

GLONASS IFB 추정과 한반도 상공의 전리층 TEC 변화 분석

최병규[†], 홍준석, 손동효

Estimation of GLONASS IFB and Analysis of Ionospheric TEC Variations Over the Korean Peninsula

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

Space Navigation and Geodesy Center, Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 34055, Korea

ABSTRACT

This study investigates the influence of GLONASS receiver Inter-Frequency Bias (IFB) on the estimation of the ionospheric Total Electron Content (TEC). To estimate and validate GLONASS IFB, we utilized GNSS observations obtained from a dense regional network of 19 stations operated by the National Geographic Information Institute (NGII) for the period of DOY 32-36, 2026. Our results reveal that the Vertical TEC (VTEC) values exhibit significant fluctuations, ranging from approximately -60 to 80 TEC units (TECU), when the GLONASS IFB corrections are not applied. On the other hand, after the IFB mitigation, the VTEC variations became remarkably consistent at all stations. The accuracy of the derived GLONASS VTEC is assessed through a comparative analysis with the CODE Global Ionospheric Map (GIM). The results exhibit a remarkable correlation between the two datasets, with a mean bias of 0.04 TECU and a root-mean-square (RMS) value of 4.37 TECU over the five days. The findings of this study suggests that the proposed method can accurately determine receiver-specific IFBs and improve local ionospheric TEC monitoring.

Keywords: GLONASS, IFB, TEC, GIM

주요어: 글로나스, 주파수간 바이어스, 전리층 총전자량, 전지구 전리층맵

1. INTRODUCTION

미국의 GPS와 더불어 러시아의 GLONASS는 전 세계를 커버하는 대표적인 Global Navigation Satellite System (GNSS)로, 다중 위성군(Multi-GNSS) 환경에서 위치 결정의 가시성과 신뢰도를 높이는 데 필수적인 역할을 수행하고 있다. GPS와 GLONASS의 통합은 GPS 단독과 비교하여 위치 정확도와 측위 안정성을 향상시킨다 (Choi et al. 2014, Wang et al. 2015, Chen et al. 2018).

GLONASS를 이용한 전리층 Total Electron Content (TEC) 연구는 여러 문헌에서 보고되었다 (Jakowski et al. 2002, Afraimovich et al. 2013, Yasyukevich et al. 2014). GPS 위성군에 GLONASS가 추가되면 가시 위성 수의 증가로 관측 가용성과 공간 해상도를 높일 수 있다. 특히 GLONASS는 궤도 경

사각이 GPS보다 커서 고위도 지역에서 많은 관측자료를 얻을 수 있기 때문에 극지역 전리층 교란 등의 연구에 많이 활용된다. Zakharenkova et. al. (2016)은 2015년 성 패트릭의 날(St. Patrick's Day)에 발생한 강력한 지자기 폭풍 기간 동안에 GPS와 GLONASS 관측자료를 이용해서 대규모 이동성 전리층 교란을 보고하였다. 또한 Cherniak & Zakharenkova (2018)는 2015년 지자기 폭풍 기간 동안 고위도 지역에서 GLONASS 관측을 이용한 전리층 불균일 발생을 조사하였다. 그러나 GLONASS는 위성별로 주파수가 서로 다르기 때문에 Inter-Frequency Bias (IFB)가 발생하고, 이것을 모델링으로 정확하게 추정하지 않으면 TEC 값에 큰 오차로 작용할 수 있다.

GPS의 코드 분할 다중 접속(Code Division Multiple Access) 방식과 달리, GLONASS는 위성별로 서로 다른 주파수를 사용하

Received Apr 03, 2026 Revised Apr 10, 2026 Accepted May 01, 2026

[†]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.

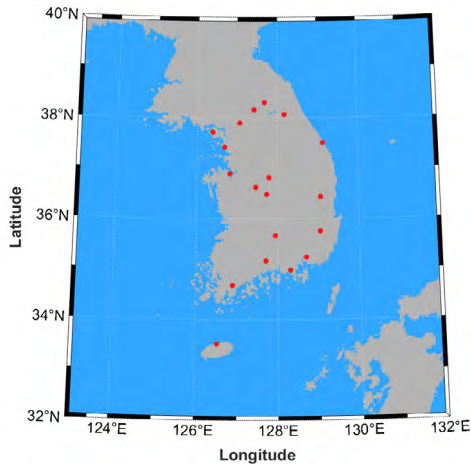


Fig. 1. The distribution of 19 GNSS stations. The red dots represent the locations of the GNSS stations.

