

A Modified Klobuchar Model Reflecting Characteristics of Ionospheric Delay Error in the Korea Region

Dana Park, Young Jae Lee[†]



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.

A Modified Klobuchar Model Reflecting Characteristics of Ionospheric Delay Error in the Korea Region

Dana Park, Young Jae Lee[†]

Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Konkuk University, Seoul 05029, South Korea

ABSTRACT

When calculating the user's position using satellite signals, the signals originating from the satellite pass through the ionosphere and troposphere to the user. In particular, the ionosphere delay error that occurs when passing through the ionosphere delays when the signal is transmitted, generating a pseudorange error and position error at a large rate. Therefore, to improve position accuracy, it is essential to correct the ionosphere layer error. In a receiver capable of receiving dual frequency, the ionosphere error can be eliminated through a double difference, but in a single frequency receiver, an ionosphere correction model transmitted from a Global Navigation Satellite System (GNSS) satellite is used. The popularly used Klobuchar model is designed to improve performance globally. As such, it does not perform perfectly in the Korea region. In this paper, the characteristics of the delay in the ionosphere in the Korean region are identified through an analysis of 10 years of data, and an improved ionosphere correction model for the Korean region is presented using the widely employed Klobuchar model. Through the proposed model, vertical position error can be improved by up to 40% relative to the original Klobuchar model in the Korea region.

Keywords: GNSS, ionospheric delay correction, Klobuchar model, single frequency receiver

1. INTRODUCTION

항법위성을 활용하여 사용자의 위치를 계산할 때, 위성으로부터 송신된 신호는 전리층과 대류층을 지나 사용자에게 수신된다. 신호가 전리층을 통과할 때 전리층에 하전되어 있는 입자들에 의해 신호의 굴절이 발생한다. 이는 신호가 전달되는 시간을 지연시켜 의사거리 오차를 발생시키고 결국 최종적인 위치 계산 시에도 오차로 반영된다. 이렇게 발생한 오차는 의사거리 오차의 가장 큰 비율을 차지할 정도의 큰 비중을 갖는다. 따라서 사용자 위치 정확도를 개선하기 위해서는 전리층 지연 오차 보정이 필수적이다.

전리층 지연 오차를 보정하는 보편적인 방법은 이중주파수 차분을 통해 전리층 지연 오차 성분의 대부분을 제거하는 것이다

(Hofmann-Wellenhof et al. 2007). 그러나 이는 이중주파수 수신 이 보장되어야 하기 때문에 단일주파수 수신만 가능한 상황에서는 어려움이 발생한다. 단일주파수 수신기에서는 보통의 경우 위성항법시스템 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 별로 각 시스템의 위성에서 송신하는 전리층 보정 모델을 활용한다. 대표적인 예로는 GPS의 Klobuchar 모델, Galileo의 NeQuick G 모델 등이 존재한다.

GPS의 전리층 지연 보정 모델인 Klobuchar 모델은 전리층이 일정 고도 (350 km)에 밀집되어 있다고 가정하고 해당 고도에서의 이온량을 계산하는 개념이다. 이 모델은 8개의 계수를 항법 메세지를 통해 제공한다. 사용자는 α_{0-3} , β_{0-3} 로 구성된 계수를 수신하여 Klobuchar 모델의 기본 폴린 코사인함수의 반주기 형태의 보정 모델을 생성할 수 있다. 이때 α 는 코사인 함수의 진폭을 결정하고, β 는 주기를 결정한다. Klobuchar 모델은 전 지구 어디에서나 평균적으로 50~60%의 오차 향상 성능을 낼 수 있도록 고안되었다 (Hofmann-Wellenhof et al. 2007).

Galileo의 전리층 지연 오차 보정 모델인 NeQuick G 모델의 계수도 GPS와 마찬가지로 항법 메세지를 통해 제공된다. GPS와 다르게 3개의 계수로 구성된다. 그리고 3차원으로 가정하여 전리층 전자밀도 모델을 구성한다. 이 모델은 계수와 신호가 송신된

Received Mar 21, 2023 Revised May 11, 2023 Accepted May 16, 2023

[†]Corresponding Author

E-mail: youngle@konkuk.ac.kr

Tel: +82-2-450-3358

Dana Park https://orcid.org/0000-0003-2232-6661

Young Jae Lee https://orcid.org/0000-0002-9203-048X

달을 이용하여 미리 계산된 MODIP 데이터 표를 통해 지구 자기장 기준으로 보정된 위도 값을 계산한다. 이 값을 활용하여 총 이온량을 계산하고 전리층 지연 거리를 계산한다. 내륙 지역에서는 최대 72%, 해안 지역에서는 최대 69%의 오차가 개선된다고 발표되었다 (European Commission 2016, Setti Júnior 2021).

