

Preliminary Analysis on the Effects of Tropospheric Delay Models on Geosynchronous and Inclined Geosynchronous Orbit Satellites

Jinah Lee¹, Chandeok Park^{1†}, Jung-Min Joo²

¹Department of Astronomy, Yonsei University, Seoul 03722, Republic of Korea

²KPS Technology Team, Korea Aerospace Research Institute, Daejeon 34133, Republic of Korea

ABSTRACT

This research proposes the best combination of tropospheric delay models for Korean Positioning System (KPS). The overall results are based on real observation data of Japanese Quasi-Zenith satellite system (QZSS), whose constellation is similar to the proposed constellation of KPS. The tropospheric delay models are constructed as the combinations of three types of zenith path delay (ZPD) models and four types of mapping functions (MFs). Two sets of International GNSS Service (IGS) stations with the same receiver are considered. Comparison of observation residuals reveals that the ZPD models are more influential to the measurement model rather than MFs, and that the best tropospheric delay model is the combination of GPT3 with 5 degrees grid and Vienna Mapping Function 1 (VMF1). While the bias of observation residual depends on the receivers, it still remains to be further analyzed.

Keywords: mapping function (MF), precise orbit determination (POD), troposphere delay model, zenith path delay (ZPD)

1. INTRODUCTION

한국형 위성항법 시스템 (Korean Positioning System, KPS)은 제3차 우주개발진흥 기본계획의 6대 전략 중 하나로, 한반도 및 동아시아 지역에 위성항법 서비스를 제공하는 것을 목표로 한다. KPS를 통한 고품질의 항법 서비스를 제공하기 위해서는 항법위성군을 구성할 정지궤도 (Geosynchronous Orbit, GEO) 및 경사 지구동기궤도 (Inclined Geosynchronous Orbit, IGSO) 위성들의 정밀궤도결정 (Precise Orbit Determination, POD)이 필수적이다. 이 연구는 정밀궤도결정 모듈의 핵심 구성 요소인 관측 모델 (Measurement Model)을 다룬다. 관측 모델을 구성하는 대류권 지연모델 (Tropospheric Delay Models)들에 대한 해석적 연구와 검증은 통하여, KPS POD를 대상으로 하는 최적의 관측 모델 구성을 위한 대류권지연모델 조합을 제시한다.

Received Nov 06, 2021 Revised Nov 30, 2021 Accepted Dec 06, 2021

[†]Corresponding Author

E-mail: park.chandeok@yonsei.ac.kr

Tel: +82-2-2123-5692 Fax: +82-2-392-7680

Jinah Lee <https://orcid.org/0000-0002-2658-1590>

Chandeok Park <https://orcid.org/0000-0002-1616-6780>

Jung-Min Joo <https://orcid.org/0000-0001-6826-1010>

현재 운용 중인 대표적인 지역위성항법시스템 (Regional Navigation Satellite System, RNSS)으로는 일본의 준정정위성시스템 (Quasi-Zenith Satellite System, QZSS)과 인도의 Navigation Indian Constellation (NavIC)이 있으며, 중국의 BeiDou System (BDS)은 전지구적 위성항법 시스템 (Global Navigation System, GNSS)과 RNSS를 같이 운영하고 있다. QZSS, NavIC, BDS 모두 RNSS 운용 시 위성의 지상 궤적 (Ground Track)이 특정지역 부근에서 장시간 머무를 수 있는 GEO/IGSO 위성을 활용하고 있다 (Indian Space Research Organization 2017). KPS 또한 한반도에서 최소 4기 이상의 위성을 상시 관측하여 독립적인 항법서비스를 제공할 수 있도록 GEO 위성 3기와 IGSO 위성 4기로 구성할 계획인데 (Shin et al. 2019), 현재 계획으로는 일본의 QZSS와 위성군의 구성이 가장 유사하다.

대류권지연모델은 항법위성들의 항법신호를 활용한 POD 모듈의 관측 모델 중에서 오차를 야기시킬 수 있는 주된 요소이다 (Gao & Chen 2004). 일반적으로 대류권 모델은 경험적 모델을 사용하는데, 천정방향지연 (Zenith Path Delay, ZPD)과 위성 고도 영향을 반영해주는 사상 함수 (Mapping Function, MF)로 나누어 표현한다. Park et al. (2016)에서는 최적의 MF를 선정하는 분석을 진행하였고, Qiu et al. (2020)에서는 GNSS 데이터 처리를 위한 대류권지연모델 분석을 위해 6개의 기후 영역을 선정하여 다양한 MF에 따른 대류권지연모델의 정확도를 분석하였다. Park

et al. (2016)과 Qiu et al. (2020) 모두 GNSS 데이터를 활용한 가강수량 (Precipitable Water Vapor, PWV) 파악을 목적으로 하고 있는데, ZPD에 대한 분석은 진행하지 않았다. Park et al. (2018)에서는 GNSS 데이터 처리를 위한 연구로서 두 가지의 대류권 모델 분석을 통하여 더 적합한 모델을 제시하였으나, Satellite-Based Augmentation System (SBAS)과 저가 수신기 활용을 고려한 연구이므로 POD에는 적합하지 않을 수 있다. 상술한 선행 연구 모두 RNSS에 대한 분석은 진행하지 않았다.

