

## GPS 전리층 모델의 장기간 가용성 및 정확도 변화 분석

# Long-term Analysis of Availability and Accuracy Variation of GPS Ionospheric Delay Model

김정래\* · 김용래  
한국항공대학교 항공우주공학과

Jeongrae Kim\* · Yongrae Kim

\*Department of Aerospace Engineering, Korea Aerospace University, Goyang 10540, Korea

### [요 약]

위성 항법 장치 (GPS; global positioning system) 항법메시지에 포함된 Klobuchar 전리층모델은 L1 단주파수 사용자들에게 전리층 보정정보를 제공한다. 전리층모델 정확도는 항법해의 정확도에 큰영향을 끼치므로 이에 관한 분석이 필요하다. 본 연구에서는 1993년부터 2022년까지의 GPS 항법메시지를 조사하여 Klobuchar 모델의 정확도 및 계수 존재 여부와 효용성 여부를 분석 하였다. 초기 GPS 항법메시지의 경우 전리층데이터를 포함하지 않는 경우가 많으며, 전리층모델을 포함되어 있더라도 정확도가 상당히 낮은 경우가 많이 존재하였다. 전리층모델의 정확도가 안정화된 2002년부터 2022년까지 전리층모델의 정확도 변화와 지자기 위도에 따른 정확도 차이를 IGS (International GNSS Service)에서 제공하는 전리층모델과 비교하는 방법으로 분석하였다.

### [Abstract]

The Klobuchar ionospheric model included in global positioning system (GPS) navigation messages provides ionospheric correction information to single-frequency users. This ionospheric model accuracy has a significant impact on the accuracy of navigation solutions. We examine the GPS navigation messages from 1993 to 2022 and analyze their accuracy, presence of coefficients and accuracy of the Klobuchar model. Early GPS navigation messages often did not include ionospheric data, and even when they did include ionospheric models, the accuracy was often quite low. From 2002, when the accuracy of the ionospheric model was stabilized, until 2022, the accuracy of the ionospheric model is analyzed by comparing it with the ionospheric model of the International GNSS Service (IGS). Changes in accuracy per day and per year and accuracy differences along geomagnetic latitude are analyzed.

**Key word** : Global positioning system (GPS), Global navigation satellite system (GNSS), Ionospheric delay, Klobuchar model.

<https://doi.org/10.12673/jant.2023.27.6.841>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 30 November 2023; Revised 14 December 2023  
Accepted (Publication) 18 December 2023 (29 December 2023)

\*Corresponding Author; Jeongrae Kim

Tel: +82-2-300-0110

E-mail: jrkim@kau.ac.kr

## I. 서론

위성항법시스템(GNSS; Global Navigation Satellite System)은 GNSS 위성에서 송신하는 전파신호를 이용하여 사용자의 위치를 계산한다. 전파가 전리층을 통과할 때 신호지연이 발생하게 되는데, 이는 사용자의 위치오차를 유발하게 된다. 전리층은 상공 50-1000 km에 분포하는 고층 대기로 이 지역의 이온과 자유전자가 GPS 신호를 굴절시켜 신호 지연을 발생시킨다. 특히 여러 층으로 분류된 전리층 중에서 F2층의 전자밀도가 가장 높으며 해당 층에서 전리층 지연값이 가장 크다 [1].

일반적으로 사용되는 단주파 수신기의 경우 GNSS에서 실시간으로 제공하는 전리층모델을 이용하여 신호지연을 보정하는 방법을 사용하는데, 대표적인 것이 GPS (Global Positioning System)에서 사용하는 Klobuchar 모델이다. 이는 미국의 Klobuchar가 제안한 전리층 모델로, 이전에 연구된 전리층 정보를 바탕으로 한 경험적 접근법에 기반을 둔 모델이다 [2]. GPS 위성에서는 단주파 수신기 사용자들을 위해 전리층 모델의 진폭과 주기로 구성된 총 8개의 Klobuchar 모델 계수를 제공하며, Klobuchar 모델을 적용하면 전리층에 의한 신호지연을 50%까지 보정할 수 있다고 알려져 있다 [3]. 모델 계수가 방송 메시지에 포함되어 있기 때문에 실시간으로 모델을 활용할 수 있다는 장점이 있다.