그러나 앞서 언급된 모델들은 전 지구에 걸쳐 평균적인 성능을 발휘하도록 설계되었다. 따라서 구체적인 지역에서 정확도를 효과적으로 높이는 데는 어려움이 있다. 한국지역에서 정확도 향상을 위해 지역적인 특성을 파악하여 추가적인 과정을 통해 정확도를 개선해야 한다고 판단된다.

따라서 본 논문에서는 10년간의 데이터 분석을 통해 한국 지역의 전리층 지연 특성을 파악한 후 보다 접근이 쉬운 Klobuchar 모델을 이용하여 개선된 한국지역의 전리층 보정 모델을 제시한다. 한국 지역의 전리층 지연 오차 특성 분석을 위하여 국토지리정보원 및 IGS 기지국 데이터를 활용하여 실제로 계산된 전리층 지연 거리와 해당 시점에서 수신된 Klobuchar 모델의 전리층 지연 거리를 각각 계산하였다. 다음으로는 두 모델을 비교하여 개선된 Klobuchar 모델의 개선방향을 설정하였다. 각 전리층 보정 모델과 실제 수신된 전리층 지연 거리의 잔류오차의 표준편차를 1차 지표로 삼아 가장 효과적인 모델을 고안하였다. 그 후 각 모델을 실제 수신된 데이터에 적용하여 수신기의 위치를 계산하였고, 전리층 지연 오차가 직접적으로 영향을 미치는 수직 오차 개선율을 2차 지표로 하여 모델의 성능을 최종적으로 평가하였다.

2. CHARACTERISTIC ANALYSIS OF IONOSPHERIC DELAY IN KOREA REGION

한국지역의 전리층 지연 오차 특성 분석을 위해 본 논문에서는 2013년부터 2022년까지 총 10개년 간 매일 1일의 데이터를 활용하였다. 경향 분석을 위하여 매 시점에서 수신되는 모든 위성의 전리층 지연 거리 값의 평균을 이용하였다. 국내 기지국 중 용산 기지국과 수원 기지국 데이터를 가용성을 판단하여 선택적으로 이용하였다. 10개년간의 데이터를 한 기지국에서 일관적으로 활용하는 것에 어려움이 있어 해당 날짜에 활용 가능한 기지국을 용산과 수원 기지국에서 선택하였다. 2016년 이전 데이터는 IGS 데이터 센터의 해당 기지국의 navigation message와 30초 간격으로 수신된 observation data를 활용하였고 그 이후 데이터는 국토지리정보원 데이터 센터로부터 마찬가지로 해당 기지국에 해당하는 navigation message와 observation data를 활용하였다. 기지국의 세부사항은 Table 1과 같다.

10개년간의 월간 데이터를 처리하여 출력한 결과는 부록과 같다. 각 그래프 내에서 가로 축은 한국지역 기준 0시부터 24까지의 시간을, 세로 축은 거리 단위로 계산된 전리층 지연 오차를 의미한다. 빨간색 범례는 해당 기준국 위치에서 수신된 Klobuchar 모델 계수를 통해 계산된 값이며 파란색 범례는 이중주파수 차분을 통해 계산한 전리층 지연 오차를 의미한다.

Klobuchar 모델을 통해 계산된 값은 해당 날짜의 24시간 동안 전리층 지연 오차거리를 계산하였다. 해당 기지국의 위도, 경도 값을 활용하고 수신된 Klobuchar 계수 8개, 위성과의 양각, 방위

각, Time of Week (TOW) 정보를 활용하여 해당 시점의 해당 지점에서의 전리층 지연 오차 시각을 계산하여 거리로 변환하였다. 한편, 이중주파수 차분을 통해 계산한 전리층 지연오차 값은 해당 시점의 해당 기지국에서의 L1, L2 코드 의사거리 측정치를 차분하여 전리층 지연 오차 거리를 계산하였다. 최종적으로 전리층 지연 오차를 보정할 때는 의사거리에 전리층 지연을 거리단위로 환산한 값을 보정하기 때문에 각 모델에 대해 거리 단위의 전리층 지연 값을 계산하여 비교분석을 진행하였다. 모델을 정밀하게 설계하기 위해서는 측정된 전리층 지연 오차에서 위성 및 수신기의 DCB, 주파수 간의 IFB 등의 성분이 제거되어야 한다. 그러나 본 논문은 한국지역에서 측정된 전리층 지연 거리의 경향을 분석하여 기존 Klobuchar 모델을 개선하는 것이 초점이다. 또한 해당 성분들이 전리층 지연거리의 대세에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단하여 정밀 전리층 지연 거리를 추정하는 것이 아닌 측정된 전리층 지연거리를 활용하여 분석하였다.

분석에 선택된 기간에는 태양 흑점 폭발이 가장 활발하였던 2014년이 포함되어 있다. 또한 태양 흑점 폭발 주기는 11년으로 다음 최고점은 2025년으로 예상된다. 이를 기반으로 출력된 결과를 크게 두 분류로 나눌 수 있었다. 최고점이거나 이에 가까워 비교적 다른 양상을 보이는 2013, 2014, 2015, 2022년을 묶어 '활성상태년도'로 명명하고 평범한 양상을 보이는 나머지 년도인 2016년부터 2021년까지를 '비활성상태년도'로 명명하였다.

