

GPS, Galileo, QZSS를 이용한 지역 전리층 모델링

최병규[†], 손동효, 홍준석, 정종균

Regional Ionosphere Modeling using GPS, Galileo, and QZSS

Byung-Kyu Choi[†], Dong-Hyo Sohn, Junseok Hong, Jong-Kyun Chung

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

ABSTRACT

The Global Navigation Satellite System (GNSS) has been used as a tool to accurately extract the Total Electron Content (TEC) in the ionosphere. The multi-GNSS (GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo, and QZSS) constellations bring new opportunities for ionospheric research. In this study, we develop a regional ionospheric TEC model using GPS, Galileo, and QZSS measurements. To develop an ionospheric model covering the Asia-Oceania region, we select 13 International GNSS Service (IGS) stations. The ionospheric model applies the spherical harmonic expansion method and has a spatial resolution of $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ and a temporal resolution of one hour. GPS TEC, Galileo TEC, and QZSS TEC are investigated from January 1 to January 31, 2024. Different TEC values are in good agreement with each other. In addition, we compare the QZSS(J07) TEC and the Center for Orbit Determination in Europe (CODE) Global Ionosphere Map (GIM) TEC. The results show that the QZSS TEC estimated in the study coincides closely with the CODE GIM TEC.

Keywords: GNSS, TEC, Galileo, QZSS

주요어: 전지구위성항법시스템, 전리층 총전자량, 갈릴레오, 준천정위성항법시스템

1. INTRODUCTION

전리층은 자유전자들이 밀집된 상층대기의 한 부분이다. 전리층 내의 자유전자들은 Global Navigation Satellite System (GNSS) 전파 신호의 지연(delay)과 앞섬(advance) 현상을 일으킨다. 또한 위성으로부터 지상의 수신기까지 신호 전달과정에서 가장 큰 오차로 작용한다 (Davies & Hartmann 1997, Mannucci et al. 1999, Afraimovich et al. 2001, Otsuka et al. 2002).

GNSS는 전리층을 연속적으로 관측하는 도구로써 널리 활용되고 있다. 일례로 국제 GNSS 서비스국(International GNSS Service, IGS)은 전지구적으로 고르게 분포하고 있는 기준국들의 관측자료를 이용해서 전리층 총전자량(Total Electron Content, TEC) 맵을 제공하고 있다. 또한 스위스 Center for Orbit Determination in Europe (CODE), 미국 Jet Propulsion Laboratory (JPL), 유럽 European Space Agency (ESA), 스페인

Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), 그리고 중국 Wuhan University (WHU) 등 GNSS 전리층 분석센터에서도 전리층 TEC 맵을 제공한다.

과거에 전리층 TEC 모델링은 Global Positioning System (GPS)에 국한되어 연구가 진행되어 왔다 (Hofmann-Wellenhof et al. 1993, Wilson & Mannucci 1993). 그러나, 최근에는 러시아 GLONASS, 중국 BeiDou, 유럽연합 Galileo, 일본 Quasi-Zenith Satellite System (QZSS), 그리고 인도 Navigation with Indian Constellation (NavIC) 등에서 제공하는 다양한 항법 신호를 이용해서 전리층 TEC를 폭 넓게 모델링하고 있다 (Tang et al. 2014, Zhang et al. 2015, Ren et al. 2016, Wang et al. 2022).

최신 GNSS 기준국 수신기들은 Multi-GNSS 신호를 수신할 수 있고, 특히 서로 다른 다양한 신호조합과 여러 경로의 GNSS 관측은 공간분포를 확장해서 전리층 TEC 모델링의 정확도를 향상시키는데 도움을 줄 수 있다 (Wang et al. 2022). Heki (2022)는 아

Received Mar 14, 2024 Revised Apr 05, 2024 Accepted Apr 20, 2024

[†]Corresponding Author E-mail: bkchoi@kasi.re.kr



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.

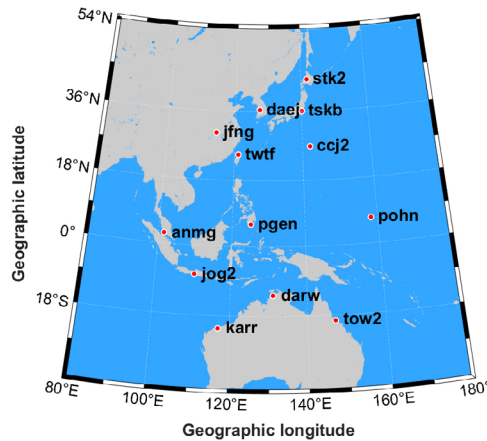


Fig. 1. The distribution of GNSS stations.

시아-오세아니아 지역에서 중국 BeiDou와 일본 QZSS가 지역항법을 위해 운영 중이기 때문에 지역 전리층 TEC 모델링에 매우 유용함을 보였다. 특히 정지궤도(Geostationary Earth Orbit) 위성은 지구자전과 동기되어 특정 위치에서의 전리층 TEC에 대한 연속적인 관측이 가능하기 때문에 효율적이다. 이처럼 한반도를 포함한 아시아-오세아니아 지역에서는 GPS뿐만 아니라 QZSS 등 다양한 신호를 활용한 전리층 TEC 모델링이 가능하다.