본 연구에서는 RNSS로 운영될 KPS의 POD를 위한 관측 모델의 구성 요소 중에서 대류권지연모델에 대한 분석을 수행한다. KPS의 후보위성군 (Constellation Candidate)과 제일 유사한 QZSS 위성군의 IGS 실제 관측치를 활용하여 GEO/IGSO 위성에서 적합한 대류권지연모델들의 조합을 제시한다. 이를 위해 3가지의 ZPD 모델과 4가지의 MF를 도입하였고, 수신기의 사양 차이로 인한 효과를 상쇄하기 위하여 TIRMBLE 사의 NETR9 수신기와 JAVAD 사의 TRE G3TH DELTA 수신기를 사용하는 관측소를 구분하여 분석을 수행하였다. 정량적 분석을 위해 독일 지구과학 연구소 (German Research Centre for Geosciences, GFZ)에서 제공하는 정밀궤도력으로 구현한 관측값과 실제 관측값 사이의 잔차 (Residual)를 정밀도의 기준으로 삼았다. ZPD 모델이 MF보다 관측 모델의 정밀도에 더 큰 영향을 끼치며, 관측 잔차의 편향 (Bias)에는 수신기의 종류가 주요하게 작용하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서 보편적으로 사용하는 ZPD 모델과 MF 모델을 소개한다. 3장에서 분석을 위해 사용한 관측 모델과 선정한 IGS 감시국을 제시한다. 4장에서 GFZ에서 제공하는 정밀궤도력에 기반한 관측 잔차를 제시/분석한다. 5장에서 본 연구에 대한 결론과 함께 심화연구방안을 제시한다.

2. TROPOSPHERIC DELAY MODELS

대류권지연은 위성 신호가 전파될 때 대류권의 기체나 수증기에 의해 신호가 지연되는 현상으로, 2-30 m 정도의 측정오차를 발생시킨다고 알려져 있다 (Sanz Subirana et al. 2013, Teunissen & Montenbruck 2017). 대류권지연모델은 건조 (Hydrostatic) 대류권지연과 습윤 (Wet) 대류권지연으로 구분하며, ZPD와 위성의 고도각에 따라 변하는 정도를 반영하는 MF를 이용하여 Eq. (1)과 같이 표현한다.

$$T = M_H(el)D_H + M_W(el)D_W \quad (1)$$

여기서 T 는 대류권지연, D_H 와 D_W 는 각각 건조 및 습윤 ZPD, M_H 와 M_W 는 각각 건조와 습윤 MF, el 은 위성고도각을 의미한다. 여기서는 보편적으로 사용하는 ZPD와 MF에 대해 소개한다.

2.1 Zenith Path Delay Models

ZPD는 천정방향 신호를 측정할 때의 지연량이다. 기압, 온도, 수증기압의 영향을 받기 때문에 해당 모델을 조합하여 Saastamoinen 모델이나 Askne & Nordius 모델에 적용함으로써

천정방향지연 모델을 결정할 수 있다 (Saastamoinen 1972, Askne & Nordius 1987). 기압과 온도는 주로 경험적 모델을 사용하며, 특정한 각도 간격의 데이터를 사용하여 근사한다. 수증기압은 경험적 모델이나 IERS2003 Convention에서 제시한 모델을 사용할 수 있다 (McCarthy & Petit 2004). 기압, 온도, 수증기압 모두 경험적인 모델을 사용하면서 가장 보편적인 모델이 GPT 모델을 개선했던 Global Pressure & Temperature 3 (GPT3) 이다. GPT3는 경도/위도가 1°와 5° 간격인 데이터를 사용하여 근사하는데 (Chen & Herring 1997), 본 연구에서는 각각 GPT3_1과 GPT3_5로 구분한다. 본 연구에서는 캐나다의 New Brunswick 대학에서 제공하는 GPS 대류권 지연계산 모듈인 UNB3m을 참고하여 모델을 선정하였다 (Leandro et al. 2006). 해당 모듈에서 수증기압을 IERS2003 convention으로 채택하고 있어, 본 연구에서도 이를 반영하였다.

