

Development of Korean VTEC Polynomial Model Using GIM

Jae-Young Park¹, Yeong-Guk Kim², Kwan-Dong Park^{1,2†}

¹Department of Geoinformatic Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

²PP-Solution Inc., Seoul 08504, Korea

ABSTRACT

The models used for ionosphere error correction in positioning using Global Navigation Satellite System (GNSS) are representatively Klobuchar model and NeQuick model. Although these models can correct the ionosphere error in real time, the disadvantage is that the accuracy is only 50-60%. In this study, a method for polynomial modeling of Global Ionosphere Map (GIM) which provides Vertical Total Electron Content (VTEC) in grid type was studied. In consideration of Ionosphere Pierce Points (IPP) of satellites with a receivable elevation angle of 15 degrees or higher on the Korean Peninsula, the target area for model generation and provision was selected, and the VTEC at 88 GIM grid points was modeled as a polynomial. The developed VTEC polynomial model shows a data reduction rate of 72.7% compared to GIM regardless of the number of visible satellites, and a data reduction rate of more than 90% compared to the Slant Total Electron Content (STEC) polynomial model when there are more than 10 visible satellites. This VTEC polynomial model has a maximum absolute error of 2.4 Total Electron Content Unit (TECU) and a maximum relative error of 9.9% with the actual GIM. Therefore, it is expected that the amount of data can be drastically reduced by providing the predicted GIM or real-time grid type VTEC model as the parameters of the polynomial model.

Keywords: GNSS, ionosphere, GIM

1. INTRODUCTION

위성항법시스템 (GNSS, Global Navigation Satellite System) 을 이용한 측위오차 요인 중 이온층에 의한 신호지연은 다른 오차 요인들에 비해 상대적으로 크게 발생한다. 이온층 오차는 이온층의 자유 전자들에 의한 전파 경로의 굴절 때문에 발생하며, 이온층에 의한 오차는 수 cm에서 수십 m에 이른다 (Hofmann-Wellenhof et al. 2007). 따라서, 높은 측위정확도 확보를 위해 이온층 오차를 반드시 보정해야 된다.

이중주파수를 사용하는 수신기의 경우 주파수간 무전리층 조합을 통해 이온층 오차를 제거할 수 있지만, 저가의 단일주파수 수신기의 경우에는 사용하는 이온층 모델의 정확도가 중요하다.

이온층 모델의 대표적인 예로는 GPS에 사용되는 Klobuchar 모델, Galileo에 사용되는 NeQuick 모델 등이 있다. Klobuchar 모델의 경우 8개의 파라미터, NeQuick 모델의 경우 3개의 파라미터가 항법메시지에 실려 방송되어 하루 단위로 전지구의 전리층 오차를 계산할 수 있는 모델로 실시간으로 보정이 가능하다는 장점이 있지만, 정확도가 50~60%에 불과하다는 단점이 있다 (Setti Junior et al. 2019).

Global Ionosphere Map (GIM)은 IGS Network에 속한 7개의 Ionosphere Associated Analysis Centers (IAACs)에서 이중주파수 GNSS 데이터를 기반으로 상공 450 km에 자유전자가 밀집되어 있다는 가정으로 만드는 전지구 이온층 지도이다. GIM은 IONosphere Exchange format (IONEX) 형식으로 전 지구를 위경도 2.5°×5°의 격자형 Vertical Total Electron Content (VTEC)를 제공한다. 사용자는 수신기로부터 위성까지의 벡터를 통해 450 km 상공에 관측 위성의 이온층 관통점 (IPP, Ionosphere Pierce Point)을 구하고 (Misra & Enge 2011), 주변 4개의 GIM 격자점 VTEC를 보간하여 IPP에서의 VTEC를 구한다 (Schaer et al. 2015). 그리고 간단한 사상합수를 통해 Slant Total Electron Content (STEC)으로 변환하여 이온층 지연량을 계산하게 된다

Received Aug 24, 2022 Revised Oct 28, 2022 Accepted Nov 06, 2022

†Corresponding Author

E-mail: kdpark@inha.ac.kr

Tel: +82-32-873-4310

Jae-Young Park <https://orcid.org/0000-0002-6963-7224>

Yeong-Guk Kim <https://orcid.org/0000-0003-4770-813X>

Kwan-Dong Park <https://orcid.org/0000-0003-1538-8768>

(Misra & Enge 2011). GIM은 이중주파수 GNSS 데이터를 기반으로 만들어 높은 정확도를 가지지만, 전 지구 격자형 데이터로 용량이 크다는 단점이 있다. GIM의 종류에는 생성되는데 1일 미만인 신속 GIM, 약 2주가 소요되는 최종 GIM, 1~2일 전에 생성되는 예측 GIM이 있다. 최종 GIM과 신속 GIM은 실시간 적용이 불가능하지만, 예측 GIM은 실시간 적용이 가능하다. 2022년 7월 기준으로 National Aeronautics and Space Administration (NASA)의 Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS)는 Center for Orbit Determination in Europe (CODE)에서 생성한 예측 GIM인 clpg, c2pg를 제공하고 있다.

