








국내 GNSS 오차 성분별 공간 상관성 및 선형 모델링 특성 분석

김성익¹, 이예빈¹, 조용래¹, 차윤호¹, 박병운^{1†}, 박슬기², 박상현²

Analysis of Spatial Correlation and Linear Modeling of GNSS Error Components in South Korea

Sungik Kim¹ , Yebin Lee¹ , Yongrae Jo¹ , Yunho Cha¹ , Byungwoon Park^{1†} , Sul Gee Park² , Sang Hyun Park² 

¹Department of Aerospace Engineering and Department of Convergence Engineering for Intelligent Drone, Sejong University, Seoul 05006, Korea

²Maritime PNT Research Office, Daejeon 34103, Korea

ABSTRACT

Errors included in Global Navigation Satellite System (GNSS) measurements degrade the performance of user position estimation but can be mitigated by spatial correlation properties. Augmentation systems providing correction data can be broadly categorized into State Space Representation (SSR) and Observation Space Representation (OSR) methods. The satellite-based cm-level augmentation service based on the SSR broadcasts correction data via satellite signals, unlike the traditional Real-Time Kinematic (RTK) and Network RTK methods, which use OSR. To provide a large amount of correction data via the limited bandwidth of the satellite communication, efficient message structure design considering service area, correction generation, and broadcast intervals is necessary. For systematic message design, it is necessary to analyze the influence of error components included in GNSS measurements. In this study, errors in satellite orbits, satellite clocks for GPS, Galileo, BeiDou, and QZSS satellite constellations ionospheric and tropospheric delays over one year were analyzed, and their spatial decorrelations and linear modeling characteristics were examined.

Keywords: GNSS, satellite orbit and clock error, ionospheric delay, tropospheric delay

주요어: 위성항법시스템, 위성 궤도 및 시계 오차, 전리층 지연, 대류층 지연

1. INTRODUCTION

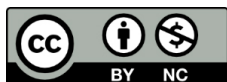
Global Navigation Satellite System (GNSS) 측정치에 포함된 오차 성분들은 사용자 위치 추정 성능을 저하시키는 요인으로 이를 다양한 방법으로 제거하거나 완화시키는 방법들이 연구되어 왔다 (Park et al. 2006, 2013, Yoon et al. 2016, 2020, Son et al. 2019). 이러한 오차 성분들은 외부에서 제공되는 보정정보를 통해 제거할 수 있으며, 그 형태에 따라 크게 State Space Representation (SSR) 방식과 Observation Space Representation (OSR) 방식으로 나눌 수 있다. Network Real-

Time Kinematic는 대표적인 OSR 방식의 보강시스템이며, Virtual Reference Station, Master Auxiliary Concept, Flächen Korrektur parameter 등이 있다 (Park & Kee 2010, Song et al. 2016, Kim et al. 2017). 보정정보를 측정치 성분별로 제공하는 SSR 방식의 보강시스템은 Precise Point Positioning (PPP)와 PPP- Real-Time Kinematic (RTK) 등이 있으며, PPP-RTK의 경우 위성 궤도, 위성 시계, 전리층 지연, 대류층 지연 등의 오차 성분을 모델링하여 제공한다.

이와 같은 보정정보들이 위성과 같은 제한된 대역폭 등 다양한 제약 조건하에서 서비스 영역, 보정정보 해상도 등 주어진 요

Received May 16, 2024 Revised Jun 02, 2024 Accepted Jun 17, 2024

[†]Corresponding Author E-mail: byungwoon@sejong.ac.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.

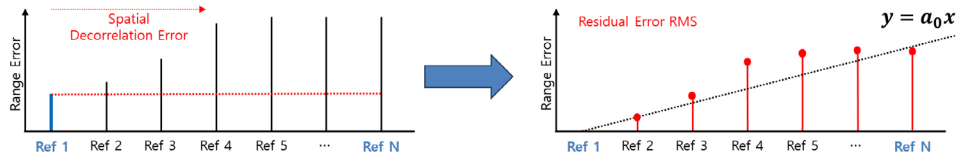


Fig. 1. Spatial decorrelation errors and linear coefficient.

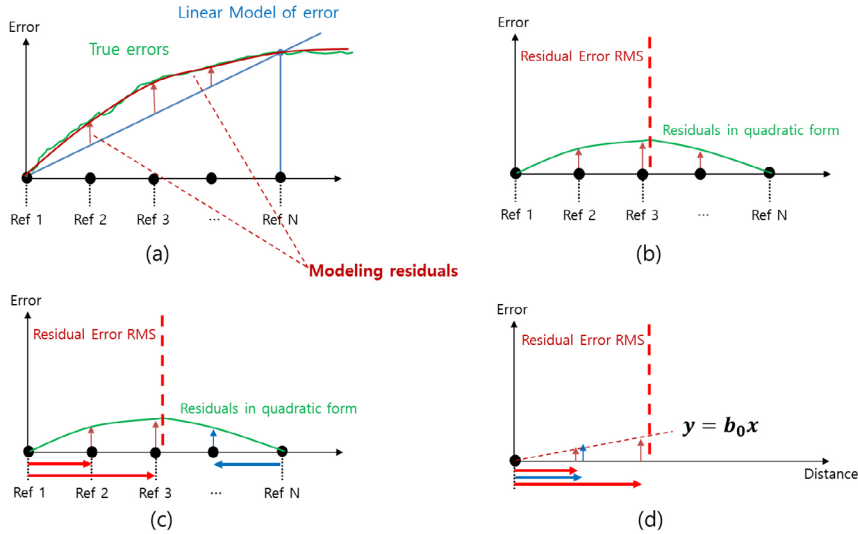


Fig. 2. Linear modeling residuals and linear coefficient.

구조건 달성에 활용되기 위해서는 효과적인 메시지 구조 설계가 요구된다 (Kim et al. 2008, Park & Seo 2021, Lee et al. 2023). 일례로, 위성항법 보정시스템의 다양한 요구조건과 제약 조건 중 서로 상충 관계에 있는 보정정보의 성능과 정보 제공량은 모두 보정정보 메시지에서 정의하는 네트워크의 크기와 연관되어 있다. 이와 같이 보정 메시지의 중요한 설계 요소 중 하나인 네트워크 크기 결정을 위해서는 GNSS 측정치에 포함된 오차 성분별 공간 이격에 의한 비상관성 오차의 정량적인 분석이 요구된다. GNSS 측정치에 포함된 오차 성분들의 일반적인 경향성을 모델링하고자 하는 연구들이 지속적으로 진행되고 있으며 (Klobuchar 1987, Kim & Kim 2014, Landskron & Böhm 2018, Montenbruck et al. 2018, Wang et al. 2021), 본 연구에서는 다양한 GNSS 위성군의 궤도 오차, 시계 오차, 전리층 및 대류층 지연의 국내 공간 이격에 의한 비상관성 오차 및 선형 모델링 특성을 최근 1년 동안의 실측 데이터 기반으로 정량적으로 분석하였다.

이 논문의 2장에서는 오차 성분들의 공간 상관성 및 선형 모델링 특성을 분석하는 방법에 대해 설명하고, 3장에서는 각 오차 성분들을 산출한 방법론에 대해 설명하였다. 4장에서는 각 오차 성분별 1년 동안의 분석 결과를 그리고 이들의 공간 이격에 의한 비상관성 오차 및 선형 모델링 특성 결과를 정리하였고, 5장은 결론이다.

2. SPATIAL DECORRELATION AND MODELING RESIDUAL ERROR ANALYSIS METHOD

오차 성분별 공간 이격에 의한 비상관성 오차 분석을 진행하기 위해 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 일련의 기준국에서 산출한 오차 성분에서 중심 기준국의 오차 성분 값을 일괄적으로 차분한 뒤에 남은 잔여 오차들의 선형 적합 직선의 기울기를 계산한다. 선형 적합은 데이터 처리를 수행한 기간 동안 계산된 잔여 오차들의 Root Mean Square (RMS)와 절댓값의 최댓값 2가지 경우에 대해 진행하였다. 모든 종류의 오차 성분들은 2023년 1월 1일부터 2023년 12월 31일까지 1년 동안 5분 간격으로 산출되었으며, RMS 값은 전체 기간 동안의 데이터에 대한 값이며, 1년치 데이터의 RMS 값을 산출함으로써 오차 성분별 일반적인 상향에서의 공간 이격에 의한 비상관성 오차를 분석할 수 있다. 최댓값은 전체 데이터 중에서 가장 큰 값을 의미하며, 기선거리별 발생할 수 있는 최대오차를 분석할 수 있다.

이 논문에서는 GNSS의 각 오차 성분이 공간상에서 1차 선형 모델을 따른다고 가정한다. Fig. 2a와 같이 동-서와 남-북 방향으로 선택된 기준국들 중에서 중심 기준국과 최장기선 기준국 오차를 이용하여 선형 모델을 산출한다. 이후, 산출된 선형 모델과 나머지 기준국들에서의 오차 간 차이를 모델링 잔여오차로 정의한다. 모델링 잔여오차들은 선형 모델의 정의에 따라 양끝 기준국에서는 그 크기가 0이고, Fig. 2b와 같이 기준국에서 멀어질수록 불확실성이 커지는 2차 포물선 형태로 가정할 수 있다. 이를 공간 비상관성 분석과 같이 선형 적합 직선의 기울기 형태로 분석하기 위해 Fig. 2c와 같이 양끝 기준국 기선 거리에 대해 기준국들을 반으로 나누어 각각 양끝 쪽에 위치한 기준국으로부터의 기선거리에 따른 모델링 잔여오차의 증분을 계산하여 Fig. 2d와 같이 선형

적합 직선의 기울기를 산출한다. 마찬가지로 선형 적합성 분석은 모델링 잔여 오차들의 RMS와 절댓값의 최댓값인 두가지 경우에 대해 진행하였다.