먼저 활성상태년도에서는 실제 수신된 전리층 지연 오차의 코사인 부분의 진폭 값이 Klobuchar 모델과 거의 유사하거나 조금 작은 정도에 그쳤다. 또한 연중 이온이 가장 활발한 계절인 봄과 가을에 전리층 지연 오차 값 자체가 컸고 이때 Klobuchar 모델과의 차이도 두드러졌다. 다음으로 비활성상태년도에서는 실제 계산된 전리층 지연 거리 값이 1년 내내 진폭이 대부분 존재하지 않을 정도의 개형을 가지는 것을 확인하였다. 코사인 부분을 제외하고 하루 중 일정 시간동안 유지되는 dc 값은 비교적 최근인 2020년부터 Klobuchar 모델과 거의 유사해지는 것을 확인할 수 있다. 그러나 그 이전의 거리 단위에서 약 3-5 m 정도로 눈에 띄게 차이가 있음을 확인할 수 있다. 이를 통해 본 논문에서는 Klobuchar 계수로 계산된 모델의 진폭과 dc 값을 조절하여 개선된 Klobuchar 모델을 구성하였으며 자세한 모델은 3.1절에서 설명한다.

3. CORRECTION MODEL DESIGN AND PERFORMANCE EVALUATION

3.1 한국지역 특성 반영 모델 설계

3.1.1 기존 Klobuchar 모델의 한계

Klobuchar 모델은 고도 350 km에 하전된 입자들이 모두 집중되어 있다고 가정하고 수신기를 향하는 위성신호에 포함된 전리층 지연 오차를 계산하여 제공하는 모델이다. 8개의 계수를 navigation message를 통해 송신하여 사용자에게 제공한다. 이를 활용하여 오차를 보정할 시 전리층 지연 오차 RMS의 약 50-

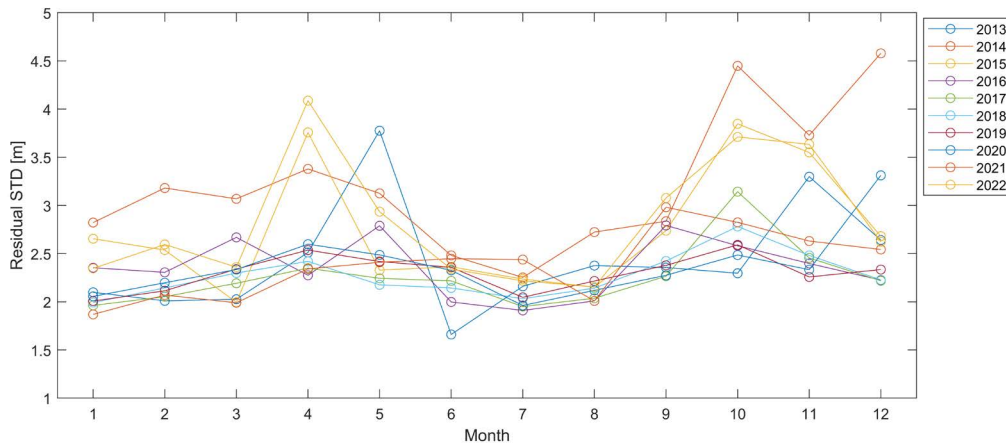


Fig. 1. Standard deviation of residual error between Klobuchar model and TEC.

60%를 보정할 수 있도록 고안되었다. Klobuchar 모델은 하루 동안의 전리층 지연 오차를 코사인 함수의 반주기와 나머지는 일정 값(dc 값)을 가지도록 설계되었다. 지역 시간으로 약 14시에 최고 값을 가지며 약 22시부터 6시까지 dc 값을 가지는 개형으로 설계되었다. dc 성분의 경우 밤시간 동안 일정 값을 가지기 때문에 'night-time constant' 성분으로도 불린다. 설계된 논문에서는 5 ns를 가지도록 설계되었다 (Klobuchar 1987).

사용자는 수신기의 경도와 위도, 위성과 수신기간의 양각과 방위각, TOW 그리고 Navigation Message에 포함된 Klobuchar 계수를 활용하여 전리층 지연 오차를 계산할 수 있다. 이 과정에서 사용자의 경도와 위도를 통해 위치 정보를 반영하여 Klobuchar 모델의 코사인 반주기 부분의 주기와 진폭을 결정하여 전리층 지연 오차가 계산된다. 따라서 본 논문에서는 이미 평균적인 성능을 내고 있는 Klobuchar 모델을 한국 지역의 전리층 지연 오차 특성을 반영하여 수정하여 특정 성능 이상의 성능을 내고자 한다. 사용자의 위치가 코사인의 주기와 진폭을 관장하기 때문에 지역적 특징을 보다 효과적으로 반영하기 위하여 본 논문에서는 코사인 파트의 주기와 진폭, 그리고 dc 값을 수정하는 방식으로 수정된 Klobuchar 모델을 제안한다.