이 연구에서는 격자형 VTEC을 제공하는 GIM을 다항식 모델의 계수 형태로 제공하는 방안에 대해 알아보았다. 다항식 모델은 GIM을 계수 형태로 제공함으로써 GIM의 데이터 크기 문제를 보완할 수 있다는 장점이 있다. 개발한 모델은 한반도에서 수신 가능한 고도각 15도 이상인 위성의 IPP 구역을 대상으로 하며, 절대 및 상대 오차의 공간 분석, 오차의 시계열 분석을 통해 검증하였다.

2. MATERIAL AND METHOD

GIM은 산출하는 기관과 Product에 따라 전지구를 대상으로 1~2시간 간격의 위경도 $2.5^\circ \times 5^\circ$ 격자형 VTEC을 제공한다. 본 연구에서는 IGS 최종 GIM을 사용하여 Least Square Estimation (LSE)을 통해 다항식 모델화 하는 방안에 대해 연구하였다. 본 연구에서 사용된 IGS 최종 GIM은 CODE, European Space Agency (ESA), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Jet Propulsion Laboratory (JPL)에서 만든 최종 산출물의 weighed mean으로 만들어진 (Villiger & Dach 2017). 2009년부터 2018년까지 북반구 중위도($30^\circ \sim 60^\circ$)에서 Jason2의 관측 VTEC과 비교하였을 때 CODE는 1.17 ± 2.83 , ESA는 1.37 ± 2.42 , UPC는 0.25 ± 2.22 , JPL은 -1.23 ± 2.31 Total Electron Content Unit (TECU) 차이를 보인다 (Chen et al. 2020).

2.1 SSR의 STEC 이온층 다항식 모델

Space State Representation (SSR) 중 Secure Position Augmentation for Real-Time Navigation (SPARTN)의 High Precision Atmosphere Correction (HPAC)과 Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) Centimeter Level Augmentation Service (CLAS)의 Compact SSR은 다항식 형태의 이온층 모델을 사용한다. 이 두 이온층 모델은 SSR 메시지에 따라 다른 시간간격으로 제공되며, Compact SSR의 경우 30초 간격으로 파라미터를 제공하여 실시간으로 이온층 오차 보정이 가능하다. SPARTN의 HPAC ionosphere model 2 (U-blox AG 2021), QZSS CLAS의 Compact SSR ionosphere correction type 3 (IS-QZSS-L6-004 2021)에서 사용하는 이온층 오차 보정모델은 Eqs. (1), (2)와 같다.

$$HPAC\ STEC_k^{PRN} = C_{00,k}^{PRN} + C_{01,k}^{PRN}(\phi_0 - \phi) + C_{10,k}^{PRN}(\lambda_0 - \lambda) + C_{11,k}^{PRN}(\phi_0 - \phi)(\lambda_0 - \lambda) \quad (1)$$

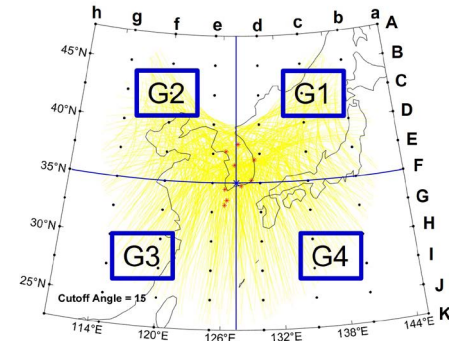


Fig. 1. Target area on the Korean peninsula.

Table 1. Network latitude and longitude.

	G1	G2	G3	G4
Latitude	$35^\circ \sim 47.5^\circ$	$35^\circ \sim 47.5^\circ$	$22.5^\circ \sim 35^\circ$	$22.5^\circ \sim 35^\circ$
Longitude	$127.5^\circ \sim 145^\circ$	$110^\circ \sim 127.5^\circ$	$110^\circ \sim 127.5^\circ$	$127.5^\circ \sim 145^\circ$

$$\begin{aligned} Compact\ SSR\ STEC_k^{PRN} = & C_{00,k}^{PRN} + C_{01,k}^{PRN}(\phi_0 - \phi) + C_{10,k}^{PRN}(\lambda_0 - \lambda) + C_{11,k}^{PRN}(\phi_0 - \phi)(\lambda_0 - \lambda) \\ & + C_{02,k}^{PRN}(\phi_0 - \phi)^2 + C_{20,k}^{PRN}(\lambda_0 - \lambda)^2 + \delta STEC_k \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $C_{00}^{PRN} \sim C_{20}^{PRN}$ 는 보정모델의 계수, ϕ_0, λ_0 는 기준점의 위·경도, ϕ, λ 는 추정하고자 하는 위치의 위·경도이며, 아래 첨자 k는 네트워크를 뜻한다. 두 이온층 오차 보정 모델은 기준점으로부터의 위경도 거리에 따른 다항식 형태로 STEC을 표현했고, 사용자는 모델 계수와 기준점 정보를 수신 받아 관측된 위성의 STEC을 계산할 수 있다는 특징이 있다. 위의 방식은 위성 별 STEC이기 때문에 (위성의 수) × (계수의 수) 만큼의 데이터가 필요하다. 따라서, 이 방식은 가시위성의 수가 늘어나면 데이터의 양이 늘어난다는 단점이 있다. 특히, Compact SSR의 경우 12개의 네트워크에 따라 STEC을 계산하고 네트워크마다 δ STEC이 포함되기 때문에 (네트워크의 수) × (위성의 수) × (계수의 수) + (네트워크 별 δ STEC) 만큼의 데이터가 필요하다. 따라서, 이온층 오차 보정정보가 SSR메시지에 가장 큰 용량을 차지하게 된다.