이와 같은 방식으로 측정치 영역에서의 위성 궤도 오차, 전리층 지연, 대류층 지연에 대한 공간 이격에 의한 비상관성 오차 및 선형 모델링 특성을 분석하였다. 네트워크 내에서 허용하는 측정치 오차 최대 값이 주어진 상황에서 위성 궤도 오차, 전리층 지연, 대류층 지연의 모델링 잔여 오차 선형 적합 직선의 기울기를 이용하여 측정치 오차를 오차 성분들의 선형 적합 기울기와 기선 거리의 곱의 Root Sum Square 형태로 모델링하는 방식으로 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

3. COMPUTATION OF MEASUREMENT ERROR SOURCES

3.1 Satellite Orbit Error

위성 궤도 오차는 방송궤도력으로 계산된 위성 위치와 실제 위성 위치의 차이로 인해 발생하는 오차이다. 위성 궤도 오차는 Earth Centered Earth Fixed (ECEF) 좌표계에서 표현된 방송궤도력 위성 위치와 정밀궤도력 위성 위치의 차이로부터 계산할 수 있으며, Eq. (1)과 같다 (Lim et al. 2023).

$$\delta\vec{O} = \vec{X}_{nav}^{sat} - \vec{X}_{sp3}^{sat} \quad (1)$$

여기서 \vec{X}_{nav}^{sat} 는 방송궤도력으로 계산한 위성 위치이며, \vec{X}_{sp3}^{sat} 는 정밀궤도력으로 계산된 위성 위치이다. ECEF 좌표계 상에서 표현된 위성 궤도 오차는 다시 Radial (R), Along-track (T), Cross-track (N) 방향으로 변환하였다. $\delta\vec{O}$ 을 R, T, N 방향으로 나타내기 위해 각 축 방향의 단위 벡터를 ECEF 좌표계 상에서 계산하고, 이를 통해 회전 행렬을 구성하였으며 Eqs. (2-5)와 같다 (Montenbruck et al. 2015, Wang et al. 2021).

$$\vec{e}_R = \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|} \quad (2)$$

$$\vec{e}_T = \vec{e}_N \times \vec{e}_R \quad (3)$$

$$\vec{e}_N = \frac{\vec{r} \times \vec{v}}{|\vec{r} \times \vec{v}|} \quad (4)$$

$$\vec{O}_{RTN} = [\vec{e}_R \quad \vec{e}_T \quad \vec{e}_N]^T \vec{O}_{ECEF} \quad (5)$$

여기서 \vec{r} 은 위성의 위치 벡터이며, \vec{e}_R , \vec{e}_T , \vec{e}_N 은 각각 R, T, N 방향의 단위 벡터, \vec{v} 는 ECEF 상에서 표현된 위성의 관성 좌표계에서의 속도이다. \vec{v} 는 회전 좌표계에서의 미분 관계식에 따라 Eq. (6)과 같이 계산하였다.

$$\vec{v} = \vec{V} + \vec{\omega}_e \times \vec{r} \quad (6)$$

여기서 \vec{V} 는 ECEF 좌표계에서 위성 속도이고, $\vec{\omega}_e$ 는 지구 자전 각속도이다. 측정치 영역 위성 궤도 오차는 Eq. (1)에서 계산된 결

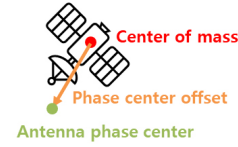


Fig. 3. Antenna phase center and phase center offset.

과를 시선 방향 벡터로 정사영 함으로써 얻을 수 있으며, Eq. (7)과 같다.

$$R_{error} = \delta\vec{O} \cdot \vec{e} \quad (7)$$

일반적으로 방송궤도력과 정밀궤도력으로 구한 위성 위치는 기준점이 서로 다르기 때문에 이를 따로 보상에 주어야 한다. Fig. 3에 나타난 것과 같이 정밀궤도력은 위성의 질량 중심, Center of Mass (CoM)의 위치를 제공하고, 방송궤도력은 안테나 위상 중심, Antenna Phase Center (APC)의 위치를 제공한다. 위성 CoM과 APC 차이를 Phase Center Offset (PCO)라고 하며, International GNSS Service (IGS)에서 APC를 ANTeNA EXchange 형태로 제공하고 있다. 위성 CoM에서 APC로 PCO를 보상하는 방법은 Eq. (8)에 나타내었다.

$$\vec{r}_{APC}^{sat} = \vec{r}_{CoM}^{sat} + R_{ECEF}^{BF} \vec{\Delta}_{APC} \quad (8)$$

여기서 $\vec{\Delta}_{APC}$ 는 위성 동체 좌표계에서 표현된 APC이며, R_{ECEF}^{BF} 는 동체 좌표계에서 ECEF로 변환하는 회전 행렬이다. \vec{r}_{APC}^{sat} 와 \vec{r}_{CoM}^{sat} 는 각각 ECEF에서 표현된 위성 APC 위치와 CoM 위치이다. R_{ECEF}^{BF} 를 구하기 위해서는 위성의 자세 모델을 고려해야 하며, Medium Earth Orbit (MEO) 위성과 Inclined Geosynchronous orbit (IGSO) 기본적으로 Yaw-teering (YS) 자세 모델을 사용하고 Geostationary Orbit (GEO) 위성은 Orbit-normal (ON) 자세 모델을 사용한다 (Strasser et al. 2021). YS 자세 모델의 경우 위성으로부터 태양의 상대 위치를 구할 필요가 있으며, 태양이 가려지는 식 (eclipse)이 발생하는 경우에는 위성군별로 각기 다른 자세 모델을 사용하므로 경우에 따라서는 이들을 모두 고려해야 한다. 본 연구에서는 식이 발생하는 동안에도 모든 위성의 자세 모델은 정상시와 같다고 가정하였으며, 이로 인해 발생할 수 있는 PCO 보상 오차는 최대 15 cm를 넘지 않는다고 알려져 있다 (Montenbruck et al. 2018).

위성 궤도 오차 계산을 위해 방송궤도력은 IGS Multi-GNSS Experiment (MGEX)에서 제공하는 BRDM을 사용하였고, 정밀 궤도력은 MGEX 분석 센터에 소속되어 있는 기관 중 Wuhan University (WHU)에서 제공하는 5분 간격 Final product를 11차 라그랑주 보간법을 통해 사용하였다. 다만, GPS의 경우에는 National Geospatial-Intelligence Agency에서 방송궤도력과 동일한 APC에 대한 정밀궤도력을 제공하기 때문에 별도의 PCO 보상이 바로 사용할 수 있다.

3.2 Satellite Clock Error

위성 시계 오차는 항법메시지에 포함된 시계 오차 관련 계수

를 통해 산출한 값과 Clock Receiver Independent EXchange (RINEX)로 산출한 값의 차이를 계산한다.

$$Clock_{offset}(t_k) = clock^{nav}(t_k) - clock^{CLK}(t_k) - \mu(t_k) \quad (9)$$

여기서 $clock^{nav}(t_k)$ 는 항법메시지로 계산한 위성 시계 오차이고, $clock^{CLK}(t_k)$ 는 Clock RINEX로 계산한 위성 시계 오차이다. $\mu(t_k)$ 는 분석 기관이 제공하는 Clock RINEX에 포함된 위성과 무관한 시계 편차 값으로 시계 오차 분석에서 제거할 필요가 있다 (Wang et al. 2021). 본 연구에서는 $\mu(t_k)$ 를 구하기 위해 위성군별로 위성 시계 오차에 앙상블 평균을 적용한 뒤에 이를 제거하였다. 항법메시지의 경우 위성 궤도와 동일하게 BRDM을 사용하였고, Clock RINEX는 WHU에서 제공하는 30초 간격 데이터를 선형 보간하여 사용하였다.

3.3 Ionospheric Delay

유럽의 Center for Orbit Determination in Europe에서는 IONosphere Exchange (IONEX) 형태로 Global Ionosphere Map (GIM)을 1시간 간격으로 제공하며, GIM은 격자 형태로 분할된 지점들의 Vertical Total Electron Content (VTEC) 값을 제공한다. 특정 위성의 신호가 전리층을 통과하는 지점인 Ionospheric Pierce Point (IPP) 위치에서의 VTEC을 GIM에서 보간법을 통해 계산한 뒤에 사상함수를 곱하여 최종적으로 Eq. (10)과 같이 전리층 지연을 산출한다 (Bang & Lee 2013, Park et al. 2022).

$$I_f = \frac{40.3 \cdot 10^{16}}{f^2} \cdot F \cdot VTEC \quad (10)$$

여기서 f 는 위성 신호의 주파수이며, F 는 사상함수이다. VTEC을 보간하는 방법으로 IONEX 공식 문서에서는 IPP의 위치, 시간, 지구자전의 영향까지 고려한 보간 방식을 사용할 것을 권고하고 있으며, 본 연구에서는 해당 방식을 통해 전리층 지연을 계산하였다 (Schaer et al. 1998).

3.4 Tropospheric Delay

대류층 지연은 특정 지점에서의 수직 지연과 사상함수의 곱의 형태로 표현할 수 있으며, 습윤 지연 부분과 건조 지연 부분으로 나눌 수 있다 (Song et al. 2016, Yun & Park 2024).

$$T_r = T_{r,zhd}M_{r,dry}(E) + T_{r,zwd}M_{r,wet}(E) \quad (11)$$

여기서 $T_{r,zhd}$, $T_{r,zwd}$ 은 각각 수직 건조 지연, 수직 습윤 지연이며, $M_{r,dry}(E)$, $M_{r,wet}(E)$ 은 각각 건조 지연과 습윤 지연에 해당하는 사상함수, E 는 위성 앙각이다. 본 연구에서는 대류층 지연에서 습윤 지연 부분에 대해서만 분석을 수행하였고, 습윤 지연은 Natural Resource Canada에서 운영하는 Canadian Spatial Reference System–Precise Point Positioning Service에서 추정된 수직 습윤 지연에 Neill Mapping Function을 곱하여 사용하였다.