2.2 Mapping Functions

MF는 위성 고도의 영향을 반영해 주는 함수로서 Marini (1972)에서 제시한 Eq. (2)와 같이 분수형태의 연속함수로 표현할 수 있다. 계수 a , b , c 의 데이터의 종류에 따라 MF를 분류하며, 아래 첨자 h 와 w 는 각각 건조와 습윤 MF를 위한 계수를 의미한다.

$$m_i(el) = \frac{1 + a_i / \{1 + b_i / (1 + c_i)\}}{\sin(el) + a_i / \{\sin(el) + b_i / (\sin(el) + c_i)\}} \quad (2)$$

Niell Mapping Function (NMF)는 Niell (1996)에서 제시하는 모델로 북반구에 위치한 26개의 라디오존데 (Radiosonde) 감시국에서 얻은 1년치 기상 데이터를 기반으로 계수를 결정한다. 위도, 감시국 고도, Day of Year (DoY)를 기준으로 건조 대류권지연을 위한 MF의 계수를 결정할 수 있다. Vienna Mapping Function (VMF)는 전지구적 격자 자료 (Grid data)인 ECMWF ERA40을 Ray-Tracing하는 방식으로 건조 대류권지연을 위한 MF의 계수 b 와 c 를 결정한다 (Boehm & Schuh 2003, Boehm, Werl, & Schuh 2006). VMF1은 VMF의 갱신 모델로서 기후대 및 계절성 관련 오류를 수정한 것이며, 계수 b 와 c 는 경험적으로 얻은 수식을 이용하여 계산한다. VMF3은 VMF1의 후속 모델인데, VMF1과 마찬가지로 계수 b 와 c 를 경험적으로 결정한다. General Mapping Function (GMF)는 VMF1의 시간지연문제를 고려한 모델로 좌표 및 DoY에 의존하는 경험적 모델이다 (Boehm et al. 2006). GMF는 NMF와 비교할 때 연간 오류와 국지적 고도에 의한 편향이 작으며, 위도, 경도, 고도, DoY로 계수를 결정한다.

본 연구에서는 NMF, VMF1, VMF3, GMF의 4가지 모델을 사용하여 비교/분석하였다.

3. SIMULATION SET-UP

3.1 Measurement Model

실제 관측치를 이용하여 대류권지연모델의 정밀도를 분석

하기 위해 관측 모델을 구성하였다. 관측 데이터는 L1 (1575.42 MHz) / L2 (1227.60 MHz) 주파수를 활용하며, 감시국에서 사용하는 수신기에서 각 주파수의 코드 (Code) 및 반송파위상 (Carrier Phase) 관측이 가능하여 코드 의사거리 (Pseudo-Range)와 반송파위상 의사거리의 형태로 관측데이터를 확보한다고 가정한다. 코드 의사거리 관측데이터는 Eq. (3)과 같이 위성과 감시국 사이의 신호전파시간인 경로시간차 (Light Path Time, ρ/c), 위성과 감시국 시계 간의 상대시계오차 (Relative Clock Bias, $c\delta t_i - c\delta t_j$), 전리층지연오차 (I), 대류권지연오차 (T), 위성의 운동에 따른 상대론적 보정항 (Δ_r)으로 구성한다. R 은 단일주파수에서의 코드 의사거리, δt 는 기준 시간계에 대한 시계오차, 아래 첨자 i 와 위 첨자 j 는 각각 감시국 시계와 위성 시계 관련 항, ε 은 관측모델 오차를 의미한다.

$$R = \rho + (c\delta t_i - c\delta t_j) + I + T + \Delta_r + \varepsilon \quad (3)$$

기하학적 거리 (Geometric Range)인 ρ 는 정밀궤도력에서 제공하는 위성의 위치와 속도를 사용하여 경로시간차를 추정하여 얻을 수 있으며, 상대론적 보정항 Δ_r 은 Shapiro 신호전파지연을 사용하여 Eq. (4)와 같이 계산한다.

$$\Delta_r = 2 \frac{\mu}{c^2} \log \left(\frac{r_{sat} + r_{rcv} + \rho}{r_{sat} + r_{rcv} - \rho} \right) \quad (4)$$

전리층지연오차는 주파수의 제곱에 반비례하는데, 이를 1차적 (최대 99.9%)으로 제거하기 위해 L1/L2 이중주파수로 구성된 전리층 제거 (Ionosphere-Free) 조합을 사용한다. L1 주파수 (f_1)의 코드 의사거리 관측량을 R_1 , L2 주파수 (f_2)의 코드 의사거리 관측량을 R_2 라고 정의하면, 전리층제거조합의 의사거리는 Eq. (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_c = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} R_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} R_2 \quad (5)$$

식 (3)에서 서술한 보정 외에 IGS에서 배포하는 Difference Code Bias (DCB), Phase Center Offset (PCO), Timing Group Delay (TGD)를 반영하였으며, 정밀시계력을 사용하여 수신기 시계오차도 보정하였다.