다른 방법으로는 여러 연구기관에서 제공하는 전리층모델을 사용하는 것이다. 대표적인 것으로 International GNSS Service (IGS)의 세계 전리층 지도 (GIM; global ionosphere map)가 있다. 전세계에 배치된 수 백기의 IGS 수신국 데이터를 처리하여 전세계 전리층분포를 나타낸 것인데, Klobuchar 등 항법메시지의 전리층 모델에 비해 높은 정확도를 가진다 [4]. 후처리 방식으로 제공되어 실시간 용도로는 사용할 수 없다는 단점이 있다. 현재는 IGS RT-GIM (Real-Time GIM) 등 실시간 전리층모델도 제공되고 있는데, 인터넷 등 별도의 데이터 전송수단이 필요하다는 단점이 있다 [5].

GNSS 항법메시지에 포함된 전리층 보정정보의 정확도는 다른 전리층 모델보다는 떨어지지만 항법신호와 같이 전송되므로 데이터 획득이 수월하고, 표준화된 모델이라서 모든 GNSS 수신기에서 사용할 수 있다는 장점이 있다. 전리층에 의한 신호지연은 사용자 위치오차에 직접적인 영향을 미치고, 현재 가장 큰 오차 요인으로 알려져 있다. 이러한 항법메시지 전리층 모델의 성능 및 변화 특성을 파악하는 것은 수신기 위치해 성능 파악에도 도움을 줄 수 있다.

대표적인 항법메시지 모델인 Klobuchar 모델에 관한 연구는 과거에도 어느정도 진행되었다. Stepniak은 지자기 활동과 사용자의 위도에 따른 Klobuchar 모델의 변화를 연구하였는데, 지자기활동이 활발한 날과 고위도 지역의 정오 부근에서 Klobuchar 모델의 오차가 큰 것으로 파악되었다 [6]. Swamy는 2006년 봄과 가을에서 저위도 지역의 Klobuchar 모델과 IRI-2007 모델의 전리층 지연량을 비교하였다 [7]. Farah는

1998년부터 2001년까지 저, 중 고위도 지역을 각각 1개씩 선정하여 Klobuchar와 NeQuick 모델의 전리층 지연량을 비교하였다 [8]. Kim은 특정 지역이 아닌 전세계 Klobuchar 모델에 대한 분석을 수행했는데, 2003년부터 2014년까지 Klobuchar 모델의 전리층 지연 오차를 분석하였다 [9]. IGS 전리층 지도 모델을 참값으로 설정하여 IGS 모델에 대한 차이를 오차로 계산하였으며, 계절별 오차 변화와 하루 중 시간대별 오차 변화에 대해서 분석하였다. 전리층에 영향을 주는 태양 활동, 지자기 활동과 Klobuchar 모델 오차의 상관관계에 대해서도 분석하였다.

본 논문은 동일한 교신저자인 Kim의 연구를 확장한 연구로 전리층 데이터 분석 기간을 2002년부터 2022년까지로 확장하여, 21년간 장기적인 분석값을 도출하였다 [9]. GPS 항법메시지에서 전리층보정정보를 제공하기 시작한 1993년부터의 30년간 전리층 정보를 분석하여 전리층정보 존재 여부 및 사용가능성 여부를 분석 하였다. 이를 통해 전 세계에서의 Klobuchar 모델의 특성 및 전리층 지연의 연간, 계절별 변화를 파악할 수 있으며, GPS 수신기의 항법오차 변화를 예측하는데 활용될 수 있다.

## II. Klobuchar 전리층 모델

Klobuchar 모델은 350 km 상공에서 두께가 없는 가상의 단일 층에 자유전자가 밀집되어 있다고 가정하여, GPS 의사거리 신호가 단일층을 통과하는 지점인 IPP (Ionospheric Pierce Point)에서의 전리층 지연값 정보를 제공한다. 자유전자의 총 수는 지방시가 14시일 때 가장 많으며 22시에서 06시까지 일정하다고 가정한다. Klobuchar 모델은 IPP의 지자기 위도와 Klobuchar 모델의 8개 계수의 조합으로 이루어져 있는데, 다음과 같다.

