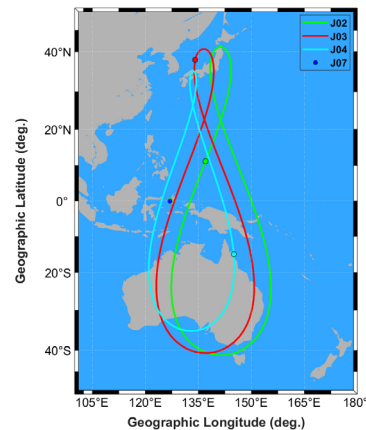


Fig. 3. The ground trajectories of QZSS satellites. The red, green, and cyan lines represent the sub-trajectories of QZSS IGSO satellites (J02, J03, and J04), respectively. The blue circle represents the ground trajectory of the QZSS GEO satellite (J07).

여기에서 C1X와 C2X는 QZSS 신호의 의사거리이고, L1X와 L2X는 반송파 위상을 의미한다. 그리고 λ_1 과 λ_2 는 각각 L1X와 L2X 신호 주파수의 파장이고, N_1 과 N_2 는 반송파의 모호정수이다. Geometry-free 조합(P_4 와 L_4)을 통해서 전리층 TEC 값이 계산이 되지만, C1X와 C2X 각각의 신호에는 하드웨어 바이어스가 존재하기 때문에 실제 정밀한 전리층 TEC 계산을 위해서는 이러한 바이어스를 관측으로부터 제거해야 한다 (Lanyi & Roth 1988, Mannucci et al. 1999). 두 신호간 차분(difference)에 의해 형성되는 하드웨어 바이어스를 우리는 통상 Differential Code Biases (DCB)라 부른다. DCB는 항법위성(d)과 지상의 수신기(d_r)로 구분할 수 있으며, TEC를 추정하는 단계에서 위성 DCB와 수신기 DCB는 수학적으로 분리할 수 없기 때문에 식 (3)과 같은 제약조건을 적용한다. 즉, 일일단위로 추정된 QZSS 위성 DCB 값의 합이 0값을 갖도록 설정한다.

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^s = 0 \quad (3)$$

본 연구에서는 위성과 수신기 DCB의 추정을 위해 가중 최소자승법(weighted least squares estimation)을 사용하였다 (Choi et al. 2013). GPS와 달리 QZSS 위성은 위성 수도 적고, 또한 한반도에서는 특정시간에 일부 위성의 신호를 수신할 수 없기 때문에 순차적인 위성 DCB 추정에 어려움이 있다. 따라서 하루동안 9곳에서 관측된 GNSS 자료를 일괄처리하여 위성 DCB와 수신기 DCB를 추정하였다.

3. IONOSPHERIC TEC ANALYSIS

3.1 QZSS Orbit & IPPs

QZSS는 지역 위성항법시스템으로 독립적인 항법서비스를 위해 총 7기의 위성으로 개발될 계획이다. 현재는 GEO 1기와 IGSO 3기 등 총 4기의 QZSS 위성이 운영 중에 있다. Fig. 3은 QZSS 위성의 지상궤적을 나타낸 것이다. IGSO 위성들의 지상궤적은 숫자 '8'의 형태를 띠고 있고, 알려진 중심경도(central longitude)는

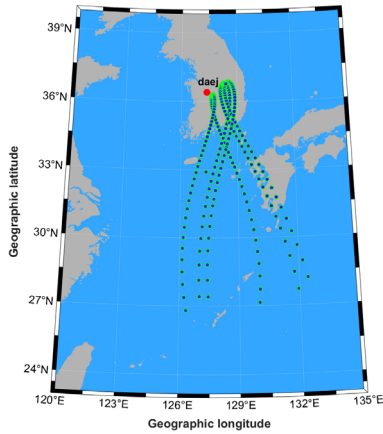


Fig. 4. IPP distributions of QZSS satellites. IPP is based on DAEJ station.

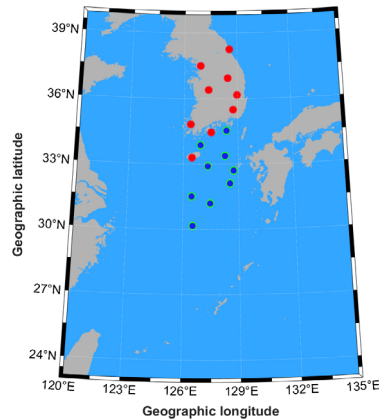


Fig. 5. Location of the GNSS reference stations and IPP distribution of the QZSS PRN 07 satellite. The blue circles represent the IPPs of the QZSS GEO satellite.