2.2 VTEC 다항식 모델의 대상구역과 네트워크

VTEC 다항식 모델의 생성 및 제공구역은 Fig. 1과 같다. 2022년 4월 20일 전국 9개 상시관측소(제주, 부산, 남해, 강화, 화천, 진도, 세종, 울진, 마라도)의 24시간 GPS 관측치를 이용하여 위성의 IPP를 계산하였고, 일반적으로 자료처리시 제외되는 임계 고도각이 15° 임을 고려하여 경도 $110^\circ \sim 145^\circ$, 위도 $22.5^\circ \sim 47.5^\circ$ 로 대상 구역을 지정하였다. 그림의 검은색 점은 위도 방향 11개, 경도 방향 8개, 총 88개의 GIM 격자 점, 빨간색 별표는 고도 각 계산 시 사용한 상시관측소의 위치를 나타낸다. 개발한 다항식 모델에서 대상구역은 4개의 네트워크 (G1~G4)로 분리되며, 한반도 남쪽(위도 35° , 경도 127.5°)의 파란색 점을 기준으로 확장되는 형태이다. 전체 지역을 4개의 네트워크로 분리함으로써 추정 정확도를 유지할 수 있고, 네트워크 별 기준점을 한반도 남쪽의 한 점으로 함으로써 기준점에 대한 정보를 줄일 수 있다. 각 격자점은 높은 위도에서 낮은 위도 방향으로 A~K, 높은 경도에서 낮은 경도 방

Table 2. Amount of data according to visible satellites.

Number of satellites	Amount of data			
	GIM (grid point)	Compact SSR STEC polynomial model (Networks)×(sats)×(parameters)	HPAC STEC polynomial model (Networks)×(sats)×(parameters)	VTEC polynomial model (Networks)×(parameters)
10	88	4×10×6	4×10×4	4×6
20	88	4×20×6	4×20×4	4×6
30	88	4×30×6	4×30×4	4×6
40	88	4×40×6	4×40×4	4×6

Table 3. Maximum and minimum TEC during the test period.

Year (DOY)	Mean sunspot number	Mean F10.7	Max VTEC	Min VTEC
2015 (268~274)	135.3	124.7	72.4	6.9
2017 (001~007)	11.7	72.6	34.1	2.8

향으로 a~h로 구분하였고 (A,a)로 표현하였다. 분할된 네트워크의 위경도 정보는 Table 1과 같다.

2.3 Main Concept and Suggested Formula

본 연구에서 개발한 VTEC 다항식 모델은 Eq. (3) 과 같다.

$$VTEC_k = C_{00,k} + C_{01,k}(\phi_0 - \phi) + C_{10,k}(\lambda_0 - \lambda) + C_{11,k}(\phi_0 - \phi)(\lambda_0 - \lambda) + C_{02,k}(\phi_0 - \phi)^2 + C_{20,k}(\lambda_0 - \lambda)^2 \quad (3)$$

여기서 VTEC의 아래 첨자 k 는 네트워크를 뜻하며 Fig. 1에 보이는 바와 같다. CLAS의 Compact SSR, SPARTN의 HPAC 모델과 달리 VTEC을 산출하는 방식이고, 사용자는 관측된 위성 IPP의 위경도를 입력하여 IPP에서의 VTEC을 산출하게 된다. VTEC을 산출한 후 STEC으로 변환은 간단한 사상함수를 통해 변환할 수 있다 (Misra & Enge 2011). 따라서, 개발한 모델을 통해 IPP에서의 VTEC을 산출하고 사상함수를 통해 STEC을 계산하면 가시위성수에 관계없이 (네트워크의 수(4))×(계수의 수(6)) 만큼의 고정적인 데이터 양이 가능하다. Compact SSR 및 SPARTN은 한반도를 대상으로 서비스를 하지 않고, GIM은 전지구를 대상으로 서비스하므로 한반도를 대상으로 직접적인 데이터 용량 비교가 불가능하다. 하지만, 이들을 생성할 시 필요한 파라미터를 데이터 양으로 간주하였을 때, VTEC 다항식 모델의 대상구역에서 GIM은 88개 격자점의 VTEC 데이터, HPAC 및 Compact SSR과 같은 STEC 다항식 모델은 본 연구에서 개발한 모델과 같은 4개의 네트워크가 있다는 가정하에 (네트워크의 수(4))×(위성의 수)×(계수의 수) 만큼의 데이터가 필요하다. 대상구역 내에서 가시위성수에 따른 GIM, STEC 다항식 모델 그리고 개발한 VTEC 다항식 모델의 데이터 양은 Table 2와 같다.

40개의 가시위성이 있을 경우 GIM은 88개의 데이터, Compact SSR STEC 다항식 모델은 960개의 데이터, HPAC STEC 다항식 모델은 640개의 데이터, VTEC 다항식 모델은 24개의 데이터를 가진다. 이 때, VTEC 다항식 모델은 GIM과 비교하여 72.7%의 데이터 감소율, HPAC STEC 다항식 모델과 비교하여 96.25%의 데이터 감소율, Compact SSR STEC 다항식 모델과 비교하여 97.5%의 데이터 감소율을 갖는다. 특히, STEC 다항식 모델과의 비교는 가시위성의 수가 늘어날 수록 데이터 감소율이 증가하며, Compact SSR과 비교하였을 때 가시위성의 수가 10개

이상일 때부터 90% 이상의 데이터 감소율을 갖는다. 따라서, 다중위성항법에 적용 시 본 연구에서 제안하는 VTEC 다항식 모델의 정보량이 가장 적은 것을 알 수 있다.