$$A_I = \alpha_0 + \alpha_1 \phi_m + \alpha_2 \phi_m^2 + \alpha_3 \phi_m^3 \quad (1)$$

$$P_I = \beta_0 + \beta_1 \phi_m + \beta_2 \phi_m^2 + \beta_3 \phi_m^3$$

여기서, 4개 계수  $\alpha_n$  ( $n = 1, 2, 3, 4$ )은 전리층 지연값의 진폭  $A_I$ 를 나타내는데 사용되고, 4개 계수  $\beta_n$ 은 전리층 지연값의 주기  $P_I$ 를 나타내는데 사용된다.  $\phi_m$ 은 지자기 위도를 나타낸다. 전리층 지연값 정보는 해당 위치에서의 수직 전리층 지연값으로 나타내기 때문에, 경사각 함수를 이용해서 경사 전리층 지연값으로 변경해줘야 한다. 극지방은 모델링을 하지 않기 때문에 IPP의 위도가 74.88° 이상이면 74.88°로, -74.88° 이하이면 -74.88°로 고정하여 동일한 전리층 지연값을 출력한다.

IGS에서는 제공하는 전 세계 전리층 지도인 IGS GIM은, 높은 정확도를 가지므로 본 연구에서는 Klobuchar 오차계산 시 기준값으로 사용하였다. IGS GIM은 IONEX (Ionosphere Map Exchange) 형식으로 제공되는데, 위도는 -87.5°에서 87.5°까지 2.5° 간격으로, 경도는 -180°에서 180°까지 5° 간격으로 격

자점이 설정되었으며 동일 지역을 제외하고 총 5112개 지역에 설정된 격자점에서의 수직지연값을 제공한다. 시간은 2시간 간격인데, 2002년 11월 2일까지는 1시, 3시와 같이 홀수 시간으로 데이터가 제공되었지만 이후에는 0시, 2시와 같이 짝수 시간으로 제공된다.

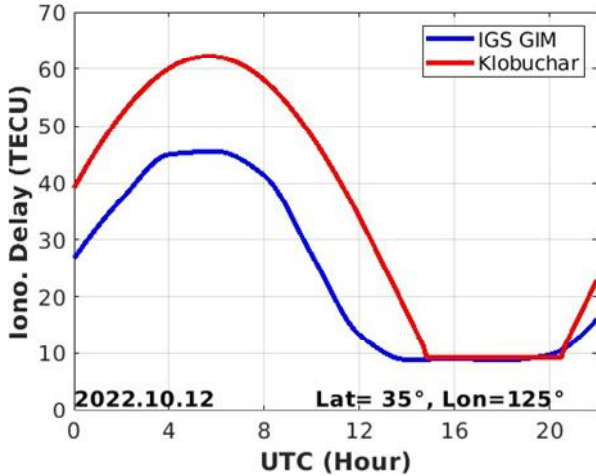


그림 1. 한반도 상공의 전리층 지연값 변화 (2012년 10월 25일)  
 Fig. 1. Ionospheric delay of the Klobuchar and IGS models over Korean peninsula (October 25, 2012)

그림 1은 Klobuchar 모델과 IGS GIM 모델의 1일 변화를 비교한 것이다. 날짜는 2012년 10월 25일로 시간은 UTC 단위이며 위치는 한반도에서 가장 가까운 IGS GIM 격자점인 위도 35°, 경도 125°를 선정하였다. TECU (Total Electron Content Unit) 은 전리층에 의한 전파신호지연의 크기를 나타내는데, 1 TECU는 0.163 m의 GPS L1 신호오차를 유발한다. 해당 날짜는, Klobuchar 모델이 실제 전리층 지연값보다 크게 추정된 경우이다. 특히 전리층 지연값이 최대가 되는 지방시 오후 2시 (UTC 5시) 전후로 실제 지연값과 Klobuchar 모델의 지연값의 차이가 컸다.

### III. Klobuchar 모델 정보 가용성 분석

GPS 항법메시지의 Klobuchar 모델 전리층 정보는 1993년부터 제공되었으나, 2001년까지 갱신주기 및 정확도 등 알고리즘의 많은 변화가 있었다. 전리층정보의 정확도의 통계값을 도출하고 성능을 분석하기 위해서는 모델이 안정화된 이후의 값만을 사용하는 것이 적절하기 때문에, GPS 전리층 정보의 가용성 등을 파악할 필요가 있다.