3.1.2 수정된 Klobuchar 모델 구성

2장에서 설명한 두 경향을 기반으로 본 논문에서는 Klobuchar 모델의 코사인의 진폭을 흑점 폭발 최고 년도와 해당 년도의 차이의 함수로 구성하여 수정하였다. 즉, 최고 년도에 가까울수록 Klobuchar의 진폭을 그대로 가져가고 멀어질수록 진폭의 크기를 줄여 하루동안 dc 값이 유지되는 정도로 조절하였다.

dc 값의 경우는 관찰한 년도 안에서 결정하는 것의 한계가 있어 추후의 데이터를 확인하여 개선의 여지가 있으나 본 논문에서는 하나의 값으로 설정하여 보상에 주었다. 개선된 Klobuchar 모델의 코사인 파트의 진폭에 대한 함수는 Eq. (1)과 같다. 데이터 수신 시점의 년도의 함수로 주기함수를 이용하여 11년마다 반복될 수 있게 구성하였다.

$$\text{Modified model's AMP} = \left[-0.9 \left| \sin \left(\frac{\pi}{11} (\text{year} - 3) \right) \right| + 1 \right] * \text{Klobuchar model's AMP} \quad (1)$$

여기서 AMP는 각 모델의 코사인 파트의 진폭을 의미한다. Year는 해당 시점의 두 자리 수 년도이다.

3.2 제안 Klobuchar 모델 성능평가

개선된 Klobuchar 모델의 성능을 평가하기 위하여 하루 동안의 설정한 모델로 계산한 전리층 지연 오차 거리와 실제 계산된 전리층 지연 오차거리의 잔류오차를 계산한 후 표준편차를 구하여 1차 지표로 설정하였다 (Yoon et al. 2021). 본 논문에서 제안하는 모델의 잔류오차 표준편차 경향은 Figs. 1, 2와 같다. 이 때 각 모델의 전리층 지연 오차 거리를 계산하는 방법은 2장에서 설명된 바와 같다. 해당 시점에서 활용가능 했던 기준국을 용산, 수원, 기지국 중에 선택하였고 앞서 설명된 방법으로 계산된 각 모델의 전리층 지연 오차 거리를 다시 차분하여 잔류오차를 계산하였고 이 잔류오차의 표준편차를 구하는 방식을 계산하였다.

Fig. 1은 기존 Klobuchar 모델과 실제로 계산된 전리층 지연 거리의 잔류오차의 표준편차를 계산하였고, Fig. 2는 본 논문에서 제안하는 개선된 Klobuchar 모델과 실제 전리층 지연거리와의 잔류오차 결과이다. 기존 Klobuchar 모델에서는 활성상태년도에서 잔류오차가 큰 경향이 발생한다. 특히 이온량 자체가 많은 봄과 가을에는 눈에 띄게 잔류오차가 커졌다. 이로부터 이온량 자체가 많을수록 실제와 모델과의 차이가 커짐을 알 수 있다.

반면 본 논문에서 제안하는 모델과 실제 전리층 지연 거리 잔류오차 결과에서는 전반적인 잔류오차 값이 개선되었다. 활성상태년도의 잔류오차의 표준편차가 크게 개선되어 활성상태년도와 비활성상태년도가 비슷한 정도의 잔류오차를 나타내었다. 봄과 가을에서도 이전 모델보다 잔류오차가 개선됨을 확인할 수 있다. 대표적으로 활성상태년도의 예인 2022년 4월의 경우 잔류오차의 표준편차가 약 4.0878에서 3.0317로 약 25.83% 개선되었다. 또한 2014년 12월의 경우 약 4.5790에서 2.8318로 약 38.15% 개선된 결과를 보였다.

제안한 모델의 실제 위치 정확도 계산 성능 파악을 위하여 기지국 데이터를 활용하여 각 시점에서의 위치오차를 계산하였다. 각 모델의 전리층 지연 오차 거리 및 잔류 오차를 계산할 때 선택되었던 기지국 데이터의 observation data와 navigation message