2.4 Selection of Test Date Considering Solar Activity

일반적으로 데이터가 급격히 변하는 구간에서 추정성능이 급감한다. 태양활동에 민감한 이온층의 특성에 따라 태양 활동을 나타내는 흑점의 개수와 태양 전파 플럭스를 나타내는 F10.7 관측 지수를 기준으로 활동이 많은 기간 2015년 9월 25일~2015년 10월 1일 (DOY 268~274)과 활동이 적은 기간 2017년 1월 1일~2017년 1월 7일 (DOY 001~007)을 선정하였다. 한반도에서 수신 가능한 15도 이상인 위성의 IPP를 고려한 구역에서 IGS 최종 GIM을 1주일간 분석하였으며, 각 기간 모든 격자점 및 모든 시간대에서 최대, 최소 VTEC과 흑점 개수의 평균 및 F10.7 지수의 평균은 Table 3과 같다.

GPS 위성의 C/A 코드는 1 TECU 당 약 0.16 m의 신호지연이 발생한다 (Hofmann-Wellenhof et al. 2007). 따라서 태양 활동량이 많은 기간의 최대값인 72.4 TECU는 약 12 m의 신호지연에 해당하고, STEC으로 변환 시 12 m 이상의 지연량을 가지게 된다.

2.5 Least Square Estimation

앞서 제안한 Eq. (3)은 GIM을 기준점과 계수들로 구성된 다항식 형태로 나타낼 수 있고, 데이터의 양이 적다는 장점이 있다. Eq. (3)은 각 네트워크 별로 데이터를 Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있다. 따라서, 기준점에서부터 격자점까지의 거리와 VTEC을 이용하여 Eqs. (5~7)과 같이 최소 제곱 추정을 통해 모델 계수를 추정해 낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} VTEC \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{00} \\ C_{01} \\ C_{10} \\ C_{11} \\ C_{02} \\ C_{20} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & (\phi_0 - \phi) & (\lambda_0 - \lambda) & (\phi_0 - \phi)(\lambda_0 - \lambda) & (\phi_0 - \phi)^2 & (\lambda_0 - \lambda)^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & (\phi_0 - \phi) & (\lambda_0 - \lambda) & (\phi_0 - \phi)(\lambda_0 - \lambda) & (\phi_0 - \phi)^2 & (\lambda_0 - \lambda)^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$y = \begin{bmatrix} VTEC \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$parameters = (H^T H)^{-1} H^T y \quad (7)$$

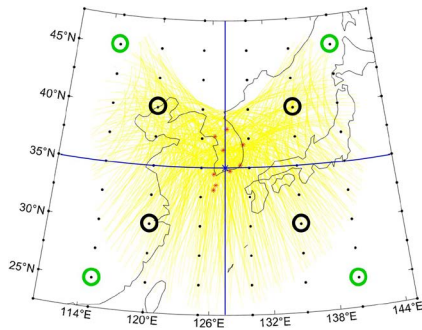


Fig. 2. Center and edge points used for time series analysis.

Table 4. Center and edge point information of each network.

	G1	G2	G3	G4
Center point	(D,c)	(D,f)	(H,f)	(H,c)
Edge point	(B,b)	(B,g)	(J,g)	(J,b)

3. RESULTS

전리층 TEC에는 절대적인 참값이 없기 때문에 본 논문에서는 개발한 VTEC 다항식 모델과 IGS 최종 GIM과의 차이를 오차로 표현했다. 모델의 평가를 위해 IGS 최종 GIM을 기준으로 하여 각 네트워크별 중앙 점 및 가장자리 점에서 발생한 오차의 시계열 분석, 네트워크 별 오차의 평균과 표준편차를 이용한 확률 분포 분석, 히스토그램을 통한 오차의 빈도 분석을 하였다. 또한, 공간 분석을 통하여 절대 오차 및 상대 오차의 양상을 확인하였다. 시계열 분석에 사용되는 네트워크 별 중앙점 및 가장자리 점의 정보는 Fig. 2 및 Table 4와 같다. 가장자리 점은 IPP를 고려하여 가장 바깥 직전의 점으로 하였다.

3.1 Spatial Analysis During Period of High Solar Activity

태양활동량이 많은 기간 중 절대오차가 2 TECU 이상 나타나는 시점인 2015년 272일 15시와 2015년 274일 15시의 contour plot은 Fig. 3과 같다. 해당 기간 최대 절대오차는 2.4 TECU이며, 2 TECU가 넘는 시점이 두 번 있다. 각 그림의 윗줄은 IGS 최종 GIM, VTEC 다항식 모델로 계산한 GIM이며, 아랫줄은 최종 GIM과 계산한 GIM의 절대오차 및 상대오차를 나타낸다. 추가적으로 절대오차는 0.5 TECU 간격의 등고선, 상대오차는 2% 간격의 등고선을 표현하였다.