그림 2는 연도별 GPS Klobuchar 데이터 가용일을 나타낸 것이다. IGS FTP 저장소의 IGS 통합 항법메시지(BRDC)의 존재 유무 여부를 날짜 별로 검색하여 정리한 것이다 [10]. BRDC 파일은 수신지역에 따라 항법메시지가 약간씩 다를 수 있기 때문에 이를 통합한 파일로, 일반적으로 2시간마다 계수가 갱신된

다. BRDC 파일이 있더라도, Klobuchar 계수  $\alpha, \beta$ 가 존재하지 않는 경우가 다수 존재하는데, 이 경우에는 데이터가 없는 것으로 판단하였다. Others는 BRDC에는 데이터가 없지만 다른 IGS 수신국에는 데이터가 있는 경우이다.

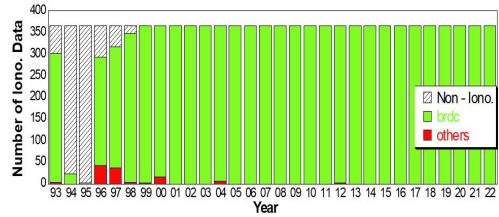


그림 2. 연도별 GPS Klobuchar 데이터 가용 날짜 (1993-2022)  
 Fig. 2. Annual variation of GPS Klobuchar data availability (from 1993 to 2022)

1993년은 300일 정도의 BRDC 데이터가 존재하였는데, 오히려 1994년에 대폭 감소하였고, 1995년에는 BRDC 데이터가 존재하지 않는다. 1996년부터 다시 BRDC 데이터가 존재하는데, 40일 정도의 데이터는 BRDC에는 포함되어 있지 않지만, 다른 개별 IGS 수신국의 항법메시지에 포함되어 있는 경우이다. 이는 전리층 계수의 상태가 좋지 않아서 BRDC에 포함하지 않은 것으로 추측할 수 있는데, 이를 위해 해당 날짜의 계수와 전리층 지연값을 분석하였다.

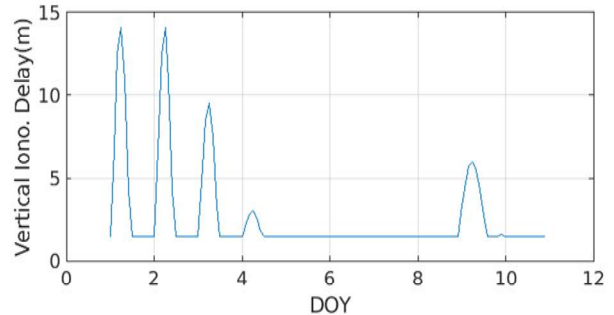


그림 3. Klobuchar 전리층 지연값 변화(2000년 1월 1일 - 11일)  
 Fig. 3. Ionospheric delay variation computed by Klobuchar model (from January 1 to 11, 2020)

그림 3은 2000년 1월 1일부터 11일까지의 Klobuchar 전리층 지연값을 2시간 간격으로 나타낸 것이다. 총 11일 중 BRDC에 전리층 계수  $\alpha_n$ 과  $\beta_n$ 이 존재하는 것은 1월 2일, 4일, 6일, 7일 등 총 4일에 불과하며, 나머지 날짜는 개별 수신기의 항법메시지에 포함되어 있거나 존재하지 않는 경우이다. BRDC에 전리층 계수가 없는 경우 개별 수신기의 계수로 대체한 뒤, 전리층 지연값을 나타내었다. 1월 5일부터 8일까지는 전리층 지연값이 최소값으로 고정되어 있는데, 오후에 최대값을 가정하는 Klobuchar 모델과 매우 다른 형태이다. 해당 날짜의 계수를 검사한 결과  $\alpha$ 로부터 계산되는 전리층 지연값의 진폭이 음수로 설정되어 있는 것을 확인하였다. Klobuchar 모델은 진폭이 음

수인 경우 전리층 지연값을 최솟값으로 설정하도록 되어 있기 때문인데, 이는 전리층 모델 계수 생성에 문제가 있었음을 의미한다.