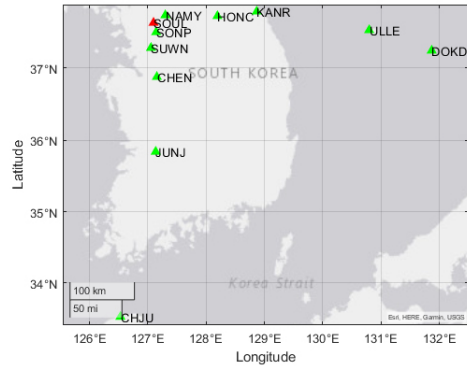


Fig. 4. Distribution of stations.

Table 1. Satellite classification.

GNSS	Orbit type	Blocks
GPS	MEO	2A, 2RA, 2RB
GPS	MEO	2RM
GPS	MEO	2F
GPS	MEO	3A, 3F
Galileo	MEO	FOC
BeiDou	MEO	2M
BeiDou	MEO	3M, 3SM
BeiDou	IGSO	2I
BeiDou	IGSO	3I, 3SI
BeiDou	GEO	2G
QZSS	IGSO	1, 2I, 2A
QZSS	GEO	2G

4. MEASUREMENT ERROR SOURCES ANALYSIS RESULTS

4.1 Distribution of Stations and Duration

위성 궤도 및 시계 오차, 전리층 지연, 대류층 지연에 대한 데이터 처리는 2023년 1월 1일부터 2023년 12월 31일까지 총 1년의 기간에 대해 이루어졌으며, 공간 이격에 의한 비상관성 오차 및 선형 모델링 오차 분석을 위해 사용된 기준국 배치 분포는 Fig. 4와 같이 남북, 동서 방향으로 기선 거리별 경향성을 볼 수 있도록 구성하였다. 측정치 영역 위성 궤도 오차, 전리층 지연, 대류층 지연에서 Elevation mask는 모두 10°로 설정하였다.

4.2 Satellite Orbit Error Results

위성 궤도 오차 분석시 위성군별, 궤도 종류별, 세대별로 분류하기 위해 IGS에서 제공하는 Metadata를 참고하였으며, IGS Metadata에서는 각 위성군의 Satellite Vehicle Number 별로 해당 위성이 포함된 궤도 종류 및 세대 정보 등을 Solution INdependent EXchange 형태로 제공한다 (Steigenberger & Montenbruck 2022). Table 1은 위성 궤도 오차 분석을 위해 위성을 궤도 종류별, 세대별로 분류한 것을 도시하였다.

Tables 2와 3은 Table 1에서 분류한 그룹별 2023년 1년 동안의 위성 위치 오차의 R, T, N 방향에 대한 RMS 및 최댓값을 나타낸다. Table 2의 결과로부터 GPS는 R, T, N 방향 모두에서 세대별

Table 2. RMS values of satellite orbit errors.

GNSS	Orbit type	Blocks	RMS (m)		
			R	T	N
GPS	MEO	2A, 2RA, 2RB	0.14	1.10	0.40
GPS	MEO	2RM	0.15	1.15	0.41
GPS	MEO	2F	0.18	1.06	0.39
GPS	MEO	3A, 3F	0.13	1.12	0.45
Galileo	MEO	FOC	0.12	0.26	0.17
BeiDou	MEO	2M	1.06	1.48	0.50
BeiDou	MEO	3M, 3SM	0.08	0.36	0.33
BeiDou	IGSO	2I	1.71	1.30	0.93
BeiDou	IGSO	3I, 3SI	0.16	0.60	0.57
BeiDou	GEO	2G	1.90	9.43	2.12
QZSS	IGSO	1, 2I, 2A	0.64	0.53	0.31
QZSS	GEO	2G	1.15	2.23	3.90

Table 3. Maximum values of satellite orbit errors.

GNSS	Orbit type	Blocks	MAX (m)		
			R	T	N
GPS	MEO	2A, 2RA, 2RB	1.13	7.52	4.60
GPS	MEO	2RM	0.95	9.43	2.14
GPS	MEO	2F	1.23	7.79	2.38
GPS	MEO	3A, 3F	0.81	8.51	2.32
Galileo	MEO	FOC	0.93	1.87	0.97
BeiDou	MEO	2M	3.76	9.20	3.38
BeiDou	MEO	3M, 3SM	0.71	3.70	2.50
BeiDou	IGSO	2I	5.22	10.48	7.75
BeiDou	IGSO	3I, 3SI	0.98	4.62	3.92
BeiDou	GEO	2G	6.17	35.91	16.15
QZSS	IGSO	1, 2I, 2A	2.82	2.83	1.33
QZSS	GEO	2G	6.95	14.14	8.41

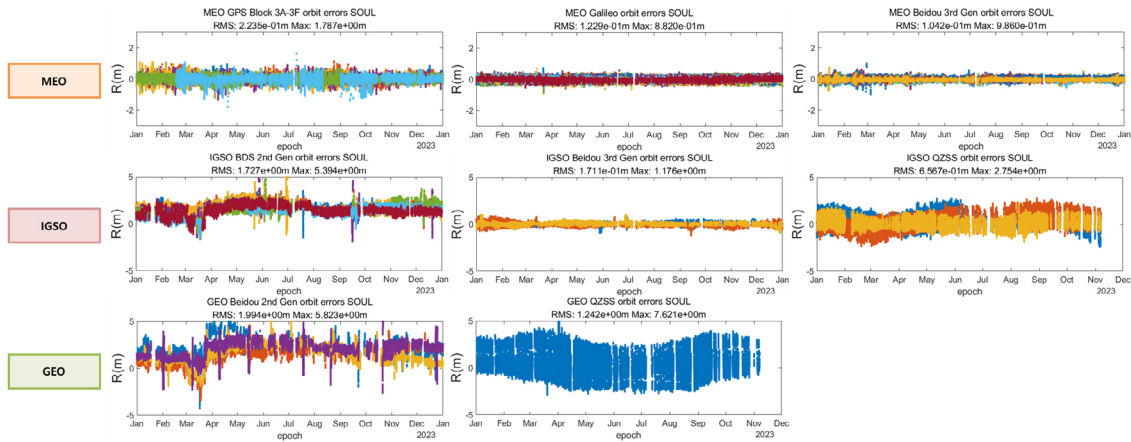


Fig. 5. Measurement domain satellite orbit errors at SOUL for GPS, BDS, Galileo and QZSS.

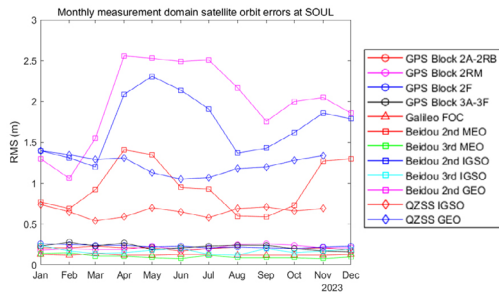


Fig. 6. Monthly measurement domain satellite orbit errors at SOUL.

로 비슷한 값을 가져 정확도에 큰 차이가 없음을 알 수 있으며, BeiDou는 2세대보다 3세대에서의 정확도가 상당히 개선된 것을 확인할 수 있다. 궤도 종류에 따른 차이의 경우, 모든 축방향에 대해 QZSS, BeiDou GEO 위성들의 위치 오차가 RMS 기준 수 m 수준의 정확도이며, MEO, IGSO 위성군들과 비교하였을 때 그 차이가 두드러지게 나타난다. 특히, GEO 위성의 경우 Table 3에서 확인할 수 있는 것처럼 T 방향에서는 최대 수십 m 수준까지 오차가 발생한다.

Fig. 5는 Table 1에 분류한 그룹의 서울 기준국에서의 측정치 영역 위성 궤도 오차 전체 중에서 공간상의 제약으로 일부를 그래프로 나타낸 것으로 서로 다른 위성별 결과를 각각의 색으로

Table 4. Measurement domain satellite orbit errors.

GNSS	Orbit type	Blocks	R (m)	
			RMS	MAX
GPS	MEO	2A, 2RA, 2RB	0.20	1.81
GPS	MEO	2RM	0.21	1.68
GPS	MEO	2F	0.23	1.70
GPS	MEO	3A, 3F	0.22	1.79
Galileo	MEO	FOC	0.12	0.88
BeiDou	MEO	2M	1.01	3.28
BeiDou	MEO	3M, 3SM	0.10	0.99
BeiDou	IGSO	2I	1.73	5.39
BeiDou	IGSO	3I, 3SI	0.17	1.18
BeiDou	GEO	2G	1.99	5.82
QZSS	IGSO	1, 2I, 2A	0.66	2.75
QZSS	GEO	2G	1.24	7.62

표시하였으며, Fig. 6은 Fig. 5에 도시한 그룹을 포함한 모든 그룹에 대한 측정치 영역 위성 궤도 오차의 월별 RMS 값을 도시한 것이다. 또한, Table 4에 모든 그룹에 대한 1년 동안의 측정치 영역 위성 위치 오차의 RMS 및 최댓값의 결과를 요약하였다. Fig. 6에서 전반적으로 MEO 위성군의 측정치 영역 정확도가 큰 변화 없이 일정하게 나타나고 있음을 알 수 있다. Table 4로부터 QZSS GEO, BeiDou 2세대 위성군의 측정치 영역 궤도 오차는 모두 m 수준을 가지고 있으며 이들을 제외한 나머지는 그보다 작은 dm 수준의 오차를 가진다. Fig. 5를 통해 MEO와 IGSO 대비 GEO 위성에서 측정치 영역 위성 위치 오차가 편향된 형태가 보임을 알