빨간색 사각형으로 표현한 지점은 최대 절대오차를 나타내는 격자점으로 G4 네트워크의 가장자리점에서 최대 오차가 나타난다. 이 시점에 최대 상대 오차는 각각 5.82%, 5.38%이다. 최대 절대오차가 발생한 시점은 15시로 이온층의 지역적 변화가 가장 큰 시점이고, 네트워크의 가장자리 점이 최대오차를 보이는 것을 보아 지역적 변화가 클 때 가장자리 부근에서 추정이 다소 불안정함을 보인다.

전체 기간 중 상대오차가 가장 높았던 2017년 002일 19시의 contour plot은 Fig. 4와 같다. 해당시점 최대 절대오차는 0.68 TECU, 최대 상대오차는 9.89 %로 GIM의 VTEC 값이 작기 때문에 작은 절대 오차임에도 높은 상대오차가 나타난다. 이는 상대 오차에 관계없이 절대오차가 작을 수 있음을 뜻한다. 따라서, 태양활동량이 많은 기간에 최대 절대오차 2.4 TECU, 전체기간 중 최대 상대오차 9.89 %로 높은 정확도로 추정함을 보인다. 기간별 최대 절대오차 및 상대오차는 Table 5와 같다.

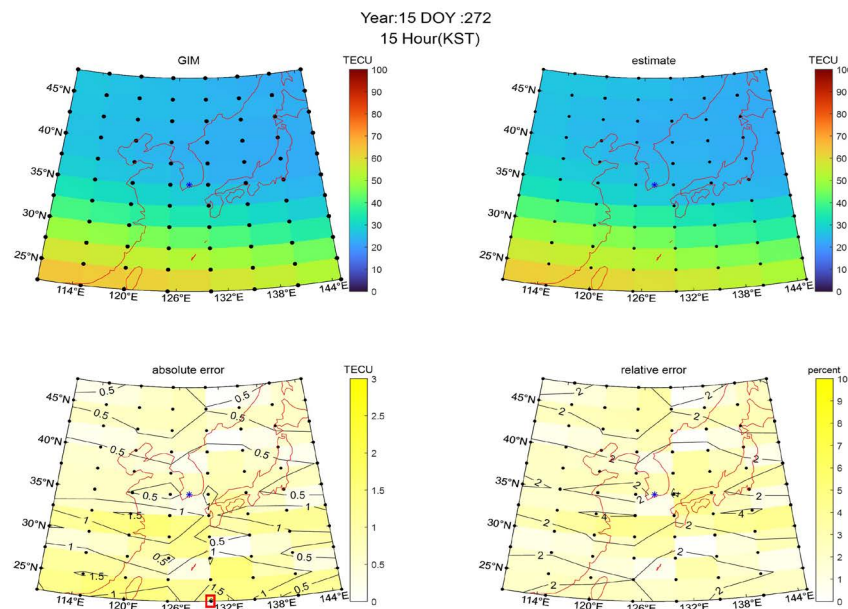


Fig. 3. Absolute error greater than 2 TECU during whole test period.