따라서, 본 연구에서는 아시아-오세아니아 지역에서 수신한 GPS, Galileo, 그리고 QZSS 관측자료를 이용하여 전리층 TEC를 모델링하고 그에 대한 변화특성을 분석한다. 또한 추정된 TEC 값을 IGS와 CODE에서 제공하는 Global Ionosphere Map (GIM) 산출물과 비교한 결과를 제시한다.

2. DATA DESCRIPTION

지역 전리층 TEC 모델링을 위해 아시아-오세아니아에 분포하고 있는 13곳의 GNSS 기준국을 선정하였다. Fig. 1은 선정된 GNSS 기준국들의 위치분포를 나타낸다. 전반적으로 TEC 모델링을 위해 해당 지역을 많이 커버할 수 있도록 분포를 고르게 하였다. 기준국들은 모두 Receiver Independent Exchange Format (RINEX) 형식 3.0 (버전 3.02, 3.04, 3.05) 이상 버전의 Multi-GNSS 관측자료를 일일단위로 제공하고 있다. GNSS 기준국 관측자료는 IGS 데이터 센터(<https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/data>)에서 다운로드 할 수 있다.

Table 1은 각각의 기준국에서 운영하고 있는 수신기와 안테나 타입을 정리한 것이다. 일부 기준국을 제외하고 대부분 Trimble 또는 Septentrio사 계열의 수신기를 사용하고 있으며, 안테나는 좀 더 다양한 타입을 사용하고 있다.

GNSS를 이용해서 전리층 TEC 모델링을 정밀하게 수행하기 위해서는 이중주파수 관측자료가 반드시 필요하다. 본 연구에서는 지역 전리층 TEC 모델링을 위해 GPS, Galileo, 그리고 QZSS 관측자료를 함께 이용하였다. Table 2는 본 연구에서 사용한 GPS, Galileo, 그리고 QZSS의 항법신호를 나열한 것이다. GPS는 모든 수신기에서 코드 의사거리 값인 C1C와 C2W값, 그

Table 1. GNSS station configurations.

Site name	Receiver type	Antenna type
daej	TRIMBLE NETR9	TRM59800.00 SCIS
stk2	TRIMBLE ALLOY	TRM59800.00 SCIS
tskb	TRIMBLE ALLOY	AOAD/M_T DOME
jfng	TRIMBLE ALLOY	TRM59800.00 NONE
twtf	SEPT POLARX4TR	ASH701945C_M SCIS
ccj2	TRIMBLE ALLOY	TRM59800.00 SCIS
anmg	TRIMBLE NETR9	JAVRINGANT_DM SCIS
pgen	LEICA GR50	LEIAR25 LEIT
pohn	SEPT POLARX5	JAVRINGANT_DM NONE
jog2	SEPT POLARX5	SEPCHOKE_B3E6 NONE
karr	SEPT POLARX5	TWIVC6050 NONE
darw	SEPT POLARX5	JAVRINGANT_DM NONE
tow2	SEPT POLARX5	LEIAR25.R3 NONE

Table 2. GNSS observation types.

GNSS	Observation types	Receivers
GPS	C1C, C2W, L1C, L2W	All
Galileo	C1X, C5X, L1X, L5X	Trimble series
	C1C, C5Q, L1C, L5Q	Septentrio series, Leica series
QZSS	C1C, C2X, L1C, L2X	Trimble series
	C1C, C2L, L1C, L2L	Septentrio series
	C1C, C2S, L1C, L2S	Leica series

리고 반송파 위상값인 L1C와 L2W 값을 동일하게 제공하고 있다. Galileo는 Septentrio와 Leica 계열 수신기가 동일한 관측타입(C1C, C5Q, L1C, L5Q)을 제공하고 있는 반면에 Trimble 계열 수신기는 C1X, C5X, L1X, 그리고 L5X 관측타입을 제공한다. 그리고 QZSS는 Table 2에 제시된 것처럼 L1신호를 제외하고 수신기 제조사 별로 이중주파수 관측타입이 서로 동일하지 않다. 따라서 본 연구에서는 전리층 TEC 모델링을 원활하게 하기 위해 비록 코드타입이 다르지만 QZSS C2L과 C2S 타입을 C2X 타입이라 가정하고 자료처리를 수행한다. 마찬가지로 반송파 위상자료인 L2L과 L2S 타입을 L2X 타입이라 가정한다.