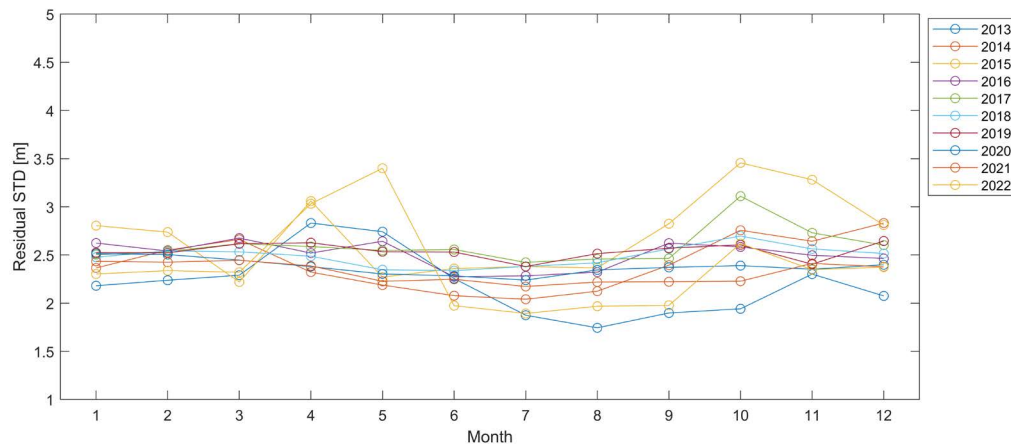


Fig. 2. Standard deviation of residual error between modified Klobuchar model and TEC.

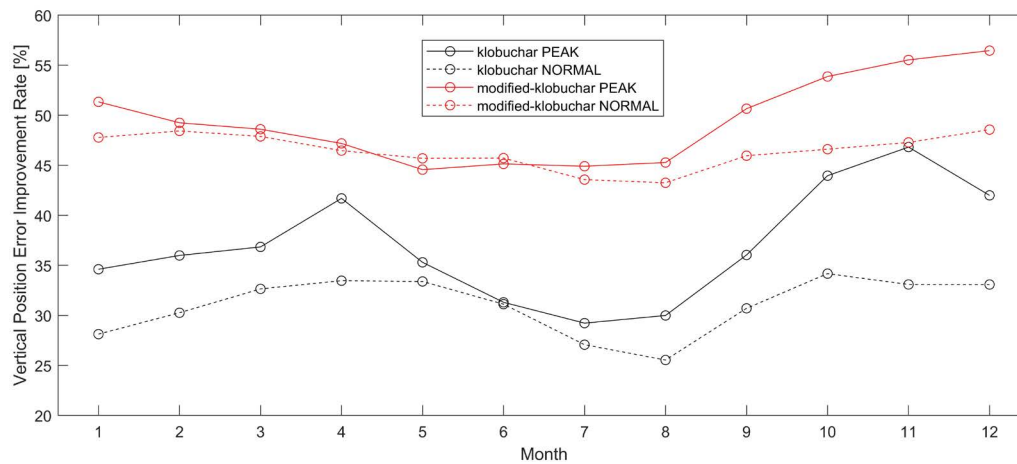


Fig. 3. Vertical position error improvement rate.

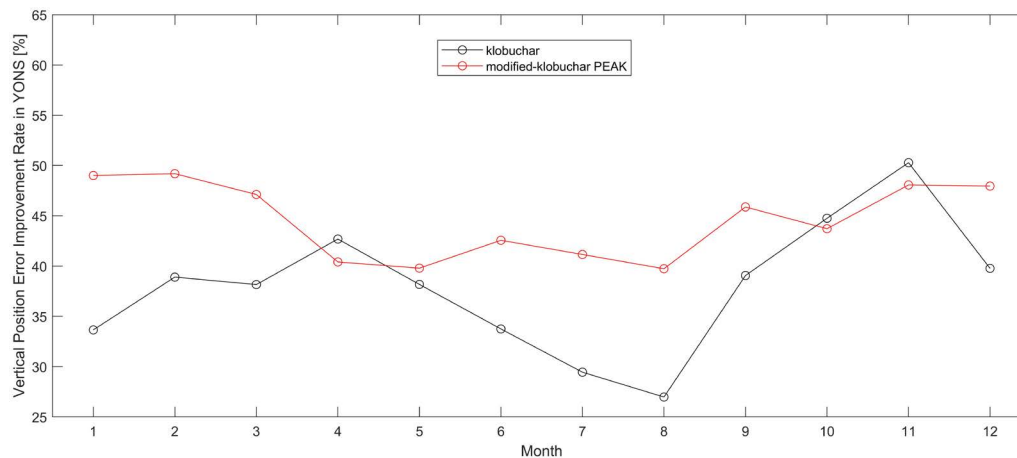


Fig. 4. Vertical position error improvement rate in 2022 (YONS).

를 통해 의사거리와 위성 좌표를 구하였고 이를 이용해 해당 시점의 위치오차를 계산하여 기준 값으로 활용하였다. 각 모델로부터 구한 보정모델을 통해 보정된 의사거리를 이용하여 개선된 위치오차를 계산하였다. 이 때 전리층 지연 오차 보상을 통해 실질

적으로 개선되는 것은 의사거리 오차에 직접적으로 영향을 받는 수직 오차이다. 따라서 수직오차 개선율을 2차지표로 하여 모델의 성능을 평가하였다. 전리층 지연 오차 지연을 보상하지 않고 계산된 위치를 기준으로 수직 오차가 개선된 정도를 백분율로 환