는 주파수 분할 다중 접속 (Frequency Division Multiple Access, FDMA) 방식을 채택하고 있기 때문에 수신기 내부의 하드웨어 지연이 주파수마다 다르게 발생하는 주파수 간 바이어스, 즉 IFB가 발생한다 (Wanninger 2012). 이중 주파수 간 신호 지연 불일치로 나타나는 GLONASS IFB는 시계 오차와 결합되어 정밀 단독 측위 (Precise Point Positioning, PPP) 및 실시간 이동 측위 (Real-Time Kinematic, RTK) 등에서 모호정수해를 구하는 데 치명적인 오차 요인으로 작용한다 (Wanninger 2012, Geng & Bock 2016, El-Mowafy et al. 2016). 특히 IFB는 서로 다른 제조사마다 동일한 GLONASS 위성 신호에 대해서도 편이값이 크게 달라질 수 있으며 그 특성은 선형을 보인다고 보고된 바 있다 (Wanninger 2012). 따라서 정확한 IFB 추정엔 GLONASS의 활용성을 증가시킬 수 있다. 기존 연구들은 IGS 기준국망 등을 활용하여 좋은 기하학적 분포로 IFB의 추정 정확도를 높였다. 그러나 기준국이 밀집되거나 가시 위성 부족 등 제한적인 상황에서도 IFB 추정하여 분석할 필요가 있다.

따라서 이 연구에서는 한반도에 위치하고 있는 19곳의 GNSS 기준국 데이터를 이용하여 Trimble NetR9과 Alloy 수신기 모델의 IFB를 정밀하게 추정한다. 또한 상대적으로 좁은 지역망에서 추정된 GLONASS IFB를 지역 전리층 TEC 모델에 보정한다. 그리고 GLONASS IFB가 보정된 한반도 상공의 전리층 TEC 값을 Center for Orbit Determination in Europe (CODE) Global Ionosphere Map (GIM) TEC와 비교하여 정량적인 값을 제시한다.

2. DATA DESCRIPTION

GLONASS IFB를 추정하고 전리층 TEC를 분석하기 위해 국토지리정보원에서 운영하는 19곳의 GNSS 기준국 데이터를 이용한다. Fig. 1은 지역적인 분포를 고려하여 선정된 GNSS 기준국의 분포를 보여주고 있다. 붉은색 점으로 표시된 것은 기준국의 위치를 의미한다. 각각의 기준국에 설치된 수신기와 안테나 모델은 Table 1에 기술하였다. 선정된 모든 기준국은 Trimble사의 수신기

Table 1. GNSS station configurations for the GLONASS TEC estimation.

Site	Receiver model	Antenna model	
BOEN	TRIMBLE ALLOY	TRM59800.00	SCIS
CHJU	TRIMBLE NETR9	TRM59800.00	SCIS
CHLW	TRIMBLE NETR9	TRM59800.00	SCIS
CHSG	TRIMBLE NETR9	TRM59800.00	SCIS
CHWN	TRIMBLE ALLOY	TRM59800.00	SCIS
CNJU	TRIMBLE NETR9	TRM59800.00	SCIS
DANJ	TRIMBLE ALLOY	TRM59800.00	SCIS
DOND	TRIMBLE NETR9	TRM59800.00	SCIS
DONH	TRIMBLE NETR9	TRM59800.00	SCIS
GANH	TRIMBLE NETR9	TRM59800.00	SCIS
GOCH	TRIMBLE ALLOY	TRM59800.00	SCIS
GOSG	TRIMBLE NETR9	TRM59800.00	SCIS
GSAN	TRIMBLE NETR9	TRM59800.00	SCIS
GYJU	TRIMBLE NETR9	Unknown external	
HADG	TRIMBLE ALLOY	TRM59800.00	SCIS
HCHN	TRIMBLE NETR9	TRM59800.00	SCIS
INCH	TRIMBLE NETR9	TRM59800.00	SCIS
INJE	TRIMBLE NETR9	TRM59800.00	SCIS
JAHG	TRIMBLE NETR9	TRM59800.00	SCIS