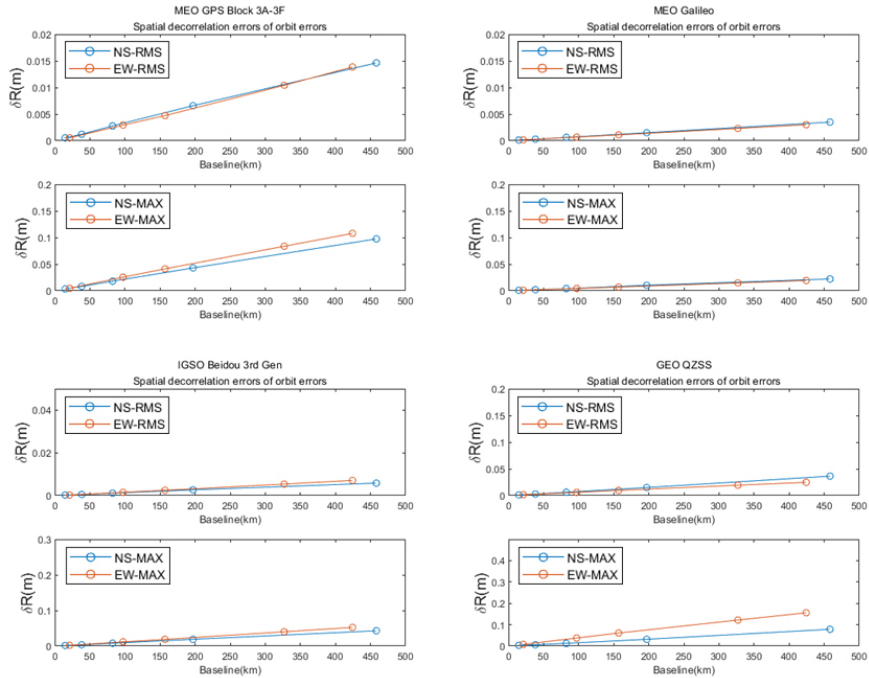


Fig. 7. Spatial decorrelation errors of satellite orbit errors.

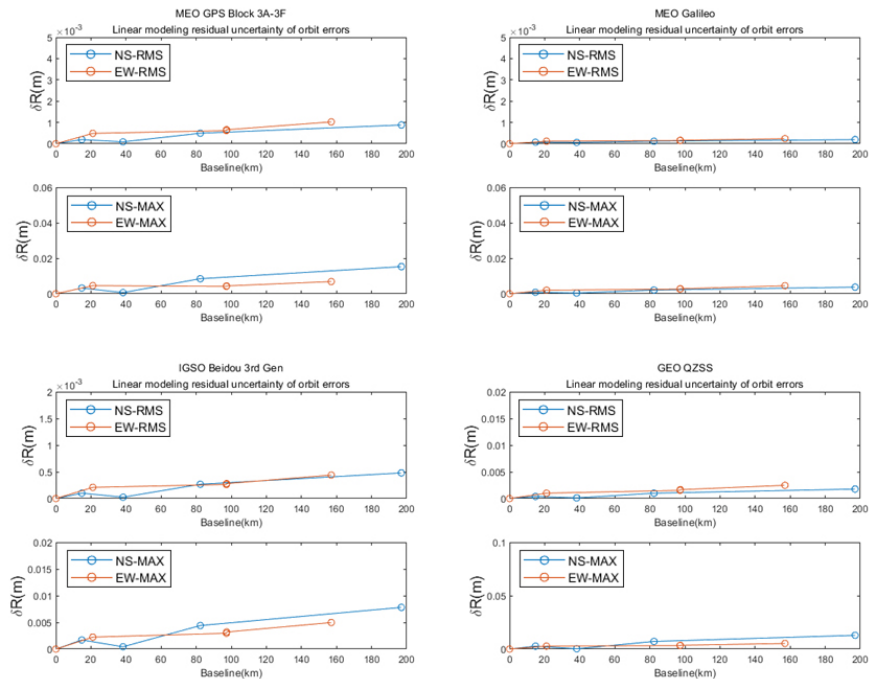


Fig. 8. Linear modeling residual uncertainty of satellite orbit errors.

수 있다.

Figs. 7과 8은 Figs. 1과 2에 표현된 방식과 같이 서울 기준국을 중심으로 각각 남북, 동서 방향으로 배치된 기준국들에 대해 기선 거리에 따른 측정치 영역 위성 위치 오차의 공간 이격에 의한 비상관성 오차 및 선형 모델링 잔여 오차의 RMS 및 최댓값을 나타낸다. 그리고 Tables 5와 6은 기선 거리에 따른 공간 이격에 의

한 비상관성 오차와 모델링 잔여 오차의 선형 적합 계수를 part per million (ppm)으로 명시하였다. Table 5에서 공간 이격에 의한 비상관성 오차의 선형 적합이 2세대 BeiDou GEO 위성에서 남북, 동서 방향으로 약 2배 정도 차이가 발생하면서 남북, 동서 방향의 경향성이 서로 다른 것을 확인할 수 있다. MEO, IGSO 위성군에서는 남북과 동서 방향의 공간 이격에 의한 비상관성 오

Table 5. Linear fitting coefficients for spatial decorrelation errors of satellite orbit errors.

GNSS	Orbit type	Blocks	a_0 (mm/km)			
			North-south		East-west	
			RMS	MAX	RMS	MAX
GPS	MEO	2A, 2RA, 2RB	0.03	0.31	0.03	0.38
GPS	MEO	2RM	0.03	0.22	0.03	0.23
GPS	MEO	2F	0.03	0.30	0.03	0.23
GPS	MEO	3A, 3F	0.03	0.21	0.03	0.26
Galileo	MEO	FOC	0.008	0.05	0.007	0.05
BeiDou	MEO	2M	0.04	0.28	0.03	0.22
BeiDou	MEO	3M, 3SM	0.01	0.17	0.01	0.13
BeiDou	IGSO	2I	0.02	0.17	0.03	0.24
BeiDou	IGSO	3I, 3SI	0.01	0.09	0.02	0.12
BeiDou	GEO	2G	0.10	0.54	0.23	0.90
QZSS	IGSO	1, 2I, 2A	0.01	0.04	0.01	0.07
QZSS	GEO	2G	0.08	0.17	0.06	0.37

Table 6. Linear fitting coefficients for modeling residual uncertainty of satellite orbit errors.

GNSS	Orbit type	Blocks	b_0 (mm/km)			
			North-south		East-west	
			RMS	MAX	RMS	MAX
GPS	MEO	2A, 2RA, 2RB	0.004	0.14	0.005	0.17
GPS	MEO	2RM	0.004	0.05	0.006	0.05
GPS	MEO	2F	0.004	0.06	0.006	0.09
GPS	MEO	3A, 3F	0.005	0.08	0.007	0.05
Galileo	MEO	FOC	0.001	0.02	0.002	0.03
BeiDou	MEO	2M	0.005	0.07	0.008	0.11
BeiDou	MEO	3M, 3SM	0.002	0.09	0.003	0.17
BeiDou	IGSO	2I	0.005	0.05	0.005	0.08
BeiDou	IGSO	3I, 3SI	0.003	0.04	0.003	0.03
BeiDou	GEO	2G	0.03	0.15	0.02	0.13
QZSS	IGSO	1, 2I, 2A	0.002	0.009	0.001	0.008
QZSS	GEO	2G	0.009	0.07	0.02	0.04

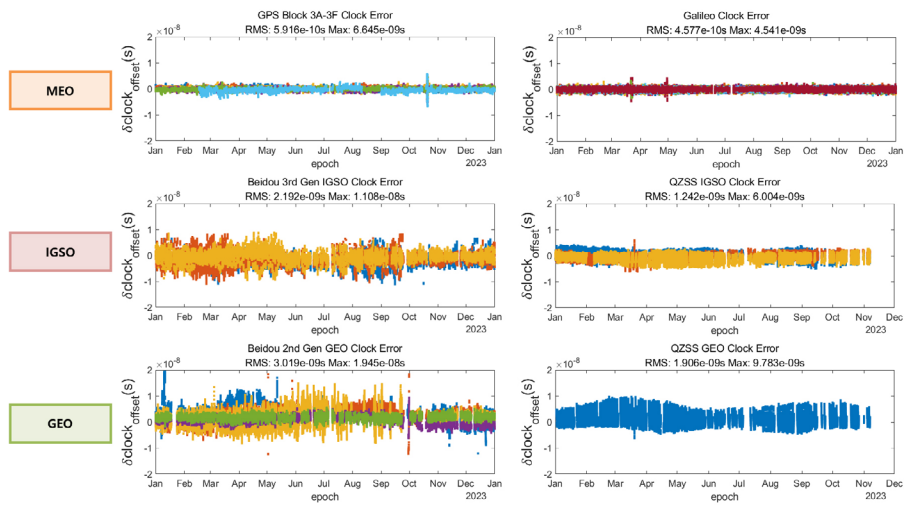


Fig. 9. Results of satellite clock errors.

차가 0.01~0.03 ppm 수준으로 거의 동일함을 알 수 있다. 2세대 BeiDou GEO 같은 경우, 선형 적합 계수가 RMS 기준 남북 방향으로 약 0.1 ppm, 동서 방향으로 약 0.2 ppm을 가지며, 동서 방향으로의 공간 간격에 의한 비상관성 오차가 상대적으로 크게 나타났다. QZSS GEO도 IGSO에 비하여 오차량이 큰 것으로 확인하였다.

각 오차를 선형 모델링하고 남은 잔여오차의 경우 모든 위성군에 대해 선형 적합 값이 Table 6에 나타난 것과 같이 남북, 동서 방향으로 비슷하게 나타나 방향성에 따른 차이는 두드러지지 않았다. 다만 GEO의 경우 RMS 기준 10^{-2} ppm 수준으로 여타 위성의 10^{-3} ppm에 비해 미세하게 크게 나타났다.