3.2 IGS Stations

QZSS는 비교적 최근에 운영되기 시작한 RNSS로서 최신 수신기로만 관측이 가능하다. GPS나 GLONASS에 비해 확보 가능한 관측량이 상대적으로 적으며, 2021년 9월 기준으로 160여개의 IGS 감시국에서 QZSS 관측을 지원하고 있다. 특히 GEO 위성인 J04는 궤도 조정이 잦고 가시성 변화가 거의 없기 때문에 IGSO 위성 (J01, J02, J03)보다 관측 가능한 감시국이 더 좁은 범위에 적게 위치한다.

본 연구에서는 2019년 1월 1일 QZSS를 관측한 110여개 감시국의 관측 데이터 중에서, 시계잔류편차 및 ZPD 정보를 제공하지

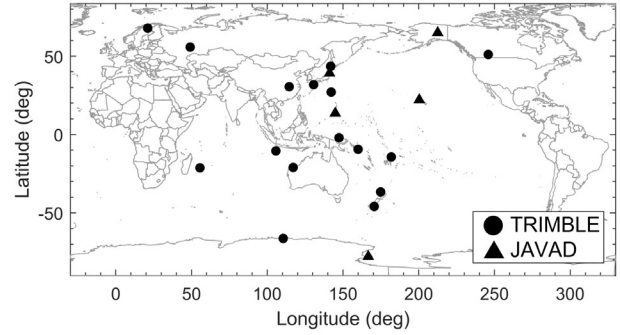


Fig. 1. Distribution of IGS stations (1st. Jan. 2019).

않거나 관측 품질이 좋지 않는 감시국을 제외한 총 39개 감시국의 관측데이터를 확보했다. 이 중에서 수신기 차이 때문에 발생하는 오차 효과를 배제하기 위해, GEO위성인 J07을 관측한 감시국 중 가장 많은 감시국이 사용하는 수신기인 NETR9 (TRIMBLE 사의 수신기)와 TRE G3TH DELTA (JAVAD 사의 수신기)를 사용하는 감시국을 선정하였다. NETR9 (TRIMBLE 사의 수신기)을 사용하는 감시국은 16개 (AIRA, AUCK, CASI, CCI2, DUND, FTNA, JFNG, KARR, KIR8, KZN2, PNGM, REUN, SOLO, STK2, UCAL, XMIS)이며, J07을 관측한 12개 감시국 중 8개 감시국이 해당 수신기를 사용한다. TRE G3TH DELTA (JAVAD 사의 수신기)를 사용하는 감시국은 총 5개 (MIZU, MCM4, KOKV, GUAM, FAIR)이며, 2개의 감시국이 J07을 관측할 수 있다. Fig. 1은 사용한 감시국의 분포를 나타내는데, 원과 삼각형 기호는 각각 NETR9 (TRIMBLE 사의 수신기)와 TRE G3TH DELTA (JAVAD 사의 수신기)를 수신기로 사용하는 감시국을 나타낸다.

4. RESULTS AND ANALYSIS

GFZ에서 배포하는 정밀궤도력을 사용하여 구현한 관측치와 실제 관측치를 비교하여 대류권모델의 성능을 분석하였다. 2019년 1월 1일의 24시간 데이터를 사용하였으며, J07 (GEO) 위성을 지원하는 감시국 중에서 가장 많이 사용하는 수신기 2종을 선정하여 각각의 관측 모델들을 적용하였다.

4.1 Receiver1: NETR9 (TRIMBLE)

Figs. 2와 3은 NETR9 (TRIMBLE) 수신기를 사용하는 16개 감시국의 QZSS 실제 관측치와 GFZ 정밀궤도력으로 모사한 관측치 사이의 잔차를 나타낸다. Fig. 2에서 다각형 기호는 평균, 작은 점은 표준편차의 범위, 별 기호는 제곱근평균값 (Root Mean Square, RMS)의 범위를 나타낸다. 다각형 기호의 모양은 천정방향이지만, 기호의 색은 MF를 구분하는데 사용하였다. 모든 위성이 1 m 미만의 편차를 가지면서 표준편차와 제곱근평균값이 유사하다. Fig. 3은 Fig. 2의 평균 잔차를 비교한 그래프로서, 각각의 그래프의 중간에 있는 박스는 특정 ZPD 모델 결과를 확대한 것이다. GEO/IGSO 위성 모두 ZPD 모델이 MF보다 잔차에 더 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. IGSO 위성인 J01, J02, J03 위