3. METHODOLOGY

전리층 TEC를 추정하기 위해 GPS와 QZSS는 동일한 중심주파수($f_1 \sim 1575.42$ MHz, $f_2 \sim 1227.60$ MHz) 신호를 사용하였고, Galileo는 f_1 과 $f_2 \sim 1176.45$ MHz 신호를 사용하였다. 서로 다른 항법시스템의 관측자료를 이용해서 TEC를 계산하는 일반적인 방법은 식 (1), (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$STEC = \frac{1}{40.3} \left(\frac{f_1^2 - f_{2.5}^2}{f_1^2 - f_{2.5}^2} \right) (P_2 - P_1 + d^s + d_r) \quad (1)$$

여기에서, Slant TEC (STEC)는 시선방향 총전자량을 의미하고, P_1 과 P_2 는 GPS, Galileo, 그리고 QZSS 의사거리(pseudorange) 값이다. 실제로 P_1 과 P_2 는 앞서 Table 2에서 설명한 코드 관측타입을 위성군별로 적용했다. 그리고 d^s 와 d_r 는 각각 GNSS 위성군과 수신기의 하드웨어 바이어스인 differential code biases (DCB)이다. DCB는 TEC 추정에 사용된 신호조합과 위성군으로 나뉜다 (Lanyi & Roth 1988, Mannucci et al. 1998). DCB 추정은 전리층 TEC 모델링에 가장 큰 핵심이 되는 부분이며, 반드시 추정해서

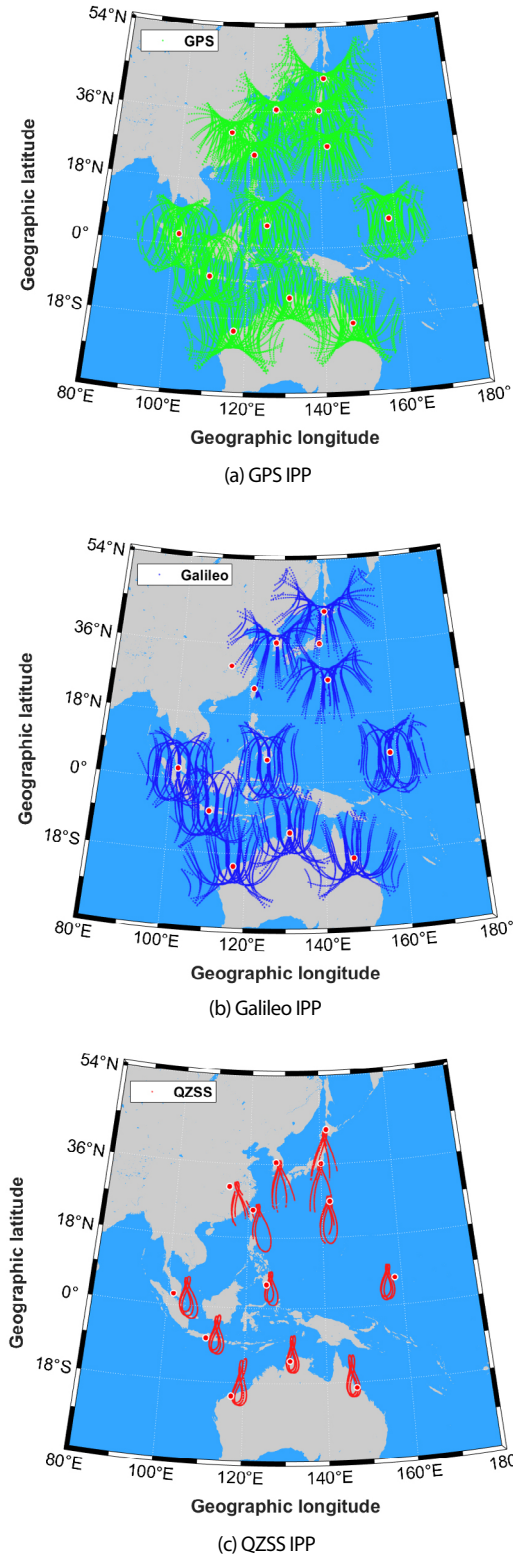


Fig. 2. IPP distributions of (a) GPS, (b) Galileo, and (c) QZSS on January 1, 2024. The figure is plotted by the M_Map software package.

TEC 계산에 적용해야 한다 (Choi et al. 2013). 또한 TEC를 추정하는 과정에서 위성 DCB와 수신기 DCB는 수학적인 분리가 어

렵기 때문에 식 (2)와 같은 제약조건을 사용한다. 즉, 위성군별로 위성 DCBs 값의 합(summation)이 '0'이 되도록 설정한다.

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{N_G} DCBs^{k,G} &= 0 \\ \sum_{k=1}^{N_E} DCBs^{k,E} &= 0 \\ \sum_{k=1}^{N_J} DCBs^{k,J} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

여기에서, N_G , N_E 그리고 N_J 는 각각 TEC 모델링 동안 사용된 GPS, Galileo, QZSS 위성 수를 의미한다. 뿔첨자인 G, E, J는 각각 GPS, Galileo, QZSS 위성을 의미한다.

식 (1)로부터 계산된 STEC는 식 (3)을 이용해서 수직방향 TEC (Vertical TEC, VTEC)으로 변환할 수 있다.

$$\begin{aligned} VTEC &= STEC/M \\ M &= \frac{R}{R+H} \sin(z) \end{aligned} \quad (3)$$

여기에서, M 은 전리층 사상함수(ionospheric mapping function)를 의미한다. R 은 지구의 반경 (6,371 km), H 는 전리층 고도 (350 km), 그리고 z 는 전리층 투과지점에서의 천정각이다.