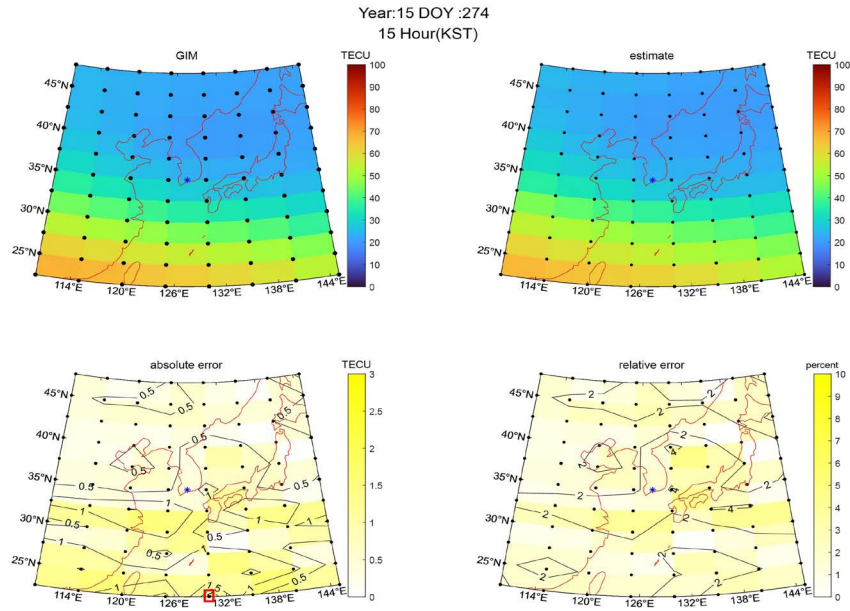


Fig.3. continued

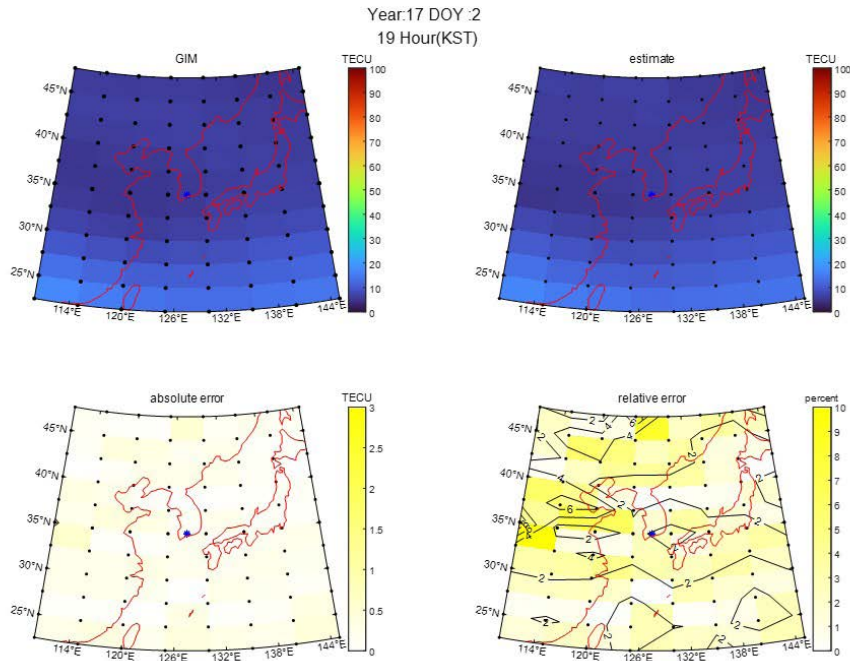


Fig. 4. Maximum relative error (9.89%) during whole test period.

Table 5. Maximum error at all grid points by date.

	Max error	Day1	Day2	Day3	Day4	Day5	Day6	Day7
High solar activity	Absolute error (TECU)	1.55	1.02	1.26	1.46	2.09	1.25	2.37
	Relative error (%)	7.09	6.42	5.30	4.34	5.82	4.88	5.38
Low solar activity	Absolute error (TECU)	0.98	0.68	0.48	0.54	0.61	0.51	0.59
	Relative error (%)	7.57	9.89	6.58	4.30	4.79	4.20	5.29

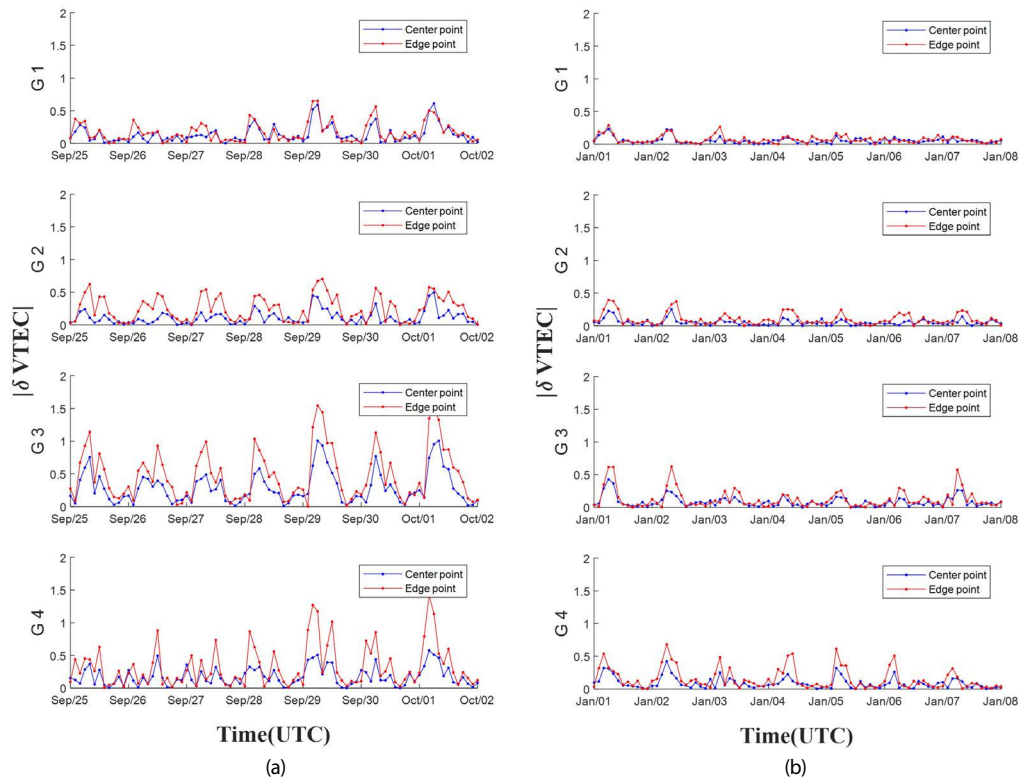


Fig. 5. Center and edge point time series analysis in (a) High solar activity period, (b) Low solar activity period.