4.3 Satellite Clock Error Results

Figs. 9와 10은 각각 위성 시계 오차 분석 결과를 그래프와 월별 통계치 형태로 나타내고 있으며, Table 7은 위성 시계 오차의 RMS 및 최댓값 결과를 표의 형태로 보여준다. Galileo와 GPS Block 3A-3F가 위성 시계 정확도가 0.1 ns 수준으로 가장 높은 것을 확인할 수 있으며, BeiDou의 경우, 3세대 MEO 위성군을 제외

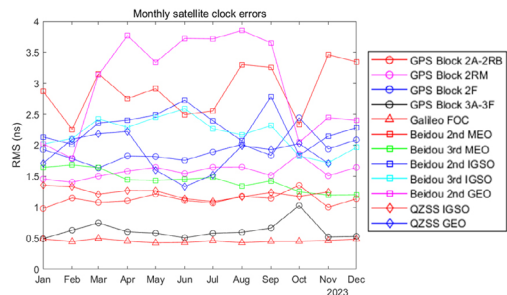


Fig. 10. Monthly satellite clock errors.

하고는 RMS 기준 2 ns 이상의 시계 정확도를 가지며 다른 GNSS 위성군에 비해 낮은 정확도를 보인다. 또한 위성 궤도 종류에 따른 차이도 확인할 수 있는데, GEO 위성의 경우 앞의 측정치 영역 위성 위치 오차와 유사하게 Fig. 9에서 확인할 수 있는 것처럼 시계 오차에서 편향된 양상을 가지고 있다. 또한 GPS Block 2F에는 Cesium, Rubidium 2가지 종류의 원자시계가 있으며, 이 두 시계에 대한 결과를 Fig. 11에 그래프 형태로 도시하였다. 이를 통해 Cesium 원자 시계가 Rubidium 원자 시계 보다 다소 성능이 좋지

Table 7. Satellite clock errors.

GNSS	Orbit type	Blocks	Clock error (ns)	
			RMS	MAX
GPS	MEO	2A, 2RA, 2RB	1.10	9.41
GPS	MEO	2RM	1.57	12.77
GPS	MEO	2F	1.90	22.90
GPS	MEO	3A, 3F	0.59	6.65
Galileo	MEO	FOC	0.46	4.54
BeiDou	MEO	2M	2.82	19.06
BeiDou	MEO	3M, 3SM	1.44	12.39
BeiDou	IGSO	2I	2.26	15.96
BeiDou	IGSO	3I, 3SI	2.19	11.08
BeiDou	GEO	2G	3.02	19.45
QZSS	IGSO	1, 2I, 2A	1.24	6.00
QZSS	GEO	2G	1.91	9.78

Table 8. Slant ionospheric delay results at CHJU for L1 frequency.

Elevation angle (degree)	Slant ionospheric delay (m)	
	RMS	MAX
overall	9.92	62.08
10-20	16.31	62.08
20-30	11.52	49.94
30-40	8.85	38.14
40-50	7.25	29.17
50-60	6.75	24.60
60-70	5.53	20.47
70-80	5.58	17.46
80-90	5.04	16.33

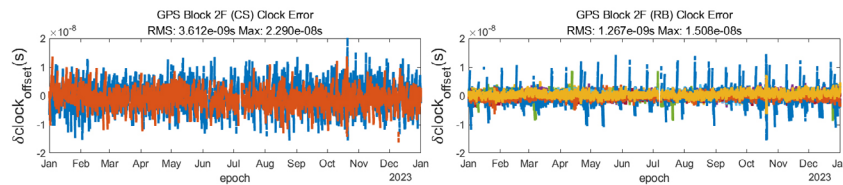


Fig. 11. Satellite clock errors for different clock type of GPS block 2F.

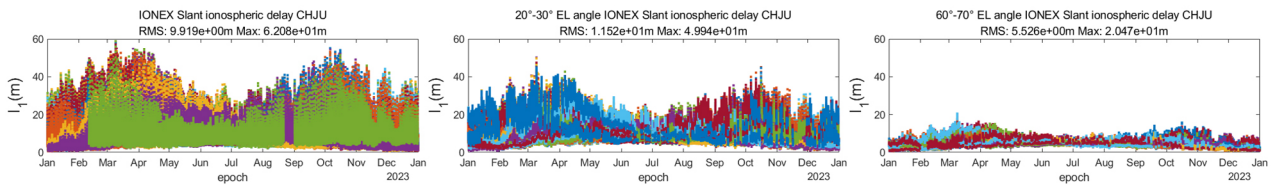


Fig. 12. Slant ionospheric delay at CHJU for L1 frequency.

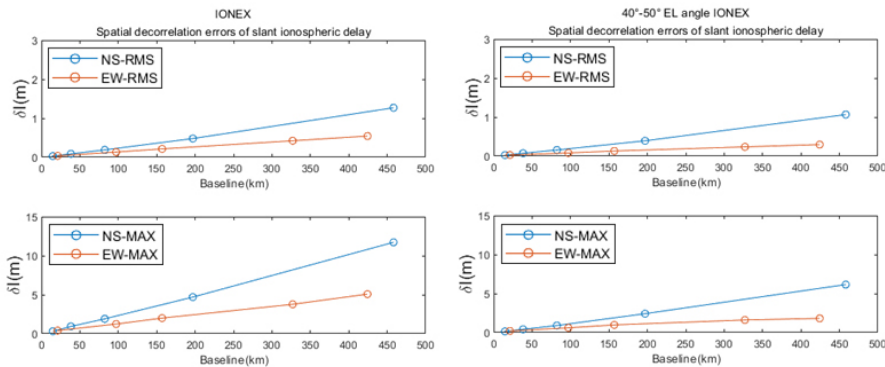


Fig. 13. Spatial decorrelation errors of slant ionospheric delay.

않은 것을 알 수 있다.

4.4 Ionospheric Delay Results

Fig. 12와 Table 8은 제주 기준국에서 1년 동안 GPS 위성군에 대해 전리층 경사 지연의 변화를 전체 양각 범위에 대한 값과 세부 양각 구간별 값을 각각 그래프와 표로 정리한 것이다. Fig. 12와 Table 8로부터 위성 양각이 작아질수록 사상함수의 영향으로 전리층 경사 지연의 값이 커지는 것을 알 수 있으며, GPS 위성군에 대해 RMS로 약 10 m 수준, 최대 60 m 정도의 전리층 지연이

발생할 수 있음을 확인할 수 있다.

Figs. 13과 14는 앞의 위성 궤도 오차와 마찬가지로 서울 기준국을 중심으로 각각 남북, 동서 방향으로 배치된 기준국들에 대해 기선 거리에 따른 전리층 지연의 공간 이격에 의한 비상관성 오차 및 선형 모델링 잔여 오차의 RMS 및 최댓값을 나타내며, Tables 9와 10은 이들의 선형 적합 계수를 ppm으로 명시하였다. Table 9에서 GPS 위성군에 대한 공간 이격에 의한 비상관성 오차의 선형 적합 계수가 남북 방향으로 RMS 약 2.7 ppm, 동서 방향으로 약 1.3 ppm으로 2배 정도 차이가 나며, 모든 위성 양각에 대해 남북 방향의 공간이격 오차 선형 적합 계수가 동서보다 큰 것

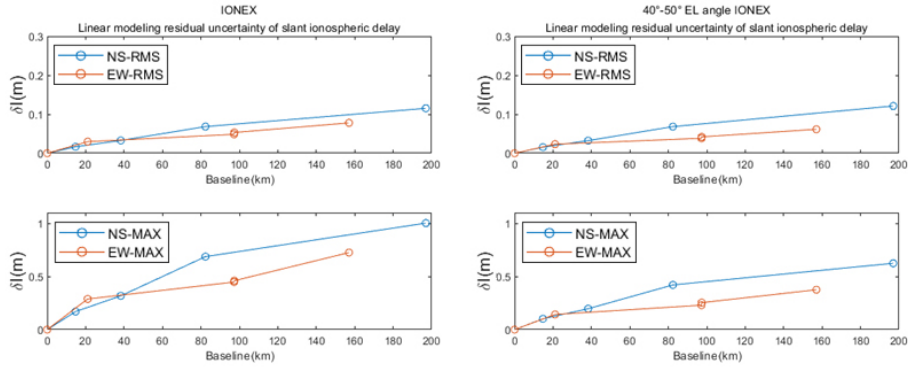


Fig. 14. Linear modeling residual uncertainty of slant ionospheric delay.

Table 9. Linear fitting coefficients for spatial decorrelation errors of slant ionospheric delay.

Elevation angle (degree)	a_0 (mm/km)			
	North-south		East-west	
	RMS	MAX	RMS	MAX
overall	2.70	25.24	1.30	11.92
10-20	3.79	25.24	2.16	11.92
20-30	3.31	20.57	1.53	9.11
30-40	2.73	15.15	1.09	6.27
40-50	2.26	13.18	0.72	4.73
50-60	1.91	10.81	0.63	3.61
60-70	1.60	10.46	0.51	2.78
70-80	1.82	10.06	0.46	2.21
80-90	1.51	9.70	0.43	1.91

Table 10. Linear fitting coefficients for modeling residual uncertainty of slant ionospheric delay.

Elevation angle (degree)	b_0 (mm/km)			
	North-south		East-west	
	RMS	MAX	RMS	MAX
overall	0.63	5.68	0.52	4.73
10-20	0.67	5.68	0.78	4.73
20-30	0.65	4.42	0.67	3.74
30-40	0.62	3.59	0.53	3.04
40-50	0.66	3.52	0.41	2.47
50-60	0.55	2.98	0.35	2.34
60-70	0.57	2.59	0.27	2.13
70-80	0.61	2.47	0.31	2.18
80-90	0.43	1.68	0.27	1.75

으로 나타났다. 또한, 선형 모델링 잔여 오차의 선형 적합 계수의 경우에도, 남북 방향으로 RMS 약 0.6 ppm, 동서 방향으로 약 0.5 ppm으로 공간 이격에 의한 비상관성 오차의 경향과 동일하게 나타났다.