본 연구에는 아시아-오세아니아 지역 전리층 TEC 모델링을 위해 식 (4)와 같이 구면조화확장 (spherical harmonic expansion) 기법을 사용하였다 (Zhang & Zhao 2018).

$$VTEC(\beta, s) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n \bar{P}_{nm}(\sin \beta) (\bar{C}_{nm} \cos(ms) + \bar{S}_{nm} \sin(ms)) \quad (4)$$

여기에서 $VTEC$ 는 수직방향 총전자량 값을 의미하며, β 와 s 는 각각 지구중심위도 (geocentric latitude)와 태양 고정 경도 (sun-fixed longitude)이다. N 은 구면조화함수의 최대 차수 (maximum degree)이며, $\bar{P}_{nm}$ 은 차수 n 과 계수 m 을 갖는 정규화된 연관 르장드르 함수 (normalized associated Legendre function)를 의미한다. 그리고 $\bar{C}_{nm}$ 과 $\bar{S}_{nm}$ 은 각각 구면조화함수의 사인(sine)과 코사인(cosine) 계수들(coefficients)이다.

4. TEC RESULTS AND ANALYSIS

4.1 IPP Distributions

전리층 TEC 모델링에서는 GNSS 신호의 전리층 투과지점인, Ionospheric Piercing Point (IPP)를 분석하는 것은 매우 중요하다. IPP 분석을 통해 관측이 가능한 부분과 그렇지 않은 부분을 파악하여 모델링 구역을 설정할 수 있다. Fig. 2는 TEC 모델링을 위해 선정한 기준국에서 GNSS 항법신호의 IPP 분포를 나타낸 것이다. Fig. 2a에서 붉은 점은 각 기준국의 위치를 의미하고, 녹색 점으로 표기된 것은 GPS의 일일 IPP 분포를 의미한다. IPP는 전리층 내 자유전자가 밀집되어 있다고 가정한 고도에 따라 달라지는

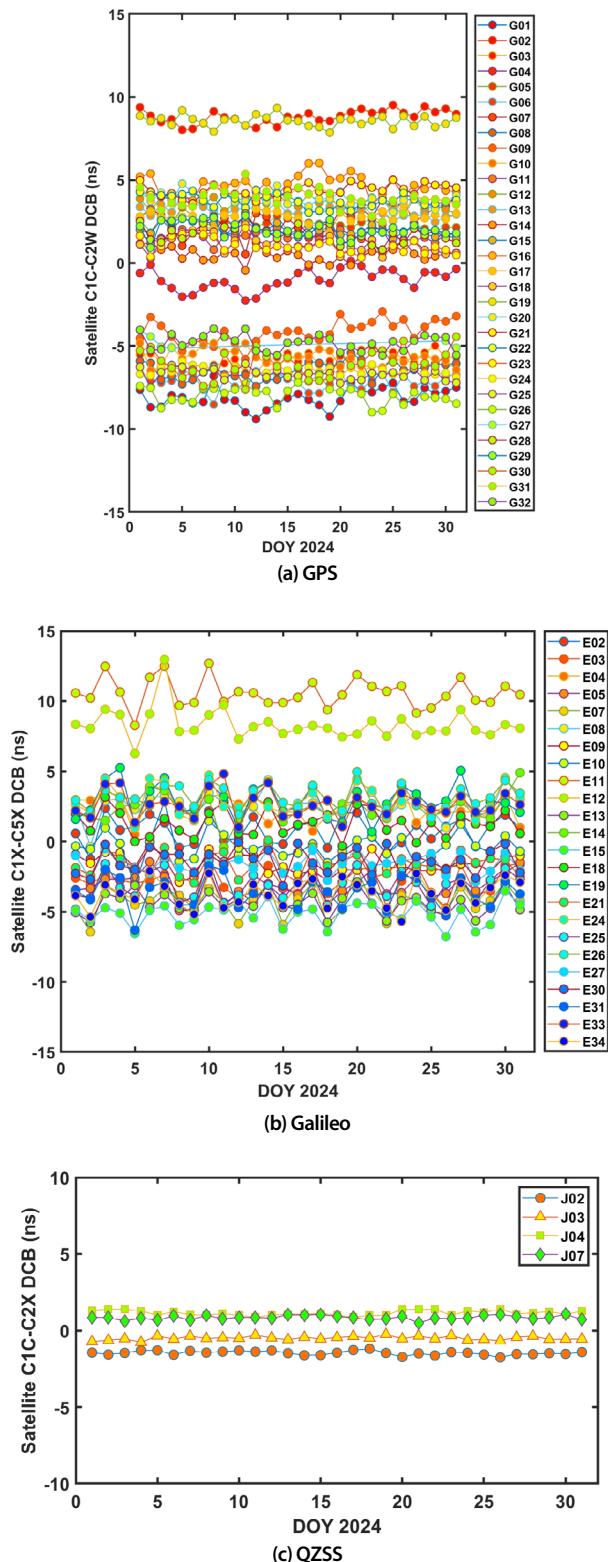


Fig. 3. Time series for GNSS satellite DCB from January 1 to 31, 2024: (a) GPS C1C-C2W DCB, (b) Galileo C1X-C5X DCB, (c) QZSS C1C-C2X DCB.