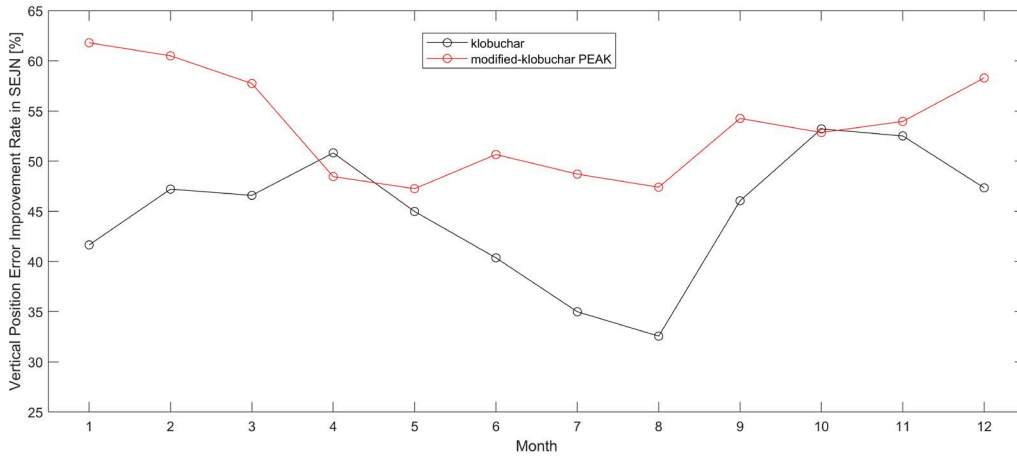


Fig. 5. Vertical position error improvement rate in 2022 (SEJN).

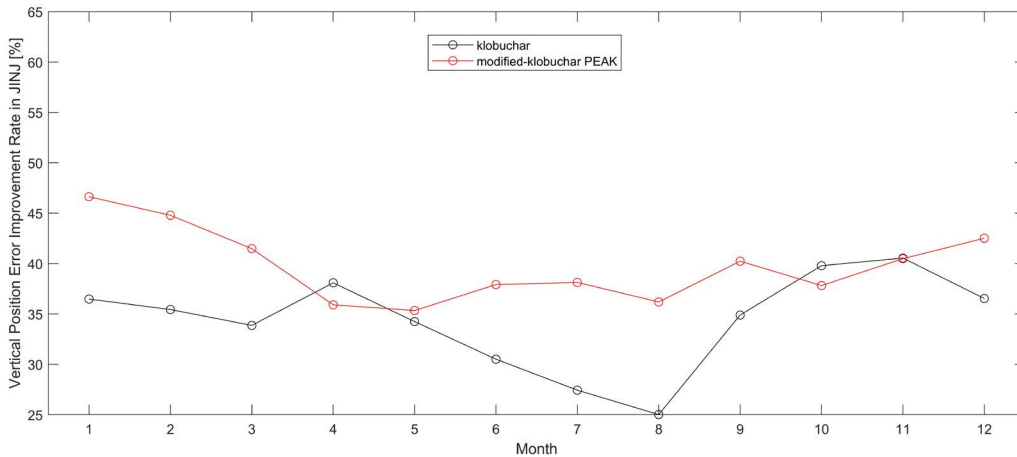


Fig. 6. Vertical position error improvement rate in 2022 (JINJ).

산하여 2차지표로 설정하였다.

Fig. 3은 활성상태년도 (PEAK)와 비활성상태년도 (NORMAL)로 나눠 기존 Klobuchar 모델과 개선된 Klobuchar 모델의 성능을 용산, 수원 기지국 데이터를 활용하여 10년간 계산한 결과이다. 기존 Klobuchar 모델은 연중 이온량이 많은 봄과 가을에 성능이 가장 많이 향상되고 이외의 계절에는 비교적 성능 향상의 정도가 덜하였다. 이는 1차지표 결과에서도 분석한 내용과 마찬가지로 이온량의 절대적인 양이 많을수록 개선의 여지가 많기 때문이다. 개선된 모델의 경우 모든 달에서 기존의 모델보다 향상된 성능을 나타내었다. 더욱이 봄과 가을 뿐만 아니라 모든 계절에서 안정적으로 오차가 향상되는 결과를 가져왔다. 기존 Klobuchar 모델의 경우 수직 위치 오차 향상율이 약 25~45%에 그쳤지만 개선된 모델의 경우 약 45~56%까지 향상되었음을 확인할 수 있다.

또한 Figs. 4~6은 한국지역에서 전반적인 성능 확인을 위하여 용산, 세종, 진주 기지국의 데이터를 활용하여 2022년 1년간의 성능평가 결과이다. 이때 추가된 세종, 진주 기지국의 세부 정보는 Table 1에 포함 되어있다. 해당 결과로부터 제안한 모델이 모델을 설정하였던 용산 기지국은 물론 근방인 세종 기지국과 거리가 떨어진 진주 기지국에서 전반적으로 효과적인 것을 확인할 수 있다. 다만 4월과 10, 11월의 경우 기존의 Klobuchar 모델의 성능이

Table 1. Details of reference station (GNSS Data Center 2023).