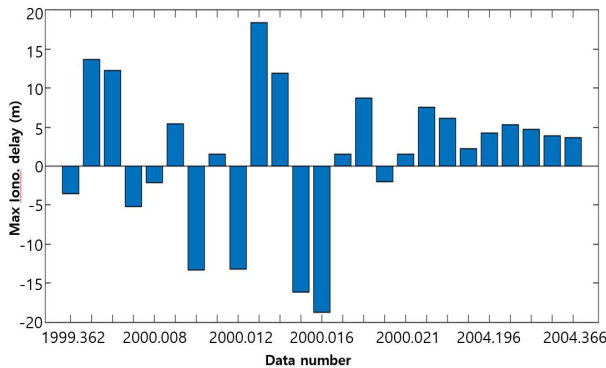


그림 4. Klobuchar 계수 대체값 사용 시 전리층 지연값 진폭 변화 (1999 - 2004)

Fig. 4. Amplitude of Ionospheric delays computed by alternative Klobuchar parameters (1999-2004)

BRDC 파일에 전리층 계수가 존재하지 않는 날짜만을 식별 한 뒤 전리층 지연값의 진폭을 계산해 보았다. 그림 4는 1999년부터 2004년까지 Klobuchar 대체값 사용 시 전리층 지연값의 진폭을 나타낸 것이다. 진폭이 음수인 경우 최솟값 대신 음수값을 그대로 표시하였다. 상당 수 날짜에서 음수 진폭이 파악되며, 일부 날짜는 양수 진폭이라도 크기가 상당히 작음을 알 수 있다.

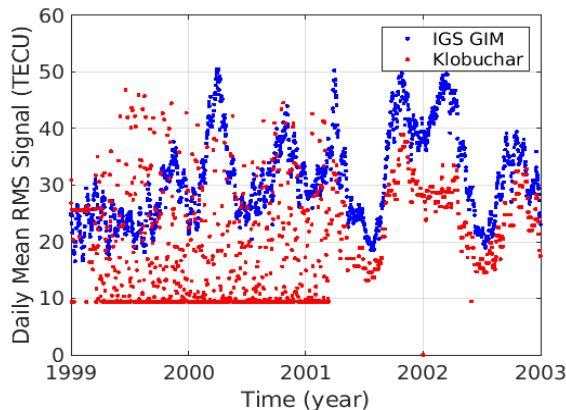


그림 5. Klobuchar와 IGS의 일일 전리층 지연값 변화 (1999-2003)

Fig. 5. Daily mean magnitude of the ionospheric delays by the Klobuchar and IGS models (1999-2003)

IGS는 1998년 6월부터 전세계 수신국에서 측정된 GPS 이중 주파수 신호를 이용하여 전리층지도 (Global Ionosphere Map, GIM)을 제공하고 있는데, GIM과 Klobuchar 모델의 전리층 지연값을 1999년 1월부터 2002년 12월까지 비교하였다 (그림 5). 2시간마다 전세계 전리층 지연값의 평균을 계산하여 TECU 단위로 표시하였다. 2001년 2월까지의 IGS와 Klobuchar 모델의

차이가 상당히 발생하는 것을 알 수 있다. 정확도가 높은 IGS 전리층 지연값을 참값으로 가정할 경우 이러한 차이는 Klobuchar 모델의 오차를 의미한다.

2001년 3월은 전리층 계수 갱신 주기가 1일에서 최대 10일 또는 20일로 변경된 시기이며, 이는 전리층 계수 생성 알고리즘의 대폭적인 변화를 의미한다. 이론적으로 전리층은 매일 변화하므로 전리층 계수의 갱신주기는 빠르게 하는 것이 좋지만, 전리층 예측기술의 한계로 인하여 짧은 주기의 계수 갱신은 오히려 전리층 정확도를 저해할 수 있다. 그림 5는 이를 입증하는 결과이며, 결론적으로 알고리즘 변경 이후로 Klobuchar 모델의 정확도가 대폭 향상되었음을 알 수 있다. 이러한 이유로 GPS Klobuchar 모델의 성능분석은 성능이 안정화된 2001년 3월 이후로 국한하는 것이 적절하다.

#### IV. Klobuchar 모델 성능 분석

##### 4-1 Klobuchar 모델 오차의 시간변화

Klobuchar 모델의 전세계 장기간 오차 변화를 분석하였다. IGS final GIM 데이터를 참값으로 가정하였으며, 모델 오차는 IGS 데이터에서 Klobuchar 모델을 빼어 계산하였다. 데이터 기간은 Klobuchar 모델 성능이 안정화된 2002년부터 2022년까지 총 21년으로 설정하였다. 데이터 처리 S/W가 1년 단위로 처리하도록 구성되어 있으므로, GPS 전리층보정정보가 안정화된 2001년 3월부터 12월까지의 데이터는 본 분석에 포함하지 않았다. 데이터의 시간 간격은 2시간 간격으로 설정하여 보간법을 사용하지 않고 IGS 파일의 전리층 지연값을 그대로 사용하였다.