데 본 연구에서는 이 고도를 350 km로 가정하였다 (Goodwin & Perry 2022). Fig. 2b는 Galileo IPP 분포를 나타내고 있고, 이 분

포는 GPS와 매우 유사한 특징을 보이고 있다. 이것은 IPP가 항법 위성의 궤도특성과 관련이 있기 때문이다. Fig. 2c는 QZSS IPP를 나타낸 것이고, QZSS는 현재 4기의 위성이 운영 중이며, 지역 위성항법시스템이기 때문에 IPP 분포가 GPS와 Galileo에 비해 다소 협소한 것을 알 수 있다. 또한 Choi et al. (2023)은 QZSS IPP의 구체적인 특징을 분석한 바 있다.

4.2 DCB and TEC Results

DCB는 전리층 TEC를 추정하는데 가장 큰 오차로 작용하기 때문에 반드시 계산하여 TEC 추정치에 적용해야 한다. DCB는 위성과 수신기에 각각 존재하는 하드웨어 바이어스이다. 일반적으로 지역 전리층 TEC 모델링에는 한정된 공간의 기준국 관측자료를 사용하기 때문에 위성 DCB 값이 부정확할 수 있다. 따라서, CODE 및 JPL과 같은 GNSS 분석센터(analysis center)에서 제공하는 후처리 위성 DCB 값을 사용하는 경우가 많다. 이러한 경우에 수신기 DCB만을 추정변수로 고려하면 되기 때문에 알고리즘 구성이 단순해진다. 반면에 위성 DCB를 직접 추정하는 경우에는 위성과 수신기 DCB 추정을 모두 고려해야 하고, DCB 분리를 위한 제약조건 설정 등 다소 알고리즘 구성이 복잡해진다. 본 연구에서는 후자의 방법을 고려해서 GPS, Galileo, 그리고 QZSS 위성 DCB 값을 동시에 일일단위로 직접 추정하였고, 지역 전리층 TEC를 모델링하는데 사용하였다.

Fig. 3은 추정된 위성 DCB 값을 시계열로 나타낸 것이다. 자료처리 기간은 2024년 1월 1일부터 1월 31일까지 총 31일이고, 위성 DCB 값은 일일단위로 계산했다. Fig. 3a는 GPS 위성의 C1C-C2W DCB 값을 보여주고 있다. GPS 위성 C1C-C2W DCB 값들은 -10~10 nanoseconds (ns) 이내에 분포하는 것을 알 수 있고, 일일단위로 약간의 변동성을 보이고 있다.

지역 전리층 TEC 모델링에서 위성 DCB 추정에 영향을 주는 여러 요소들이 있다. 첫번째는 일부 항법위성의 관측수 부족으로 인해 전체 위성의 DCB 값이 영향을 받을 수 있다. 즉, 위성 DCB 값의 합이 '0'이 되는 제약조건으로 일부 위성의 DCB가 부정확한 것은 위성군 전체 DCB에 영향을 줄 수 있다는 것이다.

두번째는 특정날짜에 일부 기준국의 RINEX 관측자료가 존재하지 않는 경우에 위성 DCB 추정에 영향이 있다. 관측정보가 없으면 TEC 모델링에 영향을 받고, 결국 DCB 추정 정확도가 낮아지는 결과를 초래할 수 있다.

Fig. 3b는 Galileo 위성의 C1X-C5X DCB 값을 보여주고 있고, 이 DCB 값들은 대부분 -7~6 ns에 분포를 한다. 그러나, 일부 위성 DCB 값들은 약 13 ns까지 도달하기도 한다. Fig. 3c는 QZSS 위성 C1C-C2X DCB 값의 시계열을 나타낸 것이다. QZSS 위성 DCB 값은 -1.5~1.5 ns 이내에서 변하는 것을 알 수 있고, GPS와 Galileo에 비해 일일 변화량이 작고, 안정적으로 산출되는 것으로 나타났다. QZSS 위성 DCB 값의 산출결과가 GPS와 Galileo에 비해 상대적으로 안정적인 것은 지역 항법시스템으로 모든 기준국에서 모든 위성에 대해 안정적인 관측자료 수집이 가능했기 때문으로 분석된다.