Name of reference station	YONS	SUWN, SEJN, JINJ
Receiver	Trimble alloy	Trimble NETR9
Antenna	TRM159900.00 SCIS	TRM59800.00

근소치로 앞서는 경향이 나타났다. 이는 봄과 가을에 성능이 가장 뛰어난 Klobuchar 모델의 경향과 모든 계절에서 평균적으로 오차가 향상되는 개선된 Klobuchar 모델의 특성 때문이라고 판단된다. 이를 제외하면 기존 Klobuchar 모델의 개선율보다 최대 25% 이상 더 개선됨을 확인할 수 있다. 따라서 한국지역 전리층 지연 특성을 고려하여 개선된 Klobuchar 모델은 보다 효과적으로 전리층 지연 오차를 제거할 수 있다고 판단된다.

4. CONCLUSION

위성신호를 이용하여 위치를 계산할 때 위성에서 송신된 신호는 전리층과 대류층을 지나 사용자에게 전달된다. 전리층을 지나 오는 과정에서 전리층내에 하전된 이온들에 의해 신호가 방해를 받아 수신기까지 도달하기까지의 시간이 지연된다. 시간 지연은

의사거리의 값이 커지게 만들고 이렇게 발생한 의사거리 오차는 실제 위치 계산 시에도 반영되어 위치 오차에까지 영향을 미친다. 이 오차는 위치 오차의 원인 중 가장 큰 부분을 차지할 정도로 영향이 크다. 따라서 정확한 위치를 계산하기 위해서는 전리층에 의한 오차는 제거되어야 한다.

전리층 지연 오차를 제거하는 가장 효과적인 방법은 이중주파수 차분을 통해 제거하는 것이다. 그러나 이는 필연적으로 이중주파수 차분이 가능해야 한다. 상용되는 수신기 중에는 단일주파수만 수신 가능한 종류가 존재한다. 이러한 모델들에서는 이중주파수 차분은 물론 수신 불가능하여 각 GNSS 시스템별로 제공하는 전리층 보정 모델을 활용한다. 대표적인 예로는 GPS의 Klobuchar 모델과 Galileo의 NeQuick G 모델이 있다.

GNSS는 보통 전 지구 항법을 관할하기 때문에 지구 전체에서 성능을 평균적으로 가장 잘 낼 수 있도록 전리층 보정 모델을 설계한 뒤 배포한다. 이를 이용하면 어느 정도의 오차 보정이 가능하지만 특정 성능 이상을 발휘하지 못하는 한계가 존재한다. 따라서 본 논문에서는 한국지역에서 특정 성능 이상을 발휘할 수 있도록 개선된 Klobuchar 모델을 고안하였다. 제공되는 보정 모델 중 가장 접근이 용이하기 때문에 Klobuchar 모델을 기반으로 하였다.

먼저 한국지역의 전리층 지연 오차 특성을 분석하였다. 총 10년간의 데이터를 활용하였고, 매달 1일의 데이터를 활용하여 총 120일 동안의 경향을 파악하였다. 기지국에서 수신한 데이터로 계산된 실제 전리층 지연 오차와 GPS에서 제공하는 Klobuchar 모델을 통해 계산한 전리층 지연 오차를 같이 출력하여 비교 분석하였다. 이때, 국토지리정보원 데이터 통합센터와 IGS 데이터 센터의 데이터를 활용하였다. 용산 기지국과 수원 기지국의 가용성을 판단하여 활용하였다. 이를 통해 분석한 한국지역의 전리층 지연 오차를 분석하였다.

관찰한 기간 내에는 태양흑점폭발이 가장 활발하였던 2014년이 포함되었고, 이는 주기가 11년으로 다음으로 가장 활발할 것은 2025년으로 예상된다. 2014년을 포함하여 2013, 2015, 2022년을 활성상태년도, 나머지를 비활성상태년도로 구분하였다. 활성상태년도에서는 Klobuchar 모델의 코사인 진폭을 무난히 따라가는 경향을 보였다. 비활성상태년도에서는 실제 계산된 전리층 지연 오차는 코사인의 개형을 가지지 않는다고 봐도 무방할 정도로 진폭이 크지 않았다. 이 두 특성을 통해 보정하고자 하는 시점이 태양흑점폭발이 가장 활발한 년도와 얼마나 차이가 나는지를 함수로 하여 코사인의 진폭을 결정할 수 있도록 모델 개선 방향을 설정하였다. 이는 11년 주기로 반복되어야 하기 때문에 사인 주기 함수를 활용하여 설정하였다. 그리고 코사인과 함께 Klobuchar 모델을 구성하는 dc 값을 조정하였다. 2020년도에 들어 서부터 Klobuchar 모델과 거의 유사해진 경향이 존재하지만 그 이전 년도에서는 거리 단위로는 약 3-5 m 정도의 차이가 존재하였다. 따라서 평균치를 추산하여 상수 값으로 보정하여 개선된 Klobuchar 모델의 dc 값을 설정하였다.