가 설치되어 있으며, 대부분은 NetR9 모델이며, 일부는 Alloy 모델이다. 안테나는 GYJU를 제외하고 모든 기준국에서 TRM59800 SCIS 모델이 구축되어 있다. 국토지리정보원으로부터 Receiver Independent Exchange Format (RINEX) 관측 파일을 직접 제공받아 사용했으며, RINEX 파일은 버전 3.04로 구성되어 있다. 이 RINEX 파일에는 GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, 그리고 QZSS 관측자료가 함께 포함되어 있으며, 관측자료는 30초 샘플링 간격으로 저장되어 있다. 또한 항법위성의 궤도 계산을 위해 RINEX 항법 파일(navigation file)은 International GNSS Service (IGS) 데이터센터에서 내려받을 수 있다. 마찬가지로 항법 파일은 관측 파일과 유사하게 모든 위성의 궤도력 정보가 포함되어 있다.

3. GLONASS IFB ESTIMATION METHOD

전리층 TEC를 정밀하게 추정하기 위해서는 항법 위성의 이중주파수 관측자료를 사용한다. 기준국의 수신기는 여러 타입의 GLONASS 관측 자료를 제공하고 있지만, 이 연구에서는 C1C, L1C, C2P, 그리고 L2P 관측 자료를 사용한다. 또한 GLONASS 관측을 이용해서 전리층 TEC를 계산하는 것은 Eq. (1)처럼 구성할 수 있다 (Wang et al. 2020, Zhu & Zhou 2025).

$$STEC = \frac{1}{40.3} \cdot \frac{f_1^2 \cdot f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (C2P - C1C - DCB^s - IFB) \quad (1)$$

여기서 f_1 과 f_2 는 GLONASS 위성별 주파수이다. C1C와 C2P는 각 주파수에서의 코드 의사거리 관측값, 그리고 DCB^s 는 위성의 하드웨어 바이어스 (Differential Code Bias, DCB), IFB는 주파수별 수신기 하드웨어 바이어스를 의미한다.

이 연구에서 GLONASS 위성 DCB 추정은 Choi et. al. (2023)이 제시한 방법을 이용해서 미리 추정한다.

GLONASS 위성별 주파수 f_1 과 f_2 는 아래와 같이 채널 번호(k)에 의해 결정된다. 이 연구에서 사용한 위성별 k 는 Table 2에 기술하였다.

Table 2. GLONASS channel number (k).

Satellite	Channel number (k)	Satellite	Channel number (k)
R01	1	R13	-2
R02	-4	R14	-7
R03	5	R15	0
R04	6	R16	-1
R05	1	R17	4
R06	-4	R18	-3
R07	5	R19	3
R08	6	R20	2
R09	-2	R21	4
R10	-7	R22	-3
R11	0	R23	3
R12	-1	R24	2

$$f_1 = 1602 + k \cdot 0.5625 \text{ MHz}$$

$$f_2 = 1246 + k \cdot 0.4375 \text{ MHz}$$

GLONASS 위성은 FDMA 방식을 사용하기 때문에 위성마다 서로 다른 주파수의 신호를 송신한다. 서로 다른 주파수의 신호를 수신하는 수신기는 주파수에 의존적인 바이어스가 발생한다. GLONASS IFB는 정밀 위치해 결정 또는 정밀 전리층 TEC 추정 등에 반드시 보정되어야 한다. GLONASS TEC 계산에서 IFB를 제거하지 않으면 전리층 지연량에 큰 오차로 작용한다 (Zhang et al, 2023).

IFB는 일반적으로 채널 번호에 대해 Eq. (2)와 같이 선형 모델로 표현할 수 있다 (Wanninger 2012).

$$IFB(k) = a + b \cdot k \quad (2)$$

여기에서 a 는 기준 주파수($k \sim 0$)에서의 오프셋값을 의미하고, b 는 채널 변화에 따른 바이어스의 변화(m/channel) 정도를 나타낸다. B 값이 크면 채널 번호에 따라 IFB 값이 급격히 변화한다. a 와 b 값은 수신기 모델, 안테나 모델, 또는 수신기 펌웨어 버전에 따라 달라질 수 있다 (Wanninger 2012).

수신기의 IFB 추정에 필요한 a 와 b 값을 계산하기 위해 이 연구에서는 Eq. (3)을 적용한다.