Fig. 4는 2024년 1월 1일부터 1월 31일까지 GPS, Galileo, 그리고 QZSS를 사용해서 계산된 VTEC 값의 시계열을 나타낸 것이

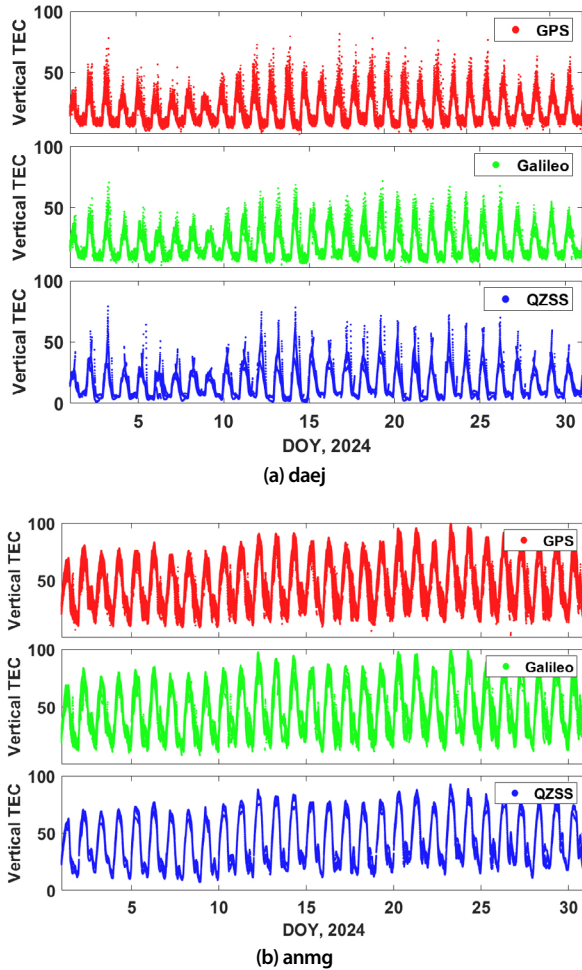


Fig. 4. Time series for GPS, Galileo, and QZSS VTEC (TECU) from January 1 to 31, 2024: (a) daej, (b) anmg.

다. GPS와 QZSS 관측자료는 모든 기준국에서 제공이 된 반면에, Fig. 2b에서 볼 수 있듯이 Galileo 관측자료는 일부 기준국에서 제공되지 않았다. GPS, Galileo, 그리고 QZSS 관측자료를 동시에 활용해서 전리층 TEC 모델링 방법으로 먼저 위성과 수신기 DCB 값을 계산하였고, 이 DCB 값을 기준국별 TEC 계산에 적용하였다. Fig. 4는 daej와 anmg 기준국의 VTEC 시계열을 보여주고 있다. Fig. 4에서 붉은 색 점선과 녹색 점선으로 표기된 것은 각각 GPS TEC와 Galileo TEC 값이다. GPS TEC와 Galileo TEC의 변화는 서로 매우 유사한 것을 알 수 있다. 그리고 파란색 점선으로 표기된 것은 QZSS TEC 변화이다. QZSS 7번 위성은 정지궤도 위성으로 daej 기준국에서는 24시간 관측이 가능하다. 따라서 QZSS는 특정 위도와 경도의 IPP에서 TEC의 연속적인 관측을 수행할 수 있기 때문에 전리층 TEC 비교·분석에 매우 유용하다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 QZSS TEC 변화는 GPS와 Galileo TEC 변화와 유사한 것을 알 수 있다. Fig. 4b는 적도 지역에 위치하고 있는 anmg 기준국의 TEC 변화를 나타낸 것이다. 일일 VTEC 값의 변화가 Fig. 4a의 daej 기준국 보다 큰 것을 알 수 있다. 또한 daej 기준국과 마찬가지로 GPS TEC, Galileo TEC, 그리고 QZSS TEC의 변화가 매우 유사했다.

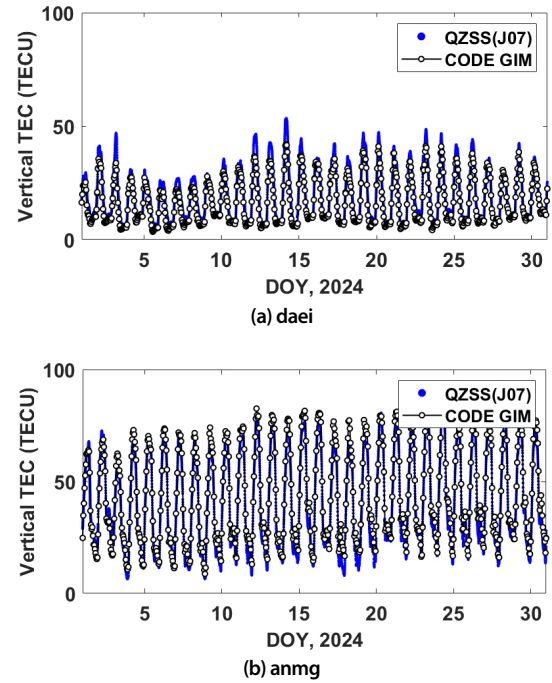


Fig. 5. Time series for QZSS(J07) VTEC and CODE GIM TEC from January 1 to 31, 2024: (a) daej, (b) anmg.