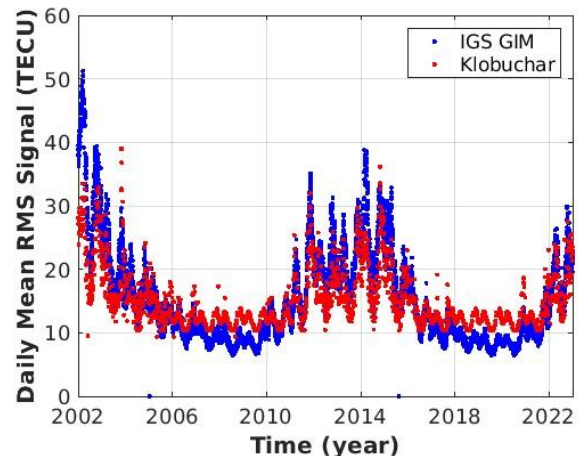


그림 6. Klobuchar 와 IGS 일일 전리층 지연값 변화 (2002-2022)

Fig. 6. Daily mean magnitude of the ionospheric delays by the Klobuchar and IGS models (2002-2022)

그림 6은 2002년 1월부터 2022년 12월까지 21년간 Klobuchar와 IGS 모델 전리층 지연값 변화를 나타낸 것이다. IGS 전리층 지연값은 IGS GIM 모델의 전세계 격자점에서 전

리층 지연값을 평균한 값이며, 1일 간격으로 생성하였다. Klobuchar 모델도 동일한 격자점 위치에서 동일한 시간 간격으로 생성하였다. 전체적으로 Klobuchar 모델이 IGS 모델을 잘 추종함을 알 수 있다. 21년간 전리층 지연값 평균을 계산하면 IGS는 15.25 TECU이고 Klobuchar는 14.82 TECU로, Klobuchar가 IGS에 비해 약간 더 낮은 전리층지연값을 제공함을 알 수 있다.

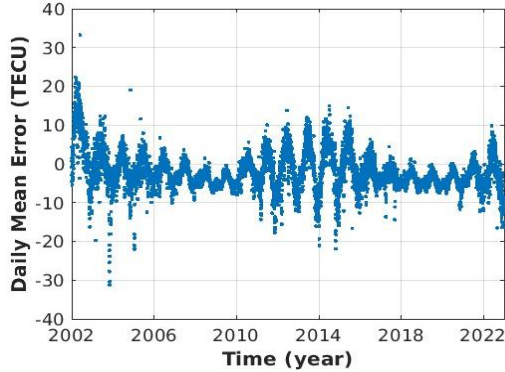


그림 7. Klobuchar 모델의 일일 전리층 오차 평균값 변화( $\Delta = \text{IGS} - \text{Klobuchar}$ , 2002-2022)  
 Fig. 7. Daily mean error of the ionospheric delays by the Klobuchar model( $\Delta = \text{IGS} - \text{Klobuchar}$ , 2002-2022)

그림 7은 21년간 Klobuchar 모델과 IGS 모델과의 전리층 지연값 차이를 나타낸 것이다. 양수 오차는 Klobuchar 지연값이 IGS 지연값보다 작은 것을 나타내고, 음수 오차는 Klobuchar 지연값이 IGS 지연값보다 큰 것을 나타낸다. 21년 오차 평균은 -2.27 TECU이다. 전리층지연값 세기가 큰 2002-2003년과 2012-2016년에는 Klobuchar 지연값이 IGS보다 작아지며, 전리층지연값 세기가 작은 2007-2009년과 2018-2020년에는 반대이다. 이는 Klobuchar 모델의 최고값은 실제 전리층 지연값보다 약간 낮게 설정되고, 일정한 상수값을 가지는 최솟값은 실제 전리층 지연값보다 약간 높게 설정되어 있기 때문인데, 전세계의 공간적, 시간적으로 다양한 전리층 지연값 분포를 간략한 함수 모델로 표현하기 위해서는 불가피한 방법이라고 할 수 있다.