Fig. 15는 제주 기준국에서 같은 기간 동안 GPS 위성군에 대해 IPP 지점에서의 전리층 수직 지연의 변화를 그래프로 도시한 것이며, 그래프 상단에 전체 기간에 대한 RMS 값과 최대값을 표기하였다. 경사지연과 비교하였을 때 경사지연은 RMS 기준 약 10 m, 최대 62 m까지 오차가 발생하는 반면에 수직지연은 사상함수의 영향이 없어 RMS 기준 약 6 m, 최대 24 m로 거의 절반 이하의 수준을 보였다. Figs. 16과 17은 전리층 수직 지연의 공간 이격에 의한 비상관성 오차 및 선형 모델링 잔여 오차의 RMS 및 최대값을 그래프로 도시한 것이며, Tables 11과 12는 이들의 선형 적합

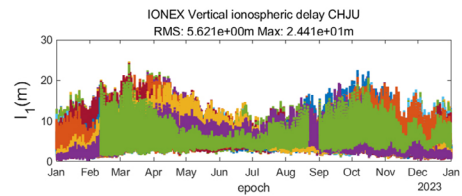


Fig. 15. Vertical ionospheric delay at CHJU for L1 frequency.

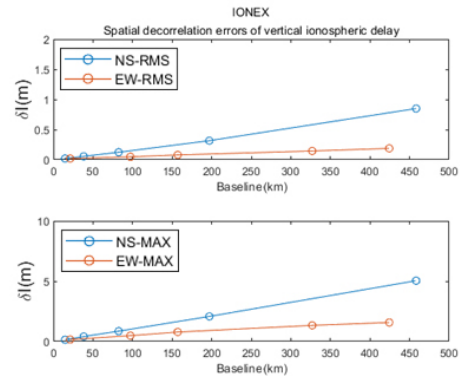


Fig. 16. Spatial decorrelation errors of vertical ionospheric delay.

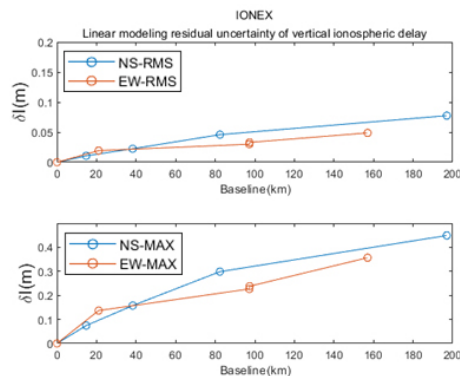


Fig. 17. Linear modeling residual uncertainty of vertical ionospheric delay.

계수 결과를 도시한다. 공간 이격에 의한 비상관성 오차 선형 적합 계수가 남북 방향으로 약 1.8 ppm, 동서 방향으로 0.45 ppm으로 나타났으며, 선형 모델링 잔여 오차의 선형 적합 계수도 남북

Table 11 . Linear fitting coefficients for spatial decorrelation errors of vertical ionospheric delay.

Elevation angle (degree)	a_0 (mm/km)			
	North-south		East-west	
	RMS	MAX	RMS	MAX
overall	1.80	10.92	0.45	3.98

Table 12 . Linear fitting coefficients for modeling residual uncertainty of vertical ionospheric delay.

Elevation angle (degree)	b_0 (mm/km)			
	North-south		East-west	
	RMS	MAX	RMS	MAX
overall	0.42	2.54	0.32	2.37

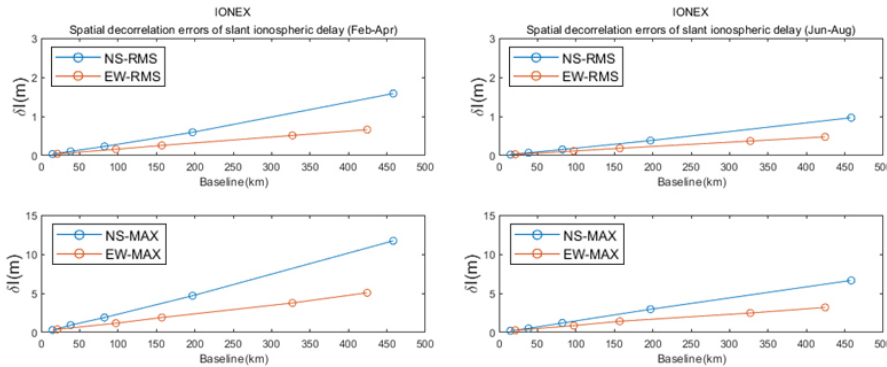


Fig. 18. Spatial decorrelation errors of slant ionospheric delay for specific durations.

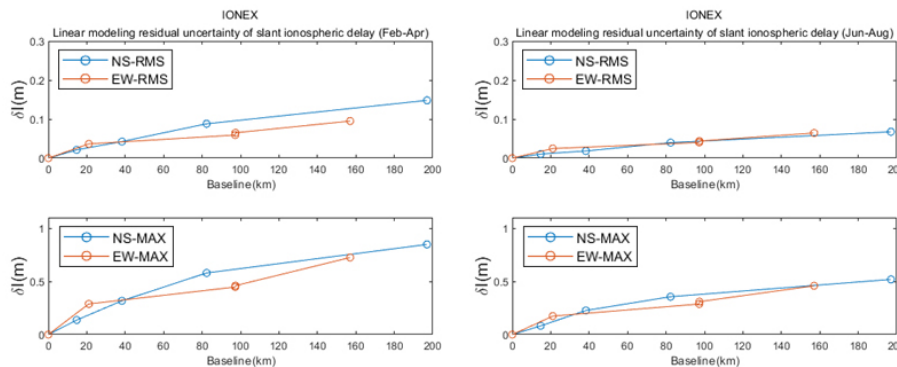


Fig. 19. Linear modeling residual uncertainty of slant ionospheric delay for specific durations.

방향이 동서보다 상대적으로 큰 값을 가지는 것으로 확인하였다. 또한, Fig. 12를 보면 계절에 따라 전리층 활동이 상대적으로 활발한 시기와 상대적으로 작은 시기가 있는 것을 확인할 수 있는데, 이와 비슷한 맥락으로 시간대에 따라 낮시간과 밤시간에서의 전리층 활동의 상대적인 차이에 의한 전리층 지연 선형적합 계수의 변화가 있을 것으로 예상할 수 있다. Figs. 18과 19는 전리층 활동이 상대적으로 활발한 2-4월, 상대적으로 작은 6-8월 기간 동안 전리층 지연의 공간 이격에 의한 비상관성 오차 및 선형 모델링 잔여 오차의 RMS 및 최대값을 나타내며, Figs. 20과 21은 낮 시간과 밤시간에 대한 결과를 나타낸다. 그리고 이들의 선형적합 계수의 결과들을 Tables 13과 14에 요약하였다. Figs. 18과 19로부터 전리층 활동이 상대적으로 활발한 시기에 남북, 동서 방향으로의 공간 이격에 의한 비상관성 오차 및 선형 모델링 특성의 차이가 상대적으로 활동이 작은 시기에 비해 두드러지게 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 마찬가지로 Figs. 20과 21에서 낮시간과 밤시간의 결과의 차이도 유사한 양상을 보인다. Table 13에서 공간 이격에 의한 비상관성 오차 선형 적합 계수가 모든 기간에

대해 RMS 값으로 남북 방향이 동서 방향 보다 약 2배 정도 큰 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 이를 시간대별로 나누어서 보면 2-4월, 낮시간의 남북 방향에서의 공간 이격에 의한 비상관성 오차 선형 적합 계수가 RMS 값으로 약 3 ppm, 동서 방향으로 약 1.5 ppm을 나타내고, 6-8월, 밤시간의 남북 방향에서는 약 2 ppm, 동서 방향에서 약 1 ppm을 가지면서 모두 전리층 활동이 상대적으로 활발한 시기에 공간 이격에 의한 비상관성 오차가 더 커지는 것을 확인할 수 있다. 이는 모델링 잔여 오차의 선형 적합 계수에 서도 확인할 수 있다.

따라서, 전리층 활동에 직접적인 영향을 주는 위도 변화 방향인 남북 방향의 차이와 전리층 활동이 활발한 시기에 상대적으로 큰 공간 비상관성을 야기할 뿐 아니라, GNSS 전리층 지연의 선형 모델링 특성도 저하시키는 것으로 파악된다.

4.5 Tropospheric Delay Results

Figs. 22와 23은 서울 기준국에서 대류층 수직 습윤 지연 및 위

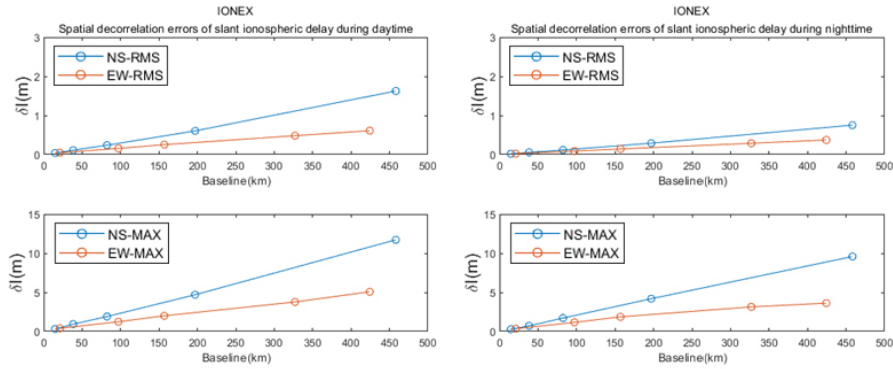


Fig. 20. Spatial decorrelation errors of slant ionospheric delay for daytime and nighttime.