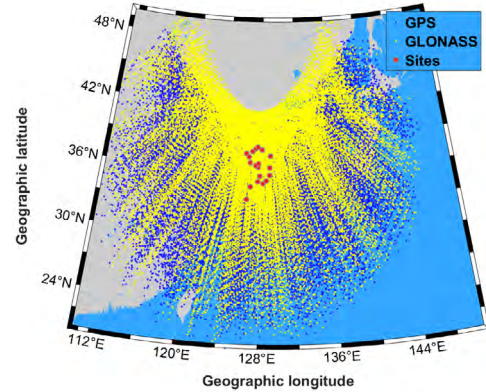
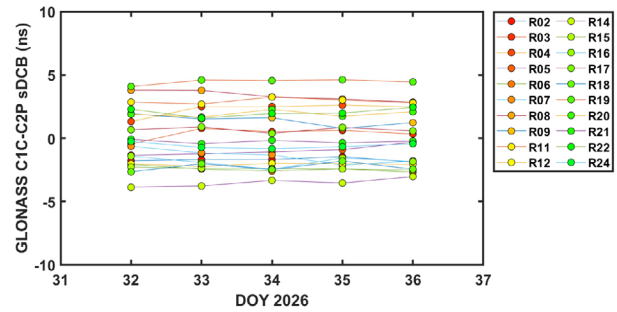
$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 & 1 & k_1 \\ M_2 & 1 & k_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ M_n & 1 & k_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} vTEC \\ a \\ b \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기에서 y 는 코드 의사거리의 Geometry-Free 선형조합값, M 은 $\frac{1}{40.3} \cdot \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \times \frac{1}{\cos(z)}$, 그리고 $vTEC$ 는 vertical TEC로 수직방향 총 전자량을 의미한다. 또한 z 는 전리층 고도 350 km에서의 천정각을 의미한다. $vTEC$ 값, 상수 a 와 b 를 계산하기 위해 하루치 데이터를 사용하고, 미지수 추정을 위해 최소자승법을 적용한다.

4. RESULTS

4.1 GLONASS IPP and IFB Values

GLONASS IFB 계산과 전리층 TEC 값을 추정하기 위해 이 연구에서는 2026년 2월 1일(day of year, DOY 32)부터 5일(DOY 36)까지 기준국의 관측자료를 사용하였다. 이 기간은 태양 활동

**Fig. 2.** Geographic distribution of the GNSS reference stations (red dots) and their corresponding IPPs for GPS (blue dots) and GLONASS (yellow dots) satellites over South Korea.**Fig. 3.** Daily stability of the C1C-C2P sDCBs for the GLONASS from DOY 32 to 36, 2026. Each colored line represents each GLONASS satellite (R02–R24).

극대기에 해당되며, 한반도의 계절 특성상 TEC 값이 상대적으로 높다. 또한 TEC 모델링에 영향을 주는 항법 신호의 전리층 투과 지점(Ionospheric Pierce Point, IPP)을 비교하기 위해 GLONASS IPP와 GPS IPP를 계산하였다. 그리고 TEC 모델링을 위해 IPP 고도는 350 km라고 가정하였고 신호 품질을 고려하여 위성의 양각이 10도 이상인 자료만 사용하였다. Fig. 2는 2026년 DOY 32일 자료를 이용해서 계산한 GPS와 GLONASS IPP의 기하학적 분포를 보여준다. 붉은색 점은 기준국의 위치를, 파란색 점선들은 GPS IPP를, 그리고 노란색 점선들은 GLONASS IPP를 나타낸다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 IPP가 한반도를 중심으로 밀집하게 형성되어 있는 것을 알 수 있다. GLONASS는 GPS와 비교했을 때, 고위도 영역까지 좀 더 확장된 분포를 보인다. 또한 GLONASS IPP들은 궤도 특성으로 인해 GPS에 비해 남북 방향으로 길게 분포한다.

Fig. 3은 2026년 DOY 32부터 36까지 GLONASS 위성의 C1C-C2P DCB 추정값에 대한 일간 변화를 보여준다. GLONASS satellite DCB (sDCB) 값은 약 -4에서 +5 나노초 (nanoseconds, ns)의 범위 내에 존재하며 시간 경과에 따라 매우 안정적인 추세를 유지한다. 특히, 각 위성별 sDCB 값의 변화폭이 매우 작고 안정적인 양상을 보인다. 이것은 GLONASS 위성의 하드웨어 특성이 일정하게 유지되고 있다는 것을 의미하며, 보정값으로 사용하기에 충분히 신뢰할 수 있음을 보여주고 있다.

Table 3은 이 연구에서 추정된 기준국별 GLONASS IFB 추정

Table 3. Estimated parameters for the GLONASS IFB.