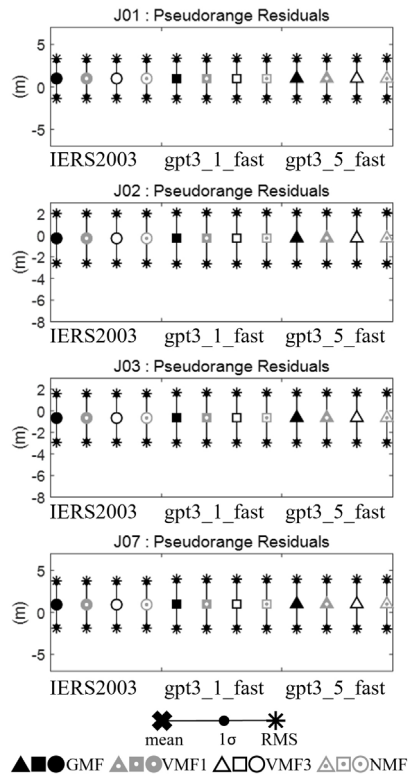


Fig. 2. Residuals of measurement models with respect to tropospheric delay models (Receiver 1).

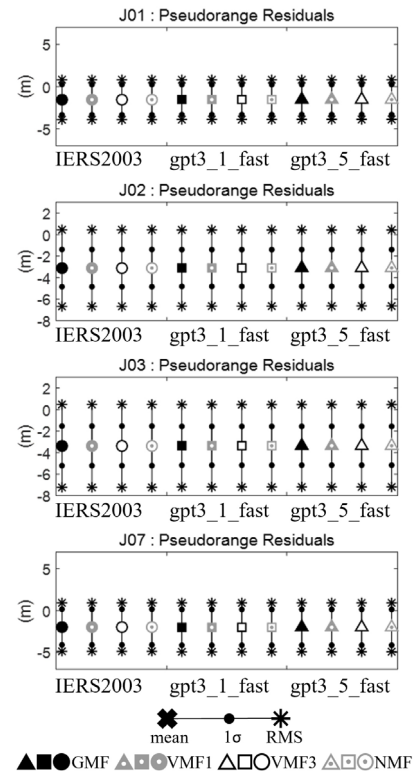


Fig. 4. Residuals of measurement models with respect to tropospheric delay models (Receiver 2).

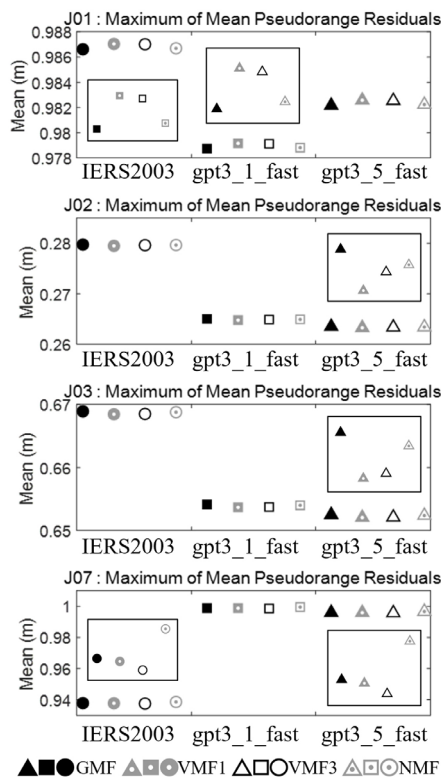


Fig. 3. Mean residuals of measurement models with respect to tropospheric delay models (Receiver 1).

성의 결과에서는 GPT3_1 또는 GPT3_5를 사용하여 ZPD를 모사한 결과가 가장 작은 오차를 보여주었으며, GEO 위성인 J07은 IERS2003을 ZPD 모델로 사용했을 때 오차가 가장 작았다. MF의 성능 비교를 위해 확대한 박스에서는 VMF1 또는 VMF3의 결과가 가장 좋은 성능을 보여주는 것을 확인할 수 있는데, J01 위성은 GMF가 가장 작은 오차를 보여주었다. 종합적으로 고려할 경우, QZSS 위성에 적용했을 때 가장 작은 오차를 보여주는 대류권 지연모델 조합은 GPT3_5와 VMF1을 사용하는 조합이다.