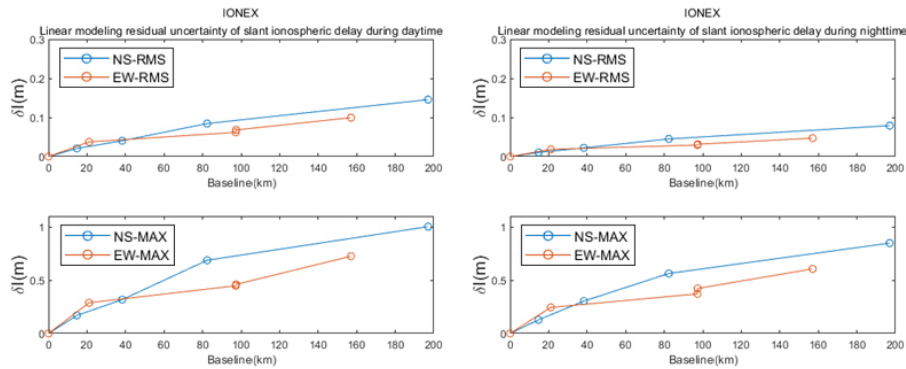


Fig. 21. Linear modeling residual uncertainty of slant ionospheric delay for daytime and nighttime.

Table 13. Linear fitting coefficients for spatial decorrelation errors of slant ionospheric delay for specific durations.

Duration	a_0 (mm/km)			
	North-south		East-west	
	RMS	MAX	RMS	MAX
Feb-Apr	3.38	25.24	1.58	11.86
Jun-Aug	2.08	14.60	1.14	7.74
Daytime	3.46	25.24	1.47	11.92
Nighttime	1.61	20.95	0.88	9.26

Table 14. Linear fitting coefficients for modeling residual uncertainty of slant ionospheric delay for specific durations.

Duration	b_0 (mm/km)			
	North-south		East-west	
	RMS	MAX	RMS	MAX
Feb-Apr	0.81	4.84	0.63	4.73
Jun-Aug	0.37	2.99	0.43	3.04
Daytime	0.79	5.68	0.66	4.73
Nighttime	0.43	4.80	0.31	4.03

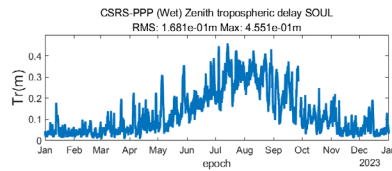


Fig. 22. Zenith tropospheric wet delay at SOUL.

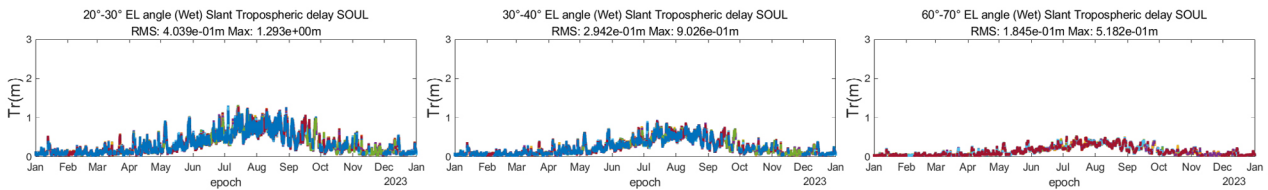


Fig. 23. Slant tropospheric wet delay at SOUL.

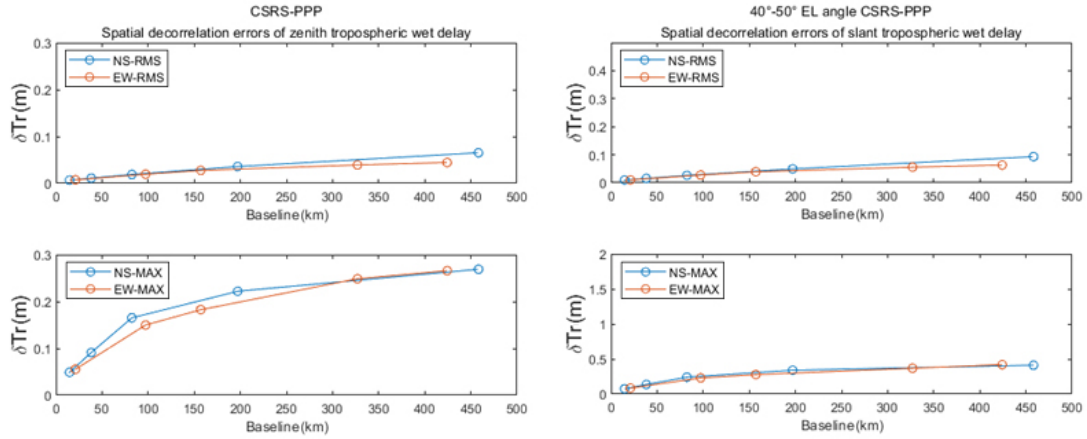


Fig. 24. Spatial decorrelation errors of tropospheric wet delay.

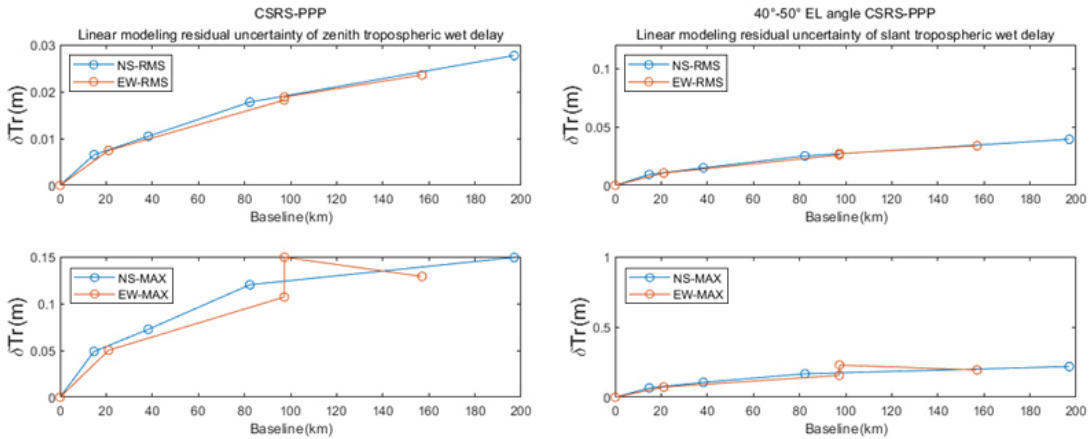


Fig. 25. Linear modeling residual uncertainty of tropospheric wet delay.

Table 15. Tropospheric wet delay results at SOUL.

Elevation angle (degree)	Tropospheric wet delay (m)	
	RMS	MAX
Zenith	0.17	0.46
10-20	0.68	2.51
20-30	0.40	1.29
30-40	0.29	0.90
40-50	0.24	0.69
50-60	0.20	0.58
60-70	0.18	0.52
70-80	0.17	0.47
80-90	0.17	0.46

Table 16. Linear fitting coefficients for spatial decorrelation errors of tropospheric wet delay.

Elevation angle (degree)	a_0 (mm/km)			
	North-south		East-west	
	RMS	MAX	RMS	MAX
Zenith	0.15	0.74	0.12	0.74
10-20	0.65	4.49	0.56	4.44
20-30	0.37	2.20	0.30	2.25
30-40	0.27	1.49	0.21	1.51
40-50	0.21	1.12	0.17	1.14
50-60	0.19	0.97	0.14	0.97
60-70	0.17	0.84	0.13	0.83
70-80	0.16	0.78	0.12	0.76
80-90	0.15	0.73	0.12	0.73

성 양각별 경사 습윤 지연의 결과를 그래프로 각각 도시한 것이다. 그래프를 통해 습윤 지연이 7, 8월에 상대적으로 큰 값을 가지고, 전후로 줄어드는 양상을 확인할 수 있다. Table 15는 대류층 습윤 지연의 RMS 및 최대값을 표로 나타낸 것이다. 위성 양각의 범위가 20°~50°인 구간에서 대류층 지연은 RMS 약 20 cm~40 cm 값을 가지며, 최대 2.5 m까지도 오차가 발생할 수 있다. Figs. 24와 25는 기선 거리에 따른 대류층 습윤 지연의 공간 이격에 의한 비상관성 오차 및 선형 모델링 잔여 오차의 RMS 및 최대값을 그래프로 나타내며, Tables 16과 17은 대류층 습윤 지연에 대한 기선 거리에 따른 공간이격 오차와 모델링 잔여 오차의 선형 적합

계수를 도시한다. Tables 16과 17에서 대류층 습윤 지연은 전 구간에 대해 0.1 ppm인 같은 차수의 공간 이격에 의한 비상관성 오차 및 모델링 잔여 오차의 선형 적합 계수를 가지며, 그래프와 표에서 모두 동서 방향과 남북 방향의 공간 이격에 의한 비상관성 오차의 차이 또는 모델링 잔여 오차의 경향성 차이가 거의 동일하다는 것을 알 수 있다. 특히, 공간 이격에 의한 비상관성 오차와 모델링 잔여오차 모두 RMS로 0.1 ppm 수준으로 유사하므로 선형 모델링의 효과가 크지 않음을 확인할 수 있다.

Table 17. Linear fitting coefficients for modeling residual uncertainty of tropospheric wet delay.

Elevation angle (degree)	b_w (mm/km)			
	North-south		East-west	
	RMS	MAX	RMS	MAX
Zenith	0.17	0.97	0.17	1.05
10-20	0.66	5.10	0.70	5.54
20-30	0.40	2.62	0.42	2.93
30-40	0.29	1.84	0.30	2.01
40-50	0.24	1.42	0.24	1.58
50-60	0.20	1.23	0.21	1.34
60-70	0.18	1.09	0.19	1.18
70-80	0.17	0.99	0.18	1.09
80-90	0.17	0.95	0.17	0.99

5. CONCLUSIONS

이 논문에서는 GNSS 측정치 오차 성분 중에서 위성 궤도 오차, 위성 시계 오차, 전리층 지연 및 대류층 지연의 1년 동안의 기간에 대해 분석을 수행하였고, 분석한 데이터를 바탕으로 서울 기준국을 중심으로 각각 남북, 동서 방향으로 배치된 기준국들에 대해 각 오차 성분별 공간 이격에 의한 비상관성 오차, 선형 모델링 잔여 오차 특성을 1차 선형 적합의 계수 형태로 도시하였다.