Site	Parameter (m)		Site	Parameter (m)	
	a	b		a	b
BOEN	-2.1791	0.0899	GOCH	2.3850	0.0974
CHJU	-0.6352	0.0012	GOSG	-2.1659	0.0438
CHLW	-1.2715	0.1062	GSAN	3.6860	0.2274
CHSG	3.9100	0.4666	GYJU	-0.8101	0.0581
CHWN	2.6889	0.1773	HADG	3.8106	0.1933
CNJU	-0.2632	0.0863	HCHN	-1.1693	0.0710
DANJ	-1.3243	0.0299	INCH	-0.9129	0.0486
DOND	-1.8425	0.0983	INJE	-2.0178	0.0495
DONH	-1.0544	0.0106	JAHG	3.8414	0.1395
GANH	-0.9397	0.0718			

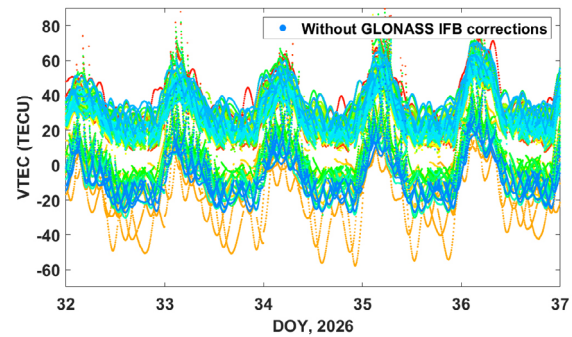
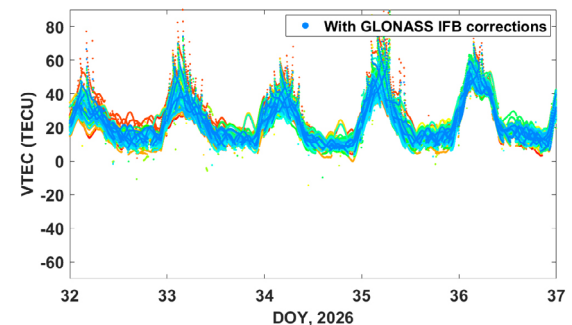
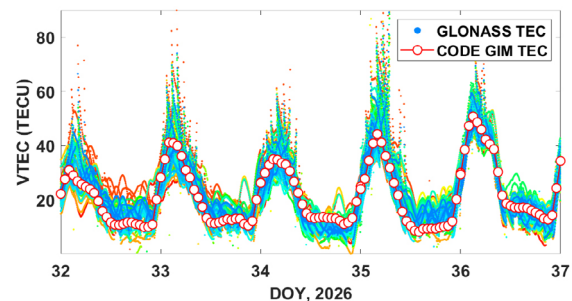
파라미터를 기술한 것이다. GLONASS의 주파수별 바이어스를 추정하기 위해 선형 모델식을 적용하였으며, 각 기준국에서의 절편(a)과 기울기(b) 값을 산출하였다. IFB 파라미터는 기준국별로 뚜렷한 차이를 보였는데, 이는 수신기 하드웨어의 지연 특성이 기준국마다 상이함을 시사한다. 특히 a파라미터의 경우 최소 약 -2.18 m에서 최대 3.91 m의 범위를 보였으며, 이러한 선형 파라미터의 추정과 IFB 보정은 정밀한 GLONASS TEC 값 산출에 반드시 필요하다.

4.2 GLONASS VTEC Results

이 연구에서는 2026년 DOY 32부터 36까지의 기간 동안 GLONASS 위성 신호를 이용하여 VTEC 값을 산출하였고, 그 결과를 분석하였다. Fig. 4는 GLONASS의 고유한 특성인 수신기 IFB를 보정하지 않았을 때의 VTEC 산출 결과를 보여준다. GLONASS IFB가 보정되지 않으면 VTEC 추정값이 약 -60 TEC units (TECU)에서 약 80 TECU 이상까지 큰 변동성이 나타난다. 이는 수신기 IFB 값이 VTEC 계산 과정에서 직접적인 큰 오차로 작용하고 있음을 시사한다. 또한 해당 기간 동안 VTEC 값은 일일 단위의 주기성을 나타내고 있으나, 일부 기준국은 VTEC가 음의 값으로 추정되었다. 이것은 실제 전리층 TEC 값보다 IFB 값이 더 크게 작용하여 결과가 음수로 산출될 수 있음을 보인다. 즉, 각각의 수신기마다 서로 다른 IFB를 가지고 있기 때문에 IFB가 적절하게 제거되지 않으면 기준국마다 추정된 VTEC 값은 서로 다를 수 있다.