4.2 Receiver2: TRE G3TH DELTA (JAVAD)

Figs. 4와 5는 TRE G3TH DELTA (JAVAD) 수신기를 사용하는 감시국의 QZSS 실제 관측치와 GFZ 정밀궤도력으로 모사한 관측치 사이의 잔차를 나타낸다. Fig. 4는 각각의 대류권 모델을 적용했을 때의 잔차의 평균, 표준편차, 제곱근평균값을 표시한 것이다. 작은 원과 별 모양의 기호는 각각 표준편차와 제곱근평균값의 범위를 나타내며, 큰 원, 사각형, 삼각형 기호는 각각 IERS2003, GPT3_1, GPT3_5를 ZPD로 사용했을 때의 결과를 의미한다. MF는 ZPD 기호의 색으로 구분하였으며, Receiver1을 사용한 결과와 동일하게 ZPD 모델이 MF 보다 잔차에 더 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. IGSO 위성인 J01, J02, J03 위성은 GPT3_1 또는 GPT3_5를 사용하여 ZPD를 모사한 결과가 가장 작은 오차를 보여주었으며, MF 성능 비교를 위해 확대한 박스를 살펴보면 VMF1가 가장 좋은 성능을 보여주는 것을 확인할 수 있다. GEO 위성인 J07의 경우 IERS2003과 NMF를 각각 ZPD 모델과

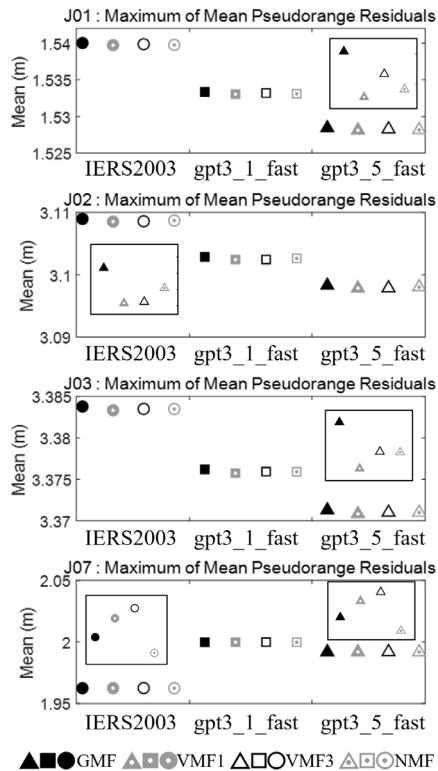


Fig. 5. Mean residuals of measurement model with respect to tropospheric delay models (Receiver 2).

Table 1. Bias and best tropospheric delay models with NETR9 (TRIMBLE) and TRE G3TH DELTA (JAVAD) receivers.

Receiver		1	2
Bias (m)	J01	0.9827	-1.5338
	J02	-0.2693	-3.1031
	J03	-0.6583	-3.3768
	J07	0.9776	-1.9847
Best combinations	Mean+STD	IERS2003 VMF3	GPT3_5 VMF1
	Mean+RMS	IERS2003 VMF3	GPT3_5 VMF1
	Mean	GPT3_5 VMF1	GPT3_5 VMF1

MF로 사용하였을 때 잔차가 가장 작았다.

Table 1에 두 수신기의 실제 관측치를 적용한 결과가 요약되어 있다. 수신기 1과 2는 각각 NETR9 (TRIMBLE)와 TRE G3TH DELTA (JAVAD) 수신기를 의미한다. 관측 모델에 따른 잔차를 정리하였고, 3가지 통계치를 기준으로 가장 좋은 결과를 보여주는 모델을 Best Combinations에 정리하였다. Mean+STD는 평균과 표준편차로 68.2% 범위 내에 포함되는 수치 중 절대값이 가장 큰 것을, Mean+RMS는 평균과 제곱근평균값으로 대부분의 데이터를 포괄하는 범위를 얻었을 때 해당 범위의 최대 절대값 수치를, Mean은 평균값을 기준으로 산정했을 때의 결과이다.

수신기의 종류에 따라 관측 잔차의 편향에서 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 감시국의 차이가 주된 원인일 수 있으므로 추가적인 분석이 필요하다. 개별 위성이나 통계 기준값에 따라 최적의 대류권 지연 모델 조합의 차이가 발생하나, 일반적으

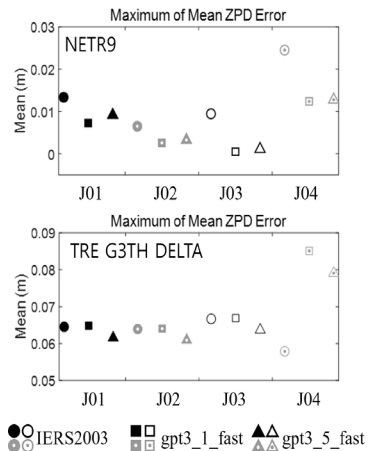


Fig. 6. Mean ZPD errors (top: Receiver 1, bottom: Receiver 2).