이렇게 설정한 모델을 세부적인 사항을 변경해가며 2번에 걸쳐 성능을 평가하였다. 1차적으로는 제안한 모델과 실제 전리층 지연 오차 값의 잔류오차를 계산하여 평가하였고, 2차적으로는 실제 위치오차를 계산한 뒤 가장 크게 개선되는 수직오차 개선을

을 통해 평가하였다.

기존 Klobuchar 모델은 1차지표 평가에서 활성상태년도에 해당하는 기간에서 잔류오차가 눈에 띄게 컸다. 이온량이 특히 많은 봄과 가을에서는 더 큰 오차가 발생하는 것을 확인하였다. 2차 지표 평가에서는 전반적으로 약 30-40% 정도의 개선율을 가지는 것을 확인하였다. 잔류오차와 비슷한 경향으로 이온량의 절대적 양이 많았던 봄과 가을에서는 개선도도 더 컸음을 알 수 있다. 이로부터 이온량의 절대적 양이 많을수록 개선의 여지가 많음을 확인하였다.

본 논문에서 제안된 모델에서는 1차지표 평가에서 잔류오차가 전체적으로 크게 개선이 되었다. 앞서와는 반대로 활성상태년도와 비활성상태년도 모두에서 잔류오차가 크게 향상되었다. 2차 지표 평가에서는 기존 Klobuchar 모델의 경우 약 25-45%정도 개선이 되었지만 개선된 모델에서는 약 45-56%까지 수직오차가 향상되었다. 기존 모델의 특징인 봄과 가을에서만 성능이 크게 향상되었던 점 또한 개선되어 모든 계절에서 성능이 의미 있게 향상됨을 확인하였다. 본 논문에서 제안하는 한국 지역의 전리층 지연 오차 특성을 반영하여 개선된 Klobuchar 모델을 이용하면 기존의 Klobuchar 모델 보다 수직 위치 오차를 보다 효과적으로 개선할 수 있다.

본 논문에서는 용산, 수원 기지국 데이터를 활용하여 한국 지역의 전리층 지연 오차 특성을 분석하였다. 활용한 기지국의 위치가 수도권에 한정되어 있기 때문에 보다 넓은 범위의 국내 기지국 데이터를 활용한다면 보다 구체적인 전리층 지연 오차 특성 분석이 가능하여 보정 성능이 향상될 수 있을 것이라고 기대된다.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, D. Park. and Y. J. Lee.; methodology, D. Park. and Y. J. Lee.; software, D. Park. and Y. J. Lee.; validation, D. Park. and Y. J. Lee.; data curation, D. Park. and Y. J. Lee.; writing—original draft preparation, D. Park.; writing—review and editing, D. Park. and Y. J. Lee.; visualization, D. Park.; supervision, Y. J. Lee.; project administration, Y. J. Lee.; funding acquisition, Y. J. Lee.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

European Commission 2016, Galileo Open Service - Ionospheric Correction Algorithm for Galileo Single Frequency Receiver. https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo_Ionospheric_Model.pdf

- GNSS Data Center, reference station information [Internet], cited 2023 Mar 17, available from: <https://gnssdata.or.kr/cors/getCorsView.do>
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. 2007, GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more. Springer Science & Business Media (Vienna: Springer), pp.122-128
- Klobuchar, J. A. 1987, Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users, IEEE Transactions on aerospace and electronic systems, AES-23, 325-331. <https://doi.org/10.1109/TAES.1987.310829>
- Setti Júnior, P. D. T., Aquino, M., Veetil, S. V., Alves, D. B. M., & da Silva, C. M. 2021, Seasonal analysis of Klobuchar and NeQuick G single-frequency ionospheric model's performance in 2018, Advances in Space Research, 68, 4824-4833. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.11.013>
- Yoon, M. S., Ahn, J. S. & Joo, J.-M. 2021, A Residual Ionospheric Error Model for Single Frequency GNSS Users in the Korean Region, Journal of Advanced Navigation Technology, 25, 194-202. <https://doi.org/10.12673/jant.2021.25.3.194>



Dana Park received the B.S. degree in Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Konkuk University, Seoul, South Korea, in 2021, where she is currently pursuing the M.S. degree in same department. Her research interests include GNSS, relative

positioning, sensor integration and Android smartphone navigation.



Young Jae Lee is a professor in the Department of Aerospace Engineering at Konkuk University, Seoul, Korea. He received his BS and MS in Aerospace Engineering from Seoul National University in 1982 and 1985, and Ph.D. in from the University of Texas at Austin in 1990. His research interests include

development of aircraft landing system using GNSS, development of UAV navigation & control systems, navigation sensor integration, precise positioning using GNSS, and other GNSS related engineering problems.

APPENDIX