이 연구에서 제안한 GLONASS IFB 보정 기법을 적용한 결과, 추정된 VTEC 값의 변화는 뚜렷한 일관성을 보이고 있다. Fig. 5는 GLONASS IFB가 보정된 모든 기준국들의 VTEC 시계열을 나타내고 있다. GLONASS IFB 보정 전에는 VTEC 값이 최대와 최소 간 140 TECU 이상의 매우 큰 편차를 보였지만, 보정 후에는 VTEC 값이 약 5 TECU에서 약 80 TECU까지 -75 TECU의 편차를 보이고 있다. IFB 보정 이후에 VTEC에 대한 상대적인 편차가 작아진 것을 알 수 있다. 이것은 각 기준국의 수신기마다 위성 채널별로 상이했던 편차가 효과적으로 제거되었음을 의미한다.

GLONASS IFB를 적용한 VTEC 값의 신뢰성을 검증하기 위해 이 연구에서는 CODE GIM TEC와 비교하였다. GIM TEC 값은 VTEC 값의 정확도를 검증할 때 표준으로 주로 활용된다. 그리고 TEC 값은 1시간의 시간 해상도, 위도와 경도는 2.5°×5.0°의 공간 해상도를 갖고 있다. Fig. 6은 해당 기간에 한반도 상공의 VTEC

**Fig. 4.** Time series of estimated VTEC derived from GLONASS observations without IFB corrections during DOY 32-36, 2026.**Fig. 5.** Time series of estimated VTEC derived from GLONASS observations with IFB corrections during DOY 32-36, 2026.**Fig. 6.** Comparison of the estimated VTEC from GLONASS and the CODE GIM at CNJU station during DOY 32-36, 2026.

시계열 변화를 보여주고 있다. GLONASS TEC는 실제 관측 전영역을 반영하고 있고, CODE GIM TEC는 청주(CNJU) 기준국 위치를 기준으로 산출하였다. 기준국의 위치에 따라 VTEC 값은 달라질 수 있다. CNJU 기준국은 기준국들의 분포의 중앙에 위치하고 있기 때문에 서로 다른 위치에 있는 기준국들의 VTEC 값의 상대적인 비교에 적합하다.

해당 기간 동안 GLONASS TEC와 CODE GIM TEC는 매우 유사한 시계열 변동을 갖고 있는 것을 알 수 있다. 서로 다른 값의 차이에 대한 평균값과 root-mean-square (RMS) 값은 각각 약 0.04 TECU와 4.37 TECU였다. 이는 이 연구에서 추정된 IFB가 정확하게 추정되었음을 의미한다. 또한, GLONASS TEC는 CODE GIM에 비해 높은 해상도를 갖고 있어서 국지적인 전리층 변화 감시

에 적합하리라 판단한다.

5. CONCLUSIONS

이 연구에서는 GLONASS 시스템의 FDMA 방식에 의해 유발되는 수신기 IFB를 직접 추정하기 위한 기법을 제안하였다. 그리고 GLONASS IFB를 추정하기 위해 2026년 DOY 32부터 36까지 국토지리정보원에서 운영하는 기준국의 GNSS 관측 자료를 이용하였다.

GLONASS IFB를 제거하지 않으면, VTEC 값은 약 -60 TECU에서 80 TECU까지 큰 편차를 보였다. 그러나 IFB 제거 이후에 모든 GNSS 기준국에서의 VTEC 시계열은 서로 유사한 변동성을 보였다. 이것은 수신기별로 서로 상이하게 추정된 IFB가 효과적으로 제거되었다는 것을 알 수 있었다.

GLONASS VTEC 값의 정확도를 검증하기 위해 CODE GIM TEC 값과 비교하였다. 둘 간의 시계열 변화는 매우 유사하게 나타났다. 5일 동안 평균 편차는 약 0.04 TECU, 그리고 이에 대한 RMS 값은 약 4.37 TECU로 산출되어, 이 연구에서 제안한 방법이 IFB를 정밀하게 추정한다는 것을 확인했다.