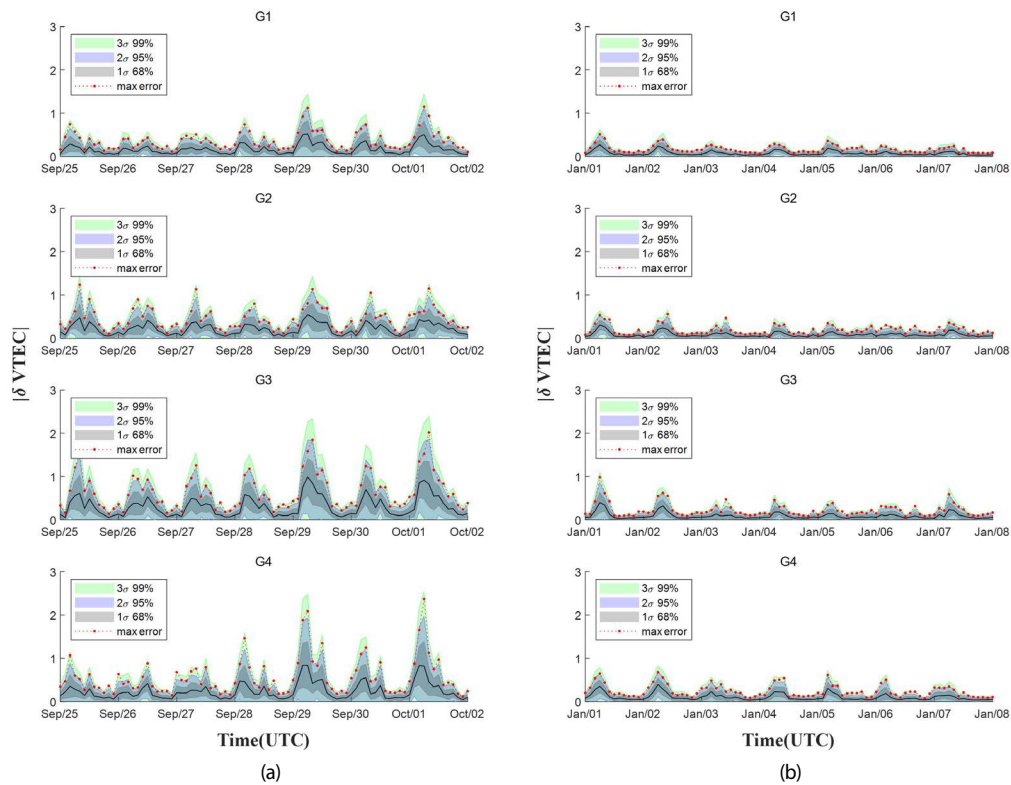


Fig. 6. Validation of network stability through Confidence intervals for periods of (a) High solar activity, (b) Low solar activity.

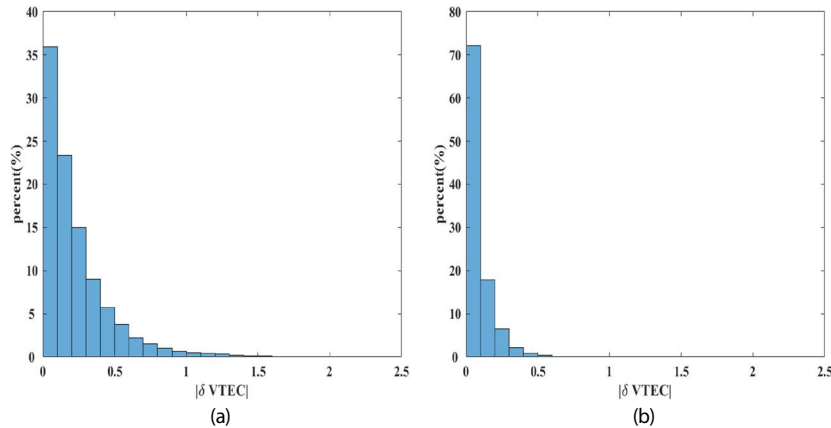


Fig. 7. Validation of network stability through Histogram of error during periods of (a) High solar activity, (b) Low solar activity.

3.2 Time Series Analysis

3.2.1 Center point and edge point time series analysis by network

중앙 점과 가장자리 점 비교를 통해 네트워크 내의 추정 안정성을 확인할 수 있다. 두 지점 오차의 차이가 크면, 이온층의 지역적 변화가 커 추정이 다소 불안정함을 나타낸다. 각 네트워크의 중앙 및 가장자리 점의 오차의 시계열 그래프는 Fig. 5와 같다. 파란선은 중앙점, 빨간선은 가장자리 점을 나타내며, 위에서부터 G1~G4네트워크를 나타낸다.

상대적으로 위도가 높은 G1, G2 네트워크는 태양 활동량에 관계없이 1 TECU 이내로 안정적인 오차 경향을 보인다. 반면에 상대적으로 위도가 낮은 G3, G4 네트워크의 경우 태양 활동량이 많을 때 추정오차가 1 TECU를 넘을 때가 있음을 보이고, 특히 G4 네트워크의 경우 중앙점과 가장자리 점의 오차의 차이가 큰 것을 보아 상대적으로 불안정함을 보인다.

3.2.2 Confidence interval and maximum value of error for each network

각 선정한 기간에 네트워크 내 모든 격자점에서 발생한 오차의 평균과 표준편차를 이용하여 계산한 신뢰구간의 시계열 그래프는 Fig. 6과 같다. 초록색 범위는 99% (3σ) 신뢰구간, 파란색 범위는 95% (2σ) 신뢰구간, 검은색 범위는 68% (1σ) 신뢰구간이며, 추가적으로 해당지점 모든 격자점에서 오차의 최대값을 빨간색 점으로 나타내었다.

태양 활동량이 적은 기간에는 4개의 네트워크 모두 1 TECU 이내로 높은 추정 정확도를 보인다. 태양 활동량이 많은 기간에는 G1, G2 네트워크의 경우 2 TECU 이내의 추정 정확도를 보이고 G3, G4 네트워크의 경우 3 TECU 이내의 추정 정확도를 보인다. 태양활동이 많은 기간 중 G3, G4 네트워크는 네트워크의 불안정성으로 임의의 IPP를 계산할 시 격자점에서의 최대오차를 넘어가는 경우가 발생할 수도 있음을 보인다.