약 135°E 이다. 그리고 GEO는 지구적도에 위치하고 있으며, 위성의 경도는 약 127°E 이다.

Fig. 4는 한반도에 위치하고 있는 DAEJ 기준국을 기준으로 항법신호의 전리층 투과지점(Ionospheric Pierce Point, IPP)을 나타낸 것이다. IPP는 기준국 위치와 위성궤도에 따라 달라진다. 또한 전리층 전자가 밀집되어 있다고 가정한 고도에 따라 달라진다. 본 연구에서는 이 고도를 350 km라 가정하였다. Fig. 4에서 IPP는 QZSS 궤도특성과 매우 유사한 것을 알 수 있고, 다만 QZSS 위성이 호주 남쪽 측, 남반구 상공에 위치할 때에는 DAEJ 기준국에서 일시적으로 신호를 수신할 수 없기 때문에 IPP 계산이 의미가 없다. 또한, DAEJ 기준국의 경우 GEO 항법신호는 위도 약 33°N 을 통과하는 것을 알 수 있다. 특정기준국에서 GEO 항법신호에 대한 IPP는 바뀌지 않기 때문에 특정위치에서의 전리층 TEC 변화를 분석하는데 중요한 역할을 수행할 수 있다. 이처럼 IPP가 중요한 이유는 전리층 TEC 값이 이 지점을 기준으로 산출되기 때문이다.

Fig. 5는 Fig. 1에서 제시한 9곳의 GNSS 기준국의 위치와 각각의 기준국의 위치를 기준으로 GEO 위성(PRN 07번)의 IPP를 나타낸 것이다. 기준국의 위치와 IPP는 각각 붉은색 원과 파란색 원으로 표시되어 있다. IPP는 기준국의 위치보다 남쪽에 위치하고

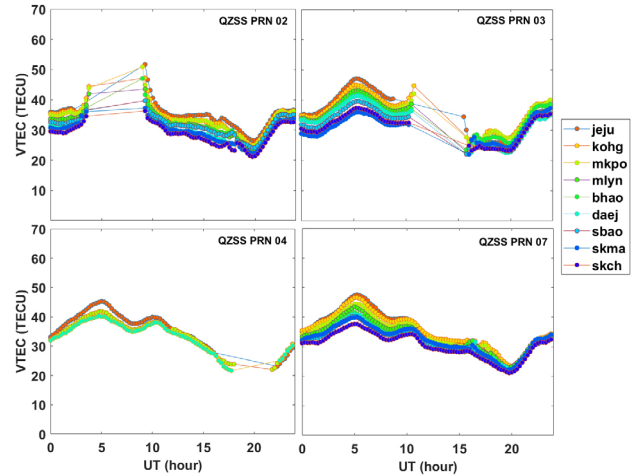


Fig. 6. Diurnal VTEC changes with QZSS satellites (PRN 02, PRN 03, PRN 04, and PRN 07).

있고, 지리적 위도 30°N 에서 35°N 사이에 분포하고 있다.

3.2 QZSS TEC Results

QZSS 위성은 일본 상공에서 오랫동안 머물면서 안정적인 Positioning, Navigation, and Timing 서비스를 제공한다. 특정 지역에서 장시간의 서비스는 전리층 TEC 변화를 분석하는데 매우 유용하다. 특히 GEO 위성의 경우에는 하나의 포인트 관측을 수행하기 때문에 전리층 TEC 변화에 대한 구체적인 정보를 제공할 수 없다. Fig. 6은 2023년 7월 18일에 9곳의 GNSS 기준국에서 수신된 QZSS 관측자료로부터 추정된 수직방향 TEC (VTEC, Vertical TEC) 변화를 보여준다. QZSS PRN 02번부터 04번은 IGSO 위성, 그리고 PRN 07번은 GEO 위성을 의미하며 각각 10분 간격으로 VTEC 값을 산출했다. 앞서 설명한대로 한반도에 위치하고 있는 GNSS 기준국에서는 특정시점에 QZSS IGSO 위성들에 대한 가시성이 확보되지 않아 항법신호를 수신할 수 없다. 따라서 Fig. 6에서 보이는 것처럼 IGSO 위성에 대한 TEC 값은 위성마다 평균 약 3시간에서 4시간정도 추정할 수 없다. 물론 추정할 수 없는 구간은 IGSO 위성과 기준국 별로 차이가 있을 수 있고, 또한 기준국 수신기에서 설정된 위성의 임계고각(cutoff-angle)에 따라 달라질 수 있다. 반면에 GEO 위성인 PRN 07번은 모든 기준국에서 24시간동안 끊임없이 TEC를 추정할 수 있었다.