로 ZPD는 GPT3_5, MF는 VMF1을 사용했을 때 가장 좋은 결과를 보여주었다. MF의 경우 Park et al. (2016)과 Qiu et al. (2020)의 결과와 동일하게 VMF1가 최적의 성능을 보여주었다.

4.3 ZPD Analysis

상술한 두 결과는 ZPD와 MF의 경향성을 모두 파악할 수 있다는 장점은 있으나 관측 모델의 잔차를 사용하여 대류권 지연 모델을 파악하였기 때문에 다른 관측 모델의 오차(PCV(Phase Center Variations), 수신기 위치 오차 등)로 인해 관측 잔차가 편향되었을 수 있다. IGS에서 배포하는 ZPD 데이터를 참고으로 활용하여 ZPD 정밀도 분석을 수행하여 Fig. 6과 같이 정리하였다. Fig. 6의 상단 그래프는 TRIMBLE사의 NETR9 수신기 (Receiver 1) 결과를, 하단 그래프는 JAVAD 사의 TRE G3TH DELTA 수신기 (Receiver 2) 결과를 나타낸 것이다. 원, 사각형, 삼각형 기호는 각각 IERS2003, GPT3_1, GPT3_5를 적용한 결과를 의미하며, QZSS 위성에 따라 색상을 달리하여 한 번에 나타냈다. 두 수신기의 결과 모두 cm 수준의 편향이 존재하며, 위성에 따라 ZPD 오차 정도가 차이가 있었다. TRE G3TH DELTA 수신기를 사용하여 J07위성에 적용한 경우를 제외하면 GPT3_1과 GPT3_5가 가장 작은 오차를 보여주었으며, NETR9 수신기는 GPT3_1이, TRE G3TH DELTA 수신기는 GPT3_5가 가장 적합한 ZPD 모델이었다.

5. CONCLUSIONS

RNSS는 지상 궤적이 특정 지역에서 머무를 수 있도록 GEO/IGSO 같은 고궤도 위성을 활용하므로, 정밀궤도결정의 핵심 구성요소인 관측 모델의 최적화가 GNSS의 중궤도 위성들과 상이할 수 있다. 본 연구에서는 KPS의 후보 궤도와 유사한 궤도로 구성되어 운영중인 QZSS 위성들의 실제 관측치를 활용하여, 관측 모델을 구성하는 대류권 지연 모델을 분석하였다. 3가지의 ZPD 모델과 4가지의 MF를 활용하여 GFZ에서 제공하는 정밀궤도력으로 관측 데이터를 모사하였으며, GEO 위성을 관측한 감시국이 많이 사용한 수신기 2종을 선정하여 관측 데이터를 확보하여 분