3.2.3 Frequency analysis of absolute error

Fig. 7은 각 기간동안 모든 격자점에서 발생한 절대오차의 빈도를 나타내는 히스토그램이다. x축은 0.1 TECU 간격의 절대오차, y축은 오차의 빈도를 %로 나타낸 것이다. 태양 활동량이 적은 기간에는 최대 오차가 0.98 TECU로, 0 ~ 0.1 TECU 사이의 오차가 70% 이상의 빈도를 가지고 대부분 0.5 TECU 이하로 나타난다. 반면에, 태양 활동량이 많은 기간에는 최대 오차가 2.37 TECU로 0~0.1 TECU 사이의 오차가 35.9%에 해당하고 1 TECU 이상의 오차는 1.7% 수준으로 나타난다.

4. CONCLUSIONS

본 연구에서는 GIM을 기준점으로부터 격자점까지의 거리와 VTEC을 이용해 다항식 모델을 만드는 방법에 대해 연구하였다.

상대적으로 낮은 위도에 해당하는 G3, G4 네트워크는 전리층의 지역적 변화가 크기 때문에 태양 활동량이 많은 기간에는 상대적으로 불안정한 추정을 하였으며, G1, G2 네트워크는 태양 활동량에 관계없이 높은 추정 정확도를 보였다. 태양 활동량이 적은 기간에는 네트워크에 상관없이 1 TECU 미만의 절대오차를 나타냈으며 태양 활동량이 많은 기간에는 위도가 낮은 지역에서 최대 2.37 TECU의 절대오차를 보였다. 또한, 확률분포 분석을 통해 태양 활동량이 많은 기간에 격자점이 아닌 임의의 IPP를 선정하여 계산하였을 때 99%의 확률로 3 TECU 미만의 오차를 확인할 수 있었다. 두 기간 동안 최대 절대오차 2.37 TECU, 최대 상대오차 9.89 %를 보였다.

최대 오차가 발생한 지점은 G3, G4 네트워크의 가장자리 지점이며 해당 격자점에 IPP가 위치하는 위성은 고도각이 낮은 상태이다. 신호 및 자료처리시 고도각 가중값을 적용하여 오차영향을 줄여야 한다. 따라서, 향후 실시간 적용이 가능한 Predicted GIM과 같은 격자형 VTEC 정보가 주어진다면, 본 연구에서 제안하는 다항식 모델을 통해 보정정보 전송 측면에서 효율적으로 서비스가 가능할 것으로 예상된다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음 (과제번호 RS-2022-00141819).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

K.D. and J.Y. conceived of the presented idea. J.Y. developed the theory and performed the computations. J.Y. and Y.G. verified the analytical methods. K.D. supervised the findings of this work. J.Y. wrote original draft preparation and Y.G. wrote review and editing. All authors discussed the results and contributed to the final manuscript.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Chen, P., Liu, H., Ma, Y., & Zheng, N. 2020, Accuracy and consistency of different global ionospheric maps released by IGS ionosphere associate analysis centers, *Advances in Space Research*, 65,163-174. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.09.042>
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. 2007, *GNSS-Global Navigation Satellite System* (Wien New York: Springer)
- IS-QZSS-L6-004 2021, Quasi-Zenith Satellite System Interface Specification Centimeter Level Augmentation Service
- Misra, P. & Enge, P. 2011, *Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance*, Revised 2nd ed. (Lincoln, MA: Ganga-Jamuna Press)
- Schaer, S., Gurtner, W., & Feltens, J. 2015, IONEX: The IONosphere Map EXchange Format Version 1.1, *Proceedings of the IGS AC Workshop*, Darmstadt, Germany, Feb 9-11, 1998. <http://ftp.aiub.unibe.ch/ionex/draft/ionex11.pdf>
- Setti Junior, P. D., Alves, D. B., & Silva, C. M. 2019, Klobuchar and NeQuick G Ionosphere Models Comparison for Multi-GNSS Single-Frequency Code Point Positioning in The Brazilian Region, *Boletim de Ciências Geodésicas*, 25, e2019016. <https://doi.org/10.1590/s1982-21702019000300016>
- U-blox AG 2021, *Secure Position Augmentation for Real-Time Navigation (SPARTN) Interface Control Document* version 2.0.1
- Villiger, A. & Dach, R. 2017, *International GNSS Service Technical Report 2016 (IGS Annual Report)*, IGS Central Bureau and University of Bern, Bern Open Publishing



Jae-Young Park received M.S. degree in Geoinformatic Engineering from Inha University, Korea. He received B.S degree from the same university. His research interests include PPP-RTK and SSR2OSR algorithm development.



Yeong-Guk Kim received M.S. degree in Geoinformatic Engineering from Inha University, Korea. He received B.S degree from the same university. His research interests include RTK/PPP-RTK algorithm development.



Kwan-Dong Park received his Ph.D. degree from the Department of Aerospace Engineering and Engineering Mechanics at the University of Texas at Austin, and he is currently at Inha University as a professor. His research interests include PPP-RTK algorithm development and GNSS geodesy.