QZSS 위성별 TEC 변화는 전반적으로 매우 유사한 특징을 보이고 있다. 낮 시간(약 UT 05~06)에 VTEC 값이 가장 높고, 반대로 새벽시간대인 UT 20시쯤에 가장 낮은 VTEC 값을 보인다.

QZSS PRN 04번 위성의 경우에는 일부 기준국에서만 관측자료를 확보할 수 있었는데, 이것은 수신기 옵션 적용의 차이인 것으로 확인이 되었다. 즉 수신기가 위성 Health 상태를 점검하고 관측을 수행할 것 인지, 아니면 위성 Health 상태를 무시하고 관측을 수행할 것 인지를 선택할 수 있다. 따라서 일부 수신기에서는 PRN 04번 위성이 Unhealth 상태임에도 불구하고, 이것을 무시하고 관측이 수행되었다.

Fig. 5에서 언급한 것처럼 기준국별로 GEO 위성에 대한 IPP

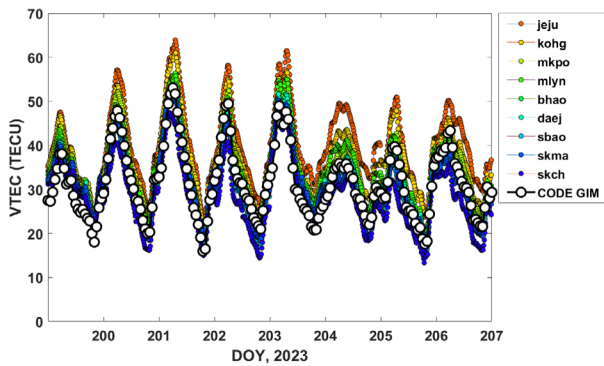


Fig. 7. Vertical TEC changes for the QZSS PRN 07 satellites at each reference station from DOY 199 to 206 in 2023. The white circles represent the CODE GIM TEC.

위치가 모두 상이하다. Fig. 6의 Legend에 표시한 기준국은 IPP를 위도별 순으로 나열한 것이다. 즉, JEJU는 IPP가 상대적으로 가장 남쪽에 위치하고, SKCH는 가장 북쪽에 위치한다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 IPP가 가장 남쪽에 위치한 JEJU의 경우에는 낮시간동안 가장 큰 TEC 값을 그리고 SKCH에서는 가장 작은 TEC 값을 보인다. 2곳의 기준국에서는 동일한 시간대에서 VTEC 값이 15 TECU ($1 \text{ TECU} \sim 10^{16}/\text{m}^2$) 이상의 차이가 발생하기도 한다.

QZSS PRN 07번 위성은 24시간동안 하나의 지점에 대해 연속 관측을 수행하기 때문에 한반도 주변 전리층 TEC 변화를 분석하고 감시하는데 중요한 역할을 할 수 있다.

3.3 Comparison with QZSS TEC and CODE GIM

전리층 TEC 변화를 분석하는 것도 중요하지만 산출된 TEC 값을 검증하는 것도 매우 중요하다. 본 연구에서는 직접 추정된 QZSS TEC 값을 CODE에서 제공하는 GIM 산출물과 비교하였다. CODE GIM은 전지구적으로 분포하고 있는 전리층 VTEC 정보를 포함하고 있으며, $2.5^\circ \times 5.0^\circ$ 의 격자를 갖는 공간해상도와 1시간 간격의 시간해상도를 갖는다.

Fig. 7은 기준국별로 QZSS PRN 07번 위성에 대한 VTEC 값을 시계열로 나타낸 것이다. 또한, DAEJ 기준국의 IPP 위치를 기준으로 산출한 CODE GIM TEC도 함께 표기하였다. 자료처리 기간은 2023년 day of year (DOY)로 199일부터 206일까지 8일간이다. Fig. 7에 보이는 것처럼 QZSS TEC와 CODE GIM의 변화특성이 매우 유사한 것을 알 수 있다.