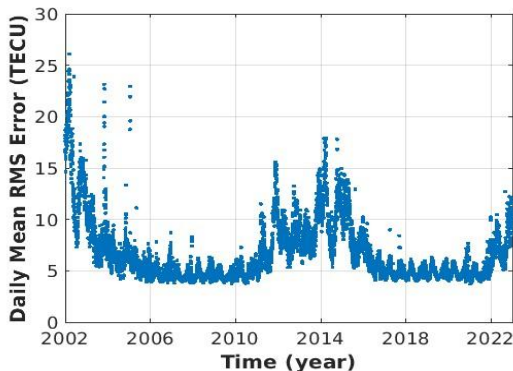


그림 8. 전리층 오차 RMS 변화 (2002-2022)  
 Fig. 8. Daily error RMS of the ionospheric delays by the Klobuchar model(2002-2022)

21년간 Klobuchar 모델의 1일 평균오차 RMS 값 변화를 나타낸 결과는 그림 8과 같다. 21년 오차 RMS 평균은 7.77 TECU인데, IGS 전리층 크기 대비 오차 보정율은 58.15%이다. 전리층 지연값 세기가 큰 2002-2003년과 2012-2016년에 전리층오차의 RMS도 급증함을 알 수 있다. 전리층 극소기인 2007-2009년과 2018-2020년에는 오차 RMS가 5 TECU 정도의 일정한 값을 유지함을 알 수 있다.

#### 4-2 Klobuchar 모델 오차의 공간 분포

Klobuchar 모델은 중위도지역에 최적화된 모델로 위도에 따라 많은 성능 차이가 발생한다. 이러한 지역적 성능차이를 파악하기 위하여 전지구 영역에 일정한 간격의 격자점을 설정한 뒤 해당 격자점에서 21년간 전리층 오차의 통계값을 도출 하였다. 격자점은 IGS GIM과 동일하게 위도 2.5°, 경도 5° 간격으로 설정하였다.

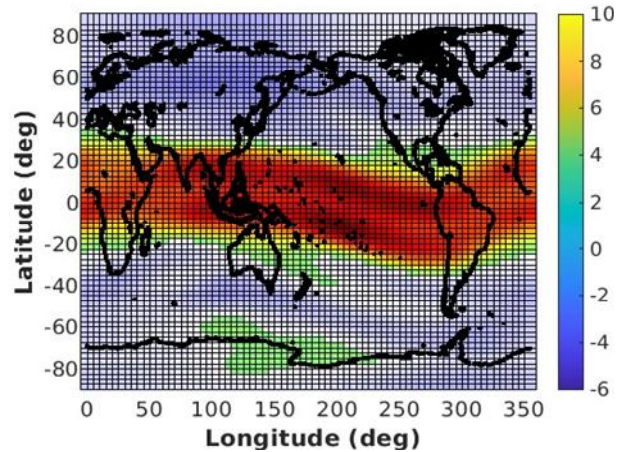


그림 9. 전리층 오차 평균값의 지리적 분포 (2002-2022)  
 Fig. 9. Geographical distribution of the Klobuchar model error mean (2002-2022)

그림 9는 전 세계 지역에 대한 Klobuchar 모델 전리층정보의 21년 평균 오차를 지역별로 나타낸 지도이다. 지자기적도에 해당하는 위도가  $\pm 20^\circ$  이내의 지역에서 전리층 오차가 빨간색 띠 형태로 크게 나타났지만, 이외의 중/고위도 지역에서는 오차 수준이 비슷하였다. 지자기적도 지역에서의 평균 오차는 10 TECU 이상의 양수로 이는 해당 지역에서 Klobuchar 전리층 지연값이 IGS 전리층 지연값보다 작은 것을 의미한다. 저위도 지역에서 전리층 지연 값의 변화가 큰 이유는 전리층 적도 변이 때문인데, 적도 변이는 플라즈마가 자기력선을 따라 내려오면서 지자기 위도  $\pm 20^\circ$  내에서 플라즈마 밀도가 최대가 되는 점을 생성하는 현상이다 [11]. 적도 변이는 지자기 적도에서 태양광을 따라 동에서 서로 이동하는데, 이들의 주변 지역에 전리층지연 값이 크게 나타난다. 그림 6이 나타내는 바와 같이 전리층 지연값의 세기가 클 경우 Klobuchar 전리층 지연값이 IGS 전리층

지연값보다 작는데, 지자기 적도 지역에서도 대체로 비슷한 경향을 나타내고 있다.