본 연구에 의해 추정된 TEC 값의 정확도를 조사하기 위해 스위스 CODE에서 제공하는 GIM 산출물의 TEC 값과 비교하였다. 앞서 제시하였듯이 QZSS 정지궤도 위성의 TEC는 비교·검증하기에 유용하다. Fig. 5는 Fig. 4에서 제시한 QZSS(J07) TEC와 CODE GIM TEC를 함께 표기했다. Figs. 5a와 5b는 각각 daej와 anmg 기준국에서의 QZSS TEC와 GIM TEC를 시계열로 함께 나타낸 것이다. QZSS TEC 값은 매 5분 간격으로 산출된 값이고, CODE GIM TEC 값은 한 시간 간격의 시간해상도를 갖고 있다. daej와 anmg 기준국은 해당기간 동안 QZSS(J07) TEC와 GIM TEC 차이에 대한 root mean square (RMS) 값이 각각 2.86과 3.59 TEC Unit ($\text{TECU} \sim 10^{16} \text{ electrons/m}^2$)이다. anmg 기준국의 RMS 값이 daej 기준국의 값과 비교하여 상대적으로 높게 산출되었다. 이것은 지역 전리층 모델링에서 중위도에 위치한 daej 보다는 적도지역에 위치한 anmg에서 TEC 추정오차가 상대적으로 큰 것을 의미할 수 있다. 그러나, 본 연구에서 추정한 TEC 값은 GIM TEC와 거의 일치했고, 이러한 결과로부터 우리는 추정된 DCB와 TEC 값이 정확하게 계산되는 것을 재차 확인할 수 있다.

지역 전리층 TEC 모델링을 위해 구면조화확장 기법을 사용하였고, 구면조화 계수추정을 위해 차수는 최대 8차를 고려하였다. TEC 모델링 지역은 위도와 경도 각각 30°S – 40°N 와 100°E – 160°E 로 설정하였고, 격자해상도는 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 이다. 그리고, 1시간격의 시간해상도를 갖는 지역 전리층 맵(Regional Ionosphere Map, RIM)이 생성된다.

Fig. 6은 2024년 1월 3일 구면조화확장 기법을 적용해 생성된 RIM을 나타낸다. 본 연구에서 RIM은 1시간마다 생성되지만, 4시간 간격의 RIM을 선별하여 제시했다.

Figs. 6b와 6c는 낮시간대인 UT 4시와 UT 8시에 생성된 RIM

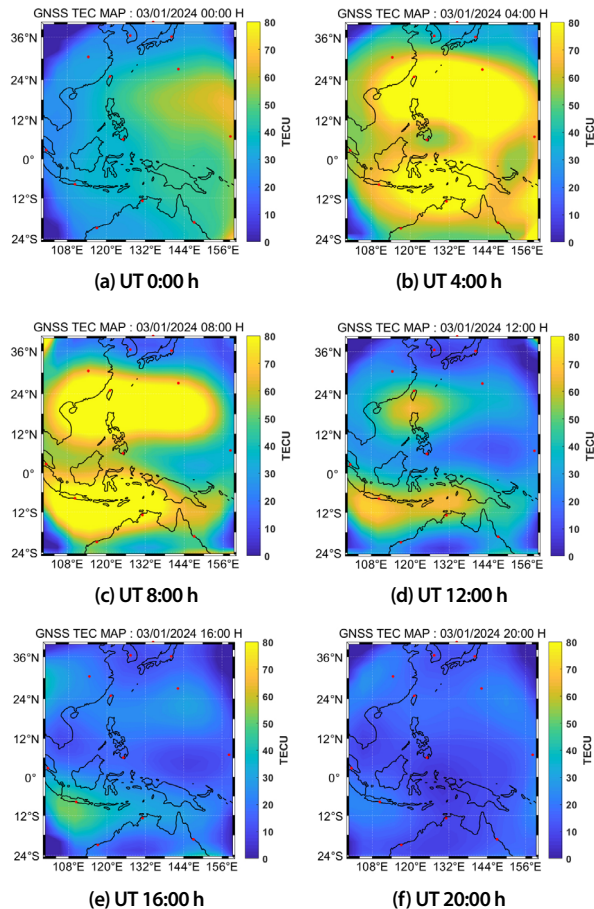


Fig. 6. Regional Ionosphere Maps produced by the GPS, Galileo, and QZSS measurements on January 3, 2024. The red dots represent the GNSS stations, which are listed in Table 1.

이며 상대적으로 높은 TEC 값을 보이고 있고, 그리고 Figs. 6e와 6f는 밤시간대인 UT 16시와 UT 20시의 RIM이며 전체적으로 낮은 TEC 값을 보이고 있다. 주목할 만한 것은 Figs. 6c와 6d에서 볼 수 있듯이 주로 낮에 발생하는 적도 전리층 이상현상(Equatorial Ionospheric Anomaly, EIA)이 관측되었다는 것이다. EIA는 전리층 내 자유전자 밀도가 지구 적도를 기준으로 대칭적으로 높게 나타나는 현상이다. 이것은 남북 방향의 지구 자기장(B)과 동서방향의 전기장(E)에 의한 $E \times B$ drift에 의해 발생되는데, 결국에는 전리층 내 자유전자 밀도가 높은 두 개의 지역을 형성한다. 따라서 Figs. 6c와 6d의 RIM 자료에서는 TEC 값이 높은 두 개의 지역이 뚜렷하게 나타났다.