QZSS TEC와 CODE GIM과 차이를 좀 더 구체적으로 살펴보기 위해서 DAEJ 기준국에서 추정된 QZSS PRN 07번의 VTEC 값과 DAEJ 기준국의 IPP 지점을 기준으로 산출한 CODE GIM TEC를 비교하였다. Fig. 8a는 QZSS TEC와 GIM TEC를 시계열로 함께 나타낸 것이다. 여기에서 QZSS TEC는 CODE GIM의 시간해상도에 맞추어 한시간 간격으로 재산출 하였다. Fig. 8a를 보면 QZSS TEC와 GIM TEC의 변화유형이 매우 유사한 것을 알 수 있다. 또한 QZSS TEC와 GIM TEC의 통계적인 차이를 Fig. 8b에 나타내었다. 해당기간동안 서로 다른 TEC 값의 차이는 최대 약 6 TECU를 보이고 있고, 8일동안 그 차이에 대한 평균값은 약

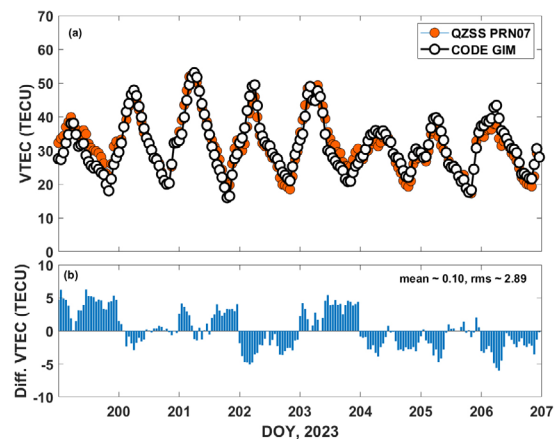


Fig. 8. (a) Comparison of CODE GIM TEC and QZSS PRN 07 TEC at 'DAEJ' station from DOY 199 to 206 in 2023. (b) The difference between two different TEC values as a histogram.

0.1 TECU, 그리고 차이에 대한 root mean square (RMS) 값은 약 2.89 TECU로 산출되었다.

결과적으로 본 연구에서 수행한 QZSS TEC 추정값이 GNSS 분석센터에서 제공하는 GIM TEC와 잘 일치했다.

4. CONCLUSIONS

본 연구에서는 한반도에 있는 9곳의 GNSS 기준국에서 수신한 QZSS 이중주파수 관측자료를 이용해서 전리층 TEC를 산출하였고, IGSO와 GEO 위성에 따른 TEC의 변화특성을 분석하였다. QZSS GEO와는 달리 IGSO는 위성궤도에 따라 IPP가 계속 바뀌기 때문에 일일 TEC 변화 유형이 서로 다른 것을 알 수 있었다. QZSS IGSO 위성들은 일부 시간대에서 최소 3시간에서 4시간 정도 관측이 불가능한 반면에 GEO 위성의 경우에는 한반도에서 연속적인 관측이 가능하였다. 기준국별로 IPP 위치는 서로 상이하고, GEO 위성의 IPP는 위도 30°N 에서 35°N 사이에 분포했다. 또한 남쪽에 위치한 IPP에서 낮시간동안 상대적으로 높은 VTEC 값을 보였으며, 가장 남쪽에 위치한 IPP와 가장 북쪽에 위치한 IPP에서 동시간대에 최대 15 TECU ($1 \text{ TECU} \sim 0.16 \text{ m}$) 이상의 차이가 있었다. 이것은 한반도의 위치에 따라서 매우 큰 TEC 차이가 발생할 수 있다는 것을 의미한다.

추정된 QZSS TEC의 검증을 위해 CODE 분석센터에서 제공하는 GIM TEC와 비교하였다. QZSS TEC 값과 CODE GIM 값의 차이에 대한 평균은 약 0.1 TECU이고 그 차이에 대한 RMS 값은 약 2.89 TECU로 산출되었다. 한반도 지역내의 제한된 기준국의 관측자료만으로 추정된 QZSS TEC 값이 CODE GIM과 매우 잘 일치하는 것을 확인했다.

결론적으로 QZSS GEO 위성신호는 특정지역의 전리층 TEC 변화를 연속적으로 관측하는데 매우 유용하며, 향후 타 항법시스템의 TEC 검증을 위한 기준값으로 충분히 활용이 가능하리라 판단한다.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by the Korea Astronomy and Space Science Institute under the R&D program (Project No. 2023-1-8-5008) supervised by the Ministry of Science and ICT.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Methodology, B.-K. Choi, W.K. Lee, and D.-H Sohn; software, B.-K. Choi; formal analysis, B.-K. Choi; investigation, J. Hong, and D.-H. Sohn.