결과적으로 이 연구에서 제안된 GLONASS IFB 추정 방법이 정밀한 전리층 TEC 교란 등의 연구에 매우 유용한 도구가 될 것으로 기대한다.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by the Korea Astronomy and Space Science Institute under the R&D program (Project No. 2026-1-853-00) supervised by the Korea Aerospace Administration.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Methodology, Byung-Kyu Choi, Junseok Hong and Dong-Hyo Sohn; software, Byung-Kyu Choi; formal analysis, Byung-Kyu Choi; investigation, Junseok Hong and Dong-Hyo Sohn.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

Afraimovich, E. L., Astafyeva, E. I., Demyanov, V. V., Edemskiy, I. K., Gavriluk, N. S., et al. 2013, A review of

- GPS/GLONASS studies of the ionospheric response to natural and anthropogenic processes and phenomena, *J. Space Weather Space Clim.*, 3, A27. <https://doi.org/10.1051/swsc/2013049>
- Chen, X., Lu, C., Guo, B., Guo, F., Ge, M., et al. 2018, GPS/GLONASS combined Precise Point Positioning with the modeling of highly stable receiver clock in the application of monitoring active seismic deformation, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 123, 4025-4040. <https://doi.org/10.1029/2017JB015060>
- Cherniak, I. & Zakharenkova, I. 2018, Ionospheric total electron content response to the great American solar eclipse of 21 August 2017, *Geophys. Res. Lett.*, 45, 1199-1208. <https://doi.org/10.1002/2017GL075989>
- Choi, B.-K., Roh, K.-M., & Lee, S. J. 2014, Development of a Combined GPS/GLONASS PPP Method, *JPNT*, 3, 31-36. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2014.3.1.031>
- 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>
- El-Mowafy, A., Deo, M., & Rizos, C. 2016, On biases in precise point positioning with multi-constellation and multi-frequency GNSS data, *Mea. Sci. Technol.*, 27, 035102, <https://doi.org/10.1088/0957-0233/27/3/035102>
- Geng, J. & Bock, Y. 2016, GLONASS fractional-cycle bias estimation across inhomogeneous receivers for PPP ambiguity resolution, *J. Geod.*, 90, 379-396. <https://doi.org/10.1007/s00190-015-0879-0>
- Jakowski, N., Heise, S., Wehrenpfennig, A., Schluter, S., & Reimer, R. 2002, GPS/GLONASS-based TEC measurements as a contributor for space weather forecast, *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 64, 729-735. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(02\)00034-2](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00034-2)
- Wang, F. H., Chen, X., & Guo, F. 2015, GPS/GLONASS combined Precise Point Positioning with receiver clock modeling, *Sensors*, 15, 15478-15493. <https://doi.org/10.3390/s150715478>
- Wang, N., Li, Z., Duan, B., Hugentobler, U., & Wang, L. 2020, GPS and GLONASS observable-specific code bias estimation: Comparison of solutions from the IGS and MGEX networks, *J. Geod.*, 94, 74. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01404-5>
- Wanninger, L. 2012, Carrier-phase inter-frequency biases of GLONASS receivers, *J. Geod.*, 86, 139-148. <https://doi.org/10.1007/s00190-011-0502-y>
- Yasyukevich, Yu. V., Mylnikova, A. A., & Polyakova, A. S. 2014, Estimating the total electron content absolute value from the GPS/GLONASS data, *Results in Physics*, 5, 32-33. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2014.12.006>

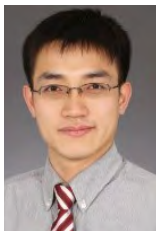
- Zakharenkova, I., Astafyeva, E., & Cherniak, I. 2016, GPS and GLONASS observations of large-scale traveling ionospheric disturbances during the 2015 St. Patrick's Day storm, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, 12138-12156. <https://doi.org/10.1002/2016JA023332>
- Zhang, Q., Tao, J., Liu, X., Hu, Z., & Zhao, Q. 2023, Combined GPS/GLONASS global ionosphere mapping considering the GLONASS inter-frequency differential code bias, *GPS Solut.*, 27, 101. <https://doi.org/10.1007/s10291-023-01446-0>
- Zhu, F.-Y. & Zhou, C. 2025, Modeling and Accuracy Evaluation of Ionospheric VTEC Across China Utilizing CMONOC GPS/GLONASS Observations, *Atmosphere*, 16, 988. <https://doi.org/10.3390/atmos16080988>



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.



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.



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.