석하였다. 2019년 1월 1일 24시간 동안의 데이터를 기반으로 대류권모델에 따른 관측 잔차를 비교한 결과, 관측 잔차의 편향은 수신기에 따라 차이가 있으나 감시국의 차이가 주된 원인일 수 있어 추가적인 분석이 필요하다. 기존에 알려진 바와 같이 두 가지 수신기에서 수신한 실제 관측치에 대한 결과는 모두 ZPD가 MF보다는 지배적인 영향을 끼치는 모델이었으며, 종합적으로 ZPD는 GPT3_5를 사용하고 MF는 VMF1를 사용할 때 최적의 대류권 지연모델이 구성되었다.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by a grant from “Fundamental Research for Korea Satellite Navigation System and Future Air Traffic Management” of the Korea Aerospace Research Institute funded by the Korea government (MSIT). The first author (Jinah Lee) and the second author (Chandeok Park) were also supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (2021R111A204882411).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, J.L. and C.P.; methodology, J.L.; software, J.L.; validation, J.L., C.P., and J.J.; formal analysis, J.L., C.P., and J.J.; investigation, J.L. and J.J.; resources, J.L.; data curation, J.L.; writing—original draft preparation, J.L.; writing—review and editing, J.L., C.P., and J.J.; visualization, J.L.; project administration, J.L., C.P., and J.J.; funding acquisition, C.P. and J.J.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Askne, J. & Nordius, H. 1987, Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data, *Radio Science*, 22, 379-386. <https://doi.org/10.1029/RS022i003p00379>
- Boehm, J. & Schuh, H. 2003, Vienna Mapping Functions, in *Proceedings of the 16th EVGAWorking Meeting*, Leipzig, Germany, 9-10 May 2003.
- Boehm, J., Niell, A. E., Schuh, H., Tesmer, V., & Tregoning, P. 2006, Mapping functions for atmospheric delay modelling in GNSS analysis, in *Proceeding of the IGS-Meeting 2006*, Daemstadt.
- Boehm, J., Werl, B., & Schuh, H. 2006, Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111, B02406. <https://doi.org/10.1029/2005JB003629>
- Chen, G. & Herring, T. 1997, Effects of atmospheric azimuthal asymmetry on the analysis of space geodetic data, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102, 20489-20502. <https://doi.org/10.1029/97JB01739>
- Gao, Y. & Chen, K. 2004, Performance analysis of precise point positioning using real-time orbit and clock products, *Journal of Global Positioning Systems*, 3, 95-100.
- Indian Space Research Organization, August 2017, Indian Regional Navigation Satellite System Signal in Space ICD for Standard Positioning Service (Version 1.1, ISRO-IRNSS-ICD-SPS-1.1), Indian Space Research Organization
- Leandro, R.F., Santos, M.C., & Langley, R.B. 2006, UNB Neutral Atmosphere Models: Development and Performance, in *Proceedings of ION NTM 2006*, the 2006 National Technical Meeting of The Institute of Navigation, Monterey, California, 18-20 January 2006, 564-573.
- Marini, J. W. 1972, Correction of satellite tracking data for an arbitrary tropospheric profile, *Radio Science*, 7, 223-231. <https://doi.org/10.1029/RS007i002p00223>
- McCarthy, D. D. & Petit, G. 2004, IERS conventions (2003), International Earth Rotation And Reference Systems Service (IERS)(Germany).
- Niell, A. E. 1996, Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101, 3227-3246.
- Park, H. E., Yoo, S. M., Yoon, H. S., Chung, J. K., & Cho, J. 2016, Performance analysis of mapping functions and mean temperature equations for GNSS precipitable water vapor in the Korean peninsula, *JPNT*, 5, 75-85. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2016.5.2.075>
- Park, K. D., Lee, H. C., Kim, M. S., Kim, Y. G., Seo, S. W., et al. 2018, Accuracy Comparison of GPT and SBAS Troposphere Models for GNSS Data Processing, *JPNT*, 7, 183-188. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2018.7.3.183>
- Qiu, C., Wang, X., Li, Z., Zhang, S., Li, H., et al. 2020, The performance of different mapping functions and gradient models in the determination of slant tropospheric delay, *Remote Sensing*, 12, 130. <https://doi.org/10.3390/rs12010130>
- Saastamoinen, J. 1972, Contributions to the theory of

atmospheric refraction, *Bulletin G  od  sique* (1946-1975), 105, 279-298. <https://doi.org/10.1007/BF02521844>

Sanz Subirana, J., Juan Zornoza, J. M., & Hern  andez-Pajares, M. 2013, *GNSS Data Processing, Volume I: Fundamentals and Algorithms* (Noordwijk, Netherlands: ESA Communications).

Shin, M., Lim, D. W., Chun, S., & Heo, M. B. 2019, A Study on the Satellite Orbit Design for KPS Requirements, *JPNT*, 8, 215-223. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2019.8.4.215>

Teunissen, P. J. & Montenbruck, O. 2017, *Springer handbook of global navigation satellite systems, vol.1* (New York, NY: Springer International Publishing).

interests include GNSS, SBAS, GBAS and Ionosphere monitoring.



Jinah Lee is currently in M.S.Ph.D. integrated program at the Department of Astronomy, Yonsei University in Seoul, Korea. She received her B.S. in Astronomy from Yonsei University in 2016. Her research interests cover precise orbit determination of navigation satellites, geometrical mechanics, Lie-group-based integrations, geometrical robust control for satellites, remote control for asteroid probe, etc.



Chandeok Park is a Professor with the Department of Astronomy, Yonsei University in Seoul, Korea. He received his B.S. in Aerospace Engineering from Seoul National University in 1996, M.S. in Aerospace Engineering from Georgia Institute of Technology in 2002, and Ph.D. in Aerospace Engineering from University of Michigan at Ann Arbor in 2006. He worked as a National Research Council Research Associate at Naval Postgraduate School during 2007-2010. His research interests cover precise orbit determination of navigation satellites, deep-space navigation, trajectory design and optimizations for spacecraft formation flying, theoretical/computational optimal controls & optimizations and their applications to spacecraft orbital/interplanetary maneuvers, etc.



Jung-Min Joo received his Ph.D. degree in Aerospace Engineering from Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST) in 2015. He has been working at the Korea Aerospace Research Institute since 2004. He is currently the head of the Korean Positioning System (KPS) Technology Team at the Korea Aerospace Research Institute. His research