측정치 영역의 위성 궤도 오차에서는 GEO 위성에 대해 오차가 다소 편향된 형태로 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 오차 수준 또한 MEO나 IGSO 보다 GEO에서 가장 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이는 기준국에서 관측할 때 정지한 것처럼 보이는 GEO 위성의 특성상 다른 궤도 형태보다 추정 성능이 좋지 않고 추정된 궤도 요소가 편향된 값을 가지는 것이 원인으로 추정된다.

위성 시계 오차에서 Galileo 시계성능이 가장 좋은 것으로 나타났다으며, GPS는 가장 최신 세대인 Block 3의 위성 시계 성능이 앞 세대들에 비해 가장 좋은 것으로 나타났다. 특히 GPS Block 2F는 Cesium, Rubidium 2가지 원자 시계에 대해 Cesium 원자 시계가 상대적으로 안정적이지 못한 성능을 보여줌으로써 같은 세대의 위성에서도 시계 종류에 따른 성능 차이가 있을 수 있음을 확인하였다. 그리고 위성 궤도 오차와 마찬가지로 시계 오차 또한 GEO 위성에서 다소 편향된 형태의 오차를 가지는 것을 확인할 수 있으며, 이는 편향된 GEO 위성 위치가 위성 시계 추정 성능에도 영향을 미치기 때문으로 파악된다.

전반적으로 위성 궤도 오차, 대류층 습윤 지연의 경우, 남북, 동서 방향에 따른 공간이격 오차의 특성이 두드러지게 나타나지는 않았으나, 전리층 지연의 경우 남북 방향으로의 공간이격 오차가 동서 방향보다 상대적으로 크게 나타남을 확인하였고, 대류층의 경우 선형 모델링의 효과가 크지 않음을 알 수 있다.

이 논문에서 기선 거리에 따른 오차 성분별 공간 이격에 의한 비상관성 오차, 선형 모델링 잔여 오차 특성을 분석함으로써 이를 향후 보정정보 제공 서비스 네트워크의 크기를 결정하는 작업에 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by a grant from National R&D Project “Development of ground-based centimeter-level maritime precise PNT technologies” funded by the Ministry of Oceans and Fisheries (RS-2020-KS201371).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

All the authors have contributed to the presented work. The first author, S.K. wrote and edited this based on the analysis results. Y.L., Y.J., and Y.C. performed verification of the analysis algorithm and confirmed the results. B.P. suggested the original concept of this research and supervised the direction of the research. S.G.P. and S.H.P. have administered the project.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Bang, E. & Lee, J. 2013, Methodology of automated ionosphere front velocity estimation for ground-based augmentation of GNSS, *Radio Science*, 48, 659-670. <https://doi.org/10.1002/rds.20066>
- Kim, D., Park, B., Lee, S., Cho, A., & Kim, J., et al. 2008, Design of efficient navigation message format for UAV pseudolite navigation system, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 44, 1342-1355. <https://doi.org/10.1109/TAES.2008.4667713>
- Kim, J., Song, J., No, H., Han, D., Kim, D., et al. 2017, Accuracy improvement of DGPS for low-cost single-frequency receiver using modified Flächen Korrektur parameter correction, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6, 222. <https://doi.org/10.3390/ijgi6070222>
- Kim, M. & Kim, J. 2014, An analysis on the long-term variation of the GPS broadcast ephemeris errors, *Journal of Advanced Navigation Technology*, 18, 421-428. <https://doi.org/10.12673/jant.2014.18.5.421>
- Klobuchar, J. A. 1987, Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-3, 325-331. <https://doi.org/10.1109/TAES.1987.310829>
- Landskron, D. & Böhm, J. 2018, VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions, *Journal of Geodesy*, 92, 349-360. <https://doi.org/10.1007/s00190->

017-1066-2

- Lee, D.-K., Lee, Y., & Park, B. 2023, Carrier Phase Residual Modeling and Fault Monitoring Using Short-Baseline Double Difference and Machine Learning, *Mathematics*, 11, 2696. <https://doi.org/10.3390/math11122696>
- Lim, C., Park, B., & Yun, Y. 2023, L1 SFMC SBAS Message for Service Expansion of Multi-Constellation GNSS Support, *IEEE Access*, 11, 81690-81710. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3300580>
- Montenbruck, O., Schmid, R., Mercier, F., Steigenberger, P., Noll, C., et al. 2015, GNSS satellite geometry and attitude models, *Advances in Space Research*, 56, 1015-1029. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.06.019>
- Montenbruck, O., Steigenberger, P., & Hauschild, A. 2018, Multi-GNSS signal-in-space range error assessment-Methodology and results, *Advances in Space Research*, 61, 3020-3038. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.03.041>
- Park, B, Lee, J, Kim Y, Yun, H., & Kee, C. 2013, DGPS Enhancement to GPS NMEA Output Data: DGPS by Correction Projection to Position-Domain, *Journal of Navigation*, 66, 249-264. <https://doi.org/10.1017/S0373463312000471>
- Park, B. & Kee, C. 2010, The compact network RTK method: An effective solution to reduce GNSS temporal and spatial decorrelation error, *The Journal of Navigation*, 63, 343-362. <https://doi.org/10.1017/S0373463309990440>
- Park, B., Kim, J., Kee, C., Cleveland, A., Parsons, M., et al. 2006, RRC unnecessary for DGPS messages, *IEEE transactions on aerospace and electronic systems*, 42, 1149-1160. <https://doi.org/10.1109/TAES.2006.248220>
- Park, B., Lim, C., Wang, J., & Morton, Y. T. J. 2022, Horizontal drift velocity and dimensions of ionospheric irregularities using ROT from a GNSS receiver array, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 1-14. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3186839>
- Park, K. & Seo, J. 2021, Single-antenna-based GPS anti-jamming method exploiting polarization diversity, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 57, 919-934. <https://doi.org/10.1109/TAES.2020.3034025>
- Schaer, S., Gurtner, W., & Feltens, J. 1998, IONEX: The ionosphere map exchange format version 1, In *Proceedings of the IGS AC workshop*, Darmstadt, Germany, 9-11 February 1998.
- Son, P.-W., Rhee, J. H., Hwang, J., & Seo, J. 2019, Universal kriging for Loran ASF map generation, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 55, 1828-1842. <https://doi.org/10.1109/TAES.2018.2876587>
- Song, J., Park, B., & Kee, C. 2016, Comparative Analysis of Height-Related Multiple Correction Interpolation Methods with Constraints for Network RTK in Mountainous Areas, *Journal of Navigation*, 69, 991-1010. <https://doi.org/10.1017/S0373463316000011>
- Steigenberger, P. & Montenbruck, O. 2022, IGS Satellite Metadata File Description, Version 1.00. <https://doi.org/10.57677/metadata-sinex>
- Strasser, S., Banville, S., Kvas, A., Loyer, S., & Mayer-Gürr, T. 2021, Comparison and generalization of GNSS satellite attitude models, *EGU General Assembly 2021*, online, 19-30 Apr 2021, EGU21-7825. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-7825>
- Wang, S., Zhai, Y., & Zhan, X. 2021, Characterizing BDS signal-in-space performance from integrity perspective, *Navigation*, 68, 157-183. <https://doi.org/10.1002/navi.409>
- Yoon, D., Kee, C., Seo, J., & Park, B. 2016, Position Accuracy Improvement by Implementing the DGNSS-CP Algorithm in Smartphones, *Sensors*, 16, 910. <https://doi.org/10.3390/s16060910>
- Yoon, H., Seok, H., Lim, C., & Park, B. 2020, An Online SBAS Service to Improve Drone Navigation Performance in High-Elevation Masked Areas, *Sensors*, 20, 3047. <https://doi.org/10.3390/s20113047>
- Yun, J. & Park, B. 2024, A GNSS/Barometric Altimeter Tightly coupled Integration for Three-Dimensional Semi-indoor Mapping with Android Smartphones, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 21, 8001005. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2024.3365610>



Sungik Kim is a graduate student of Department of Aerospace Engineering and Department of Convergence Engineering for Intelligent Drone at Sejong University in Republic of Korea. He received B.S degree from Sejong University. His research interests include orbit determination, inter satellite-link, Network RTK, Homogeneous Network RTK.



Yebin Lee is doctoral student of Department of Aerospace Engineering and Department of Convergence Engineering for Intelligent Drone at Sejong University. She received the B.S., M.S. degree from Sejong University. Her research interests include RTK, PPP and GNSS monitoring system.



Yongrae Jo is an integrated Ph.D. student of Department of Aerospace Engineering and Department of Convergence Engineering for Intelligent Drone at Sejong University. He received the B.S. degree from Aerospace Engineering at Sejong University, Seoul, Korea. His research interests include RTK/

Network RTK and GNSS augmentation message scheduling algorithms.



Yunho Cha is a research fellow at the Sejong University. He received Bachelor's and Master's degree in Aerospace Engineering from Sejong University in South Korea, and his research interests include SBAS, PPP, RTK, Network RTK, correction messages and monitoring system.



Sul Gee Park is the general management team leader, maritime PNT research office and senior engineer of the maritime PNT research centre at Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering. She received B.S. and M.S. degrees from Chungnam National University Republic of Korea. Her current research focus on PPP-RTK, eLoran system and integrity monitoring.



Sang Hyun Park is the head, maritime PNT research office and principal researcher the maritime PNT research centre at the Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO). He received the B.S., M.S., and Ph.D. degrees from Chungnam National University, Republic of Korea. He had worked as a senior research engineer at Automotive Electronic R&D Center for Hyundai-Kia Motors. He has been involved in lots of radio navigation-related research projects such as a vessel berthing system using GPS, DGNSS reference stations and integrity monitors, eLoran system, etc. His current research interests focus on resilient PNT systems for e-Navigation.



Byungwoon Park is an associate professor of Department of Aerospace Engineering and Department of Convergence Engineering for Intelligent Drone at Sejong university. He received the B.S., M.S., and Ph.D. degree from Seoul National University. He worked as a principal researcher at Spatial Information Research.