본 연구에서는 GPS, Galileo, 그리고 QZSS 관측자료를 이용한 전리층 TEC 모델링을 수행하여 TEC의 정확도를 비교·분석하였고, 특히 EIA와 같은 전리층 현상도 관측할 수 있었다.

5. CONCLUSIONS

본 연구에서는 아시아-오세아니아 지역의 GNSS 전리층 TEC 모델링을 수행하였다. TEC 모델링을 위해 먼저 고르게 분포하

고 있는 13곳의 IGS 기준국을 선정하였고, 각 기준국에서 수신한 GPS, Galileo, 그리고 QZSS 관측자료를 동시에 처리하였다. 또한 TEC 모델링 및 DCB 추정에는 구면조화확장 기법을 사용하였다. 2024년 1월 1일부터 1월 31일까지 수집된 GNSS 관측자료를 처리하여 GPS 위성 C1C-C2W DCB, Galileo 위성 C1X-C5X DCB, 그리고 QZSS 위성 C1C-C2X DCB가 안정적으로 추정되는 것을 확인하였다. 또한, 위성군 별로 VTEC에 대한 시계열 자료를 산출하였고, GPS, Galileo, 그리고 QZSS TEC 값의 시계열 변화가 매우 유사한 것을 알 수 있었다. TEC 값의 정확도를 분석하기 위해 QZSS(J07) TEC와 CODE GIM TEC를 비교하였고, 약 2~3 TECU RMS 내에서 일치하는 결과를 얻었다.

본 연구에서 우리는 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 의 위·경도 격자해상도와 1시간 간격의 시간해상도를 갖는 RIM을 생성했다. 또한 RIM을 통해 주로 낮에 발생하는 EIA 현상을 관측할 수 있었다.

ACKNOWLEDGMENTS

This study was supported by the Korea Astronomy and Space Science Institute under the R&D program (Project No. 2024-1-9-0201) supervised by the Ministry of Science and ICT.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

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

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

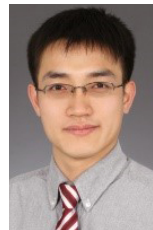
REFERENCES

- 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>
- 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>
- Choi, B.-K., Sohn, D.-H., Hong, J., & Lee, W. K. 2023, QZSS TEC Estimation and Validation Over South

- Korea, JPNT, 12, 343-348. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2023.12.4.343>
- Davies, K. & Hartmann, G. K. 1997, Studying the ionosphere with the Global Positioning System, *Radio Sci.*, 32, 1695-1703. <https://doi.org/10.1029/97RS00451>
- 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>
- Goodwin, L. V. & Perry, G. W. 2022, Resolving the High-Latitude Ionospheric Irregularity Spectra Using Multi-Point Incoherent Scatter Radar Measurements, *Radio Science*, 57, e2022RS007475. <https://doi.org/10.1029/2022RS007475>
- 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, 483-492. <https://doi.org/10.1029/RS023i004p00483>
- Mannucci, A. J., Iijima, B., Sparks, L., Pi, X., Wilson, B. D., 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)
- Mannucci, A. J., Wilson, B. D., Yuan, D. N., Ho, C. H., Lindqwister, U. J., et al. 1998, A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements, *Radio Science*, 33, 565-582. <https://doi.org/10.1029/97RS02707>
- 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 Space*, 54, 63-70. <https://doi.org/10.1186/BF03352422>
- Ren, X., Zhang, X., Xie, W., Zhang, K., Yuan, Y., et al. 2016, Global Ionospheric Modelling using Multi-GNSS: BeiDou, Galileo, GLONASS and GPS, *Scientific Reports*, 6, 33499. <https://doi.org/10.1038/srep33499>
- Tang, W., Jin, L., & Xu, K. 2014, Performance analysis of ionosphere monitoring with BeiDou CORS observational data, *J. Navigation*, 67, 511-522. <https://doi.org/10.1017/S0373463313000854>
- 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), Salt Lake City, UT, September 22-24, 1993, pp.1343-1351. <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=4317>
- Zhang, Q. & Zhao, Q. 2018, Global Ionosphere Mapping and Differential Code Bias Estimation during Low and High Solar Activity Periods with GIMAS Software, *Remote sensing*, 10, 705. <https://doi.org/10.3390/rs10050705>
- Zhang, R., Song, W., Yao, Y., Shi, C., Lou, Y., et al. 2015, Modeling regional ionospheric delay with ground-based BeiDou and GPS observations in China, *GPS Solution*, 19, 649-658. <https://doi.org/10.1007/s10291-014-0419-z>



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 modeling.



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 interests include GNSS TEC & DCB analysis and ionospheric phenomena.



Jong-Kyun Chung received his Ph.D. degree in Space Science in Chungnam National University in 2005. He has been working at the Korea Astronomy and Space Science Institute since 2006. His research interests include GNSS TEC & scintillation on space weather and natural hazard.