CONFLICTS OF INTEREST

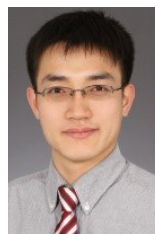
The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Afraimovich, E. L., Kosogorov, E. A., Lesyuta, O. S., & Ushakov, I. I. 2001, Geomagnetic control of the spectrum of traveling ionospheric disturbances based on data from a global GPS network, *Radiophysics and Quantum Electronics*, 44, 763-773. <https://doi.org/10.1023/A:1013760814426>
- Calais, E. & Minster, J. B. 1998, GPS, earthquakes, the ionosphere, and the space shuttle, *Phys. Earth Planet Inter*, 105, 167-181. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(97\)00089-7](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(97)00089-7)
- Choi, B.-K., Park, J.-U., Roh, K. M. & Lee, S.-J. 2013, Comparison of GPS receiver DCB estimation methods using a GPS network, *EPS*, 65, 707-711. <https://doi.org/10.5047/eps.2012.10.003>
- Davis, K. & Hartmann, G. K. 1997, Studying the ionosphere with the Global Positioning System, *Radio Sci.*, 32, 1695-1703. <https://doi.org/10.1029/97RS00451>
- Fu, J. & Jin, S. 2023, Characterization of ionospheric disturbances following multiple typhoons using GPS-derived TEC, *JGR: Space Physics*, 128, e2022JA030457. <https://doi.org/10.1029/2022JA030457>
- Heki, K. 2022 Ionospheric signatures of repeated passages of atmospheric waves by the 2022 Jan. 15 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption detected by QZSS-TEC observations in Japan, *EPS*, 74, 112. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01674-7>
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Collins, J. 1993, *Global Positioning System: Theory and Practice*, 2nd ed. (New York: Springer-Verlag)
- Lanyi, G. E. & Roth, T. 1988, A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using global positioning system and beacon satellite observations, *Radio Sci.*, 23, 483-292. <https://doi.org/10.1029/RS023i004p00483>
- Mannucci, A. J, Iijima, B., Sparks, L., Pi, X., Wilson, B., et al. 1999, Assessment of global TEC mapping using a three-dimensional electron density model, *J Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 61, 1227-1236. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(99\)00053-X](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(99)00053-X)
- Otsuka, Y., Ogawa, T., Saito, A., Tsugawa, T., Fukao, S. et al. 2002, A new technique for mapping of total electron content using GPS network in Japan, *Earth, Planets and Space*, 54, 63-70. <https://doi.org/10.1186/BF03352422>
- Wang, Y., Wang, H., Dang, Y., Ma, H., Xu, C. et al. 2022, BDS and Galileo: Global Ionosphere Modeling and the Comparison to GPS and GLONASS, *Remote Sens.*, 14, 5479. <https://doi.org/10.3390/rs14215479>
- Wilson, B. D. & Mannucci, A. J. 1993, Instrumental biases in ionospheric measurements derived from GPS data, in *ION GPS 1993* (Institute of Navigation), September 22-24, 1993, Salt Lake City, UT, pp.1343-1351. <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=4317>
- Zakharenkova, I, Astafyeva, E., & Cherniak, I. 2016, GPS and GLONASS observations of large-scale traveling ionospheric disturbances during the 2015 St. Patrick's Day storm, *JGR: Space Physics*, 121, 12138-12156. <https://doi.org/10.1002/2016JA023332>



Byung-Kyu Choi received his Ph.D. degree in Electronics in Chungnam National University in 2009. He has been working at the Korea Astronomy and Space Science Institute since 2004. His research interests include multi-GNSS PPP, PPP-RTK, and GNSS TEC & DCB analysis.



Dong-Hyo Sohn received the Ph.D. degree in Geoinformatic Engineering in Inha University in 2015. He is currently working for Space Science Division, Korea Astronomy and Space Science Institute. His research interests include crustal deformation, GNSS precipitable water vapor, and ionospheric variations.



Junseok Hong received his Ph.D. degree in Space Science and Geology in Chungnam National University in 2020. He has been working at the Korea Astronomy and Space Science Institute since 2017. His research interest includes GNSS TEC & DCB analysis and ionospheric phenomena.



Woo Kyoung Lee has been conducting research at the Korea Astronomy and Space Science Institute, with a focus on the monitoring and modeling of ionospheric irregularities that affect radio wave propagation. Her expertise lies in investigating the ionosphere, utilizing both ground and space-based observations, including GNSS measurements. Dr. Lee earned her Bachelor of Science (B.S.) and Master of Science (M.S.) degrees from Yonsei University and later completed her Doctorate in Astronomy and Space Science at the University of Science and Technology.