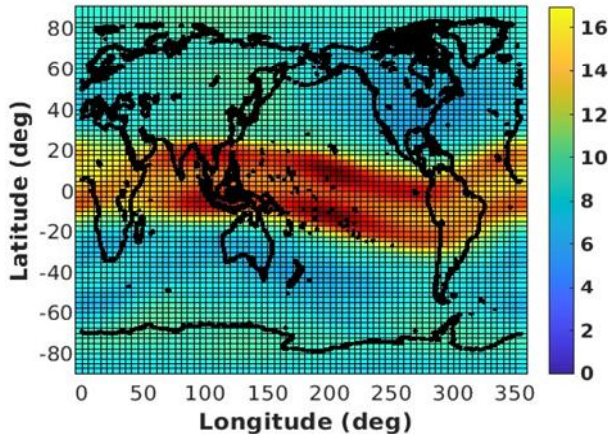


그림 10. 전리층 오차 RMS의 지리적 분포 (2022-2022)  
 Fig. 10. Geographical distribution of the Klobuchar model error RMS (2022-2022)

그림 10은 전 세계 Klobuchar 모델 전리층정보의 21년 평균 RMS 오차를 지역별로 나타낸 지도이다. 오차의 평균값을 표시한 그림 9에 비해 RMS 값이므로 오차의 크기를 비교하는데 용이하다. 지자기적도 지역에서는 18 TECU 정도의 높은 RMS 오차를 나타내지만, 다른 중/고위도 지역에서는 9 TECU 정도로 일정한 RMS 오차를 나타낸다. 특이한 점은 북미 지역에서의 RMS 오차가 다른 지역보다 약간 낮게 나타나는데, Klobuchar 모델 계수 결정 시 북미 지역에 최적화하도록 설정하였다면 가능한 결과이다. 전리층 지연값을 측정하는 장비가 많이 분포되어 있는 북미 지역을 기준으로 Klobuchar 모델 계수를 최적화하는 것은 충분히 가능한 일이다.

4-3 Klobuchar 모델 오차 특성 분석

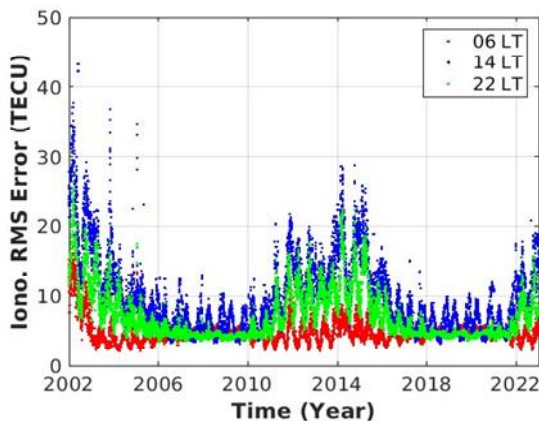


그림 11. 지방시별 전리층 오차 (2002-2022)  
 Fig. 11. RMS error of the Klobuchar model for selected local times (2002 to 2022)

그림 11은 한반도 대전 상공에서 Klobuchar 모델의 전리층 오차의 RMS 값을 나타낸 것으로, 각 시간대별 오차를 나타내었다. 시간대는 태양활동과 직접적인 상관관계가 존재하는 지방시(LT; Local Time)로 설정하였다.

표 1. 지방시에 따른 전리층 지연값 오차 통계값  
 Table 1. Statistics of ionospheric delay error for selected local times

Local time (hr)	6	14	22
Mean (TECU)	4.83	9.76	7.12
STD (TECU)	1.64	5.31	3.64

표 1은 각 시간대 별 오차 평균과 표준편차를 비교한 것이다. 새벽 시간에 비해 낮시간의 전리층 지연값 오차가 2배 정도이며, 표준편차는 3배 이상임을 알 수 있다. 오전 6시의 전체 전리층 지연 오차의 평균값은 4.83 TECU으로 가장 낮았으며 14시에 9.76 TECU로 가장 컸다. 특히 태양활동이 활발한 기간에 두 시간대의 오차 차이는 증가하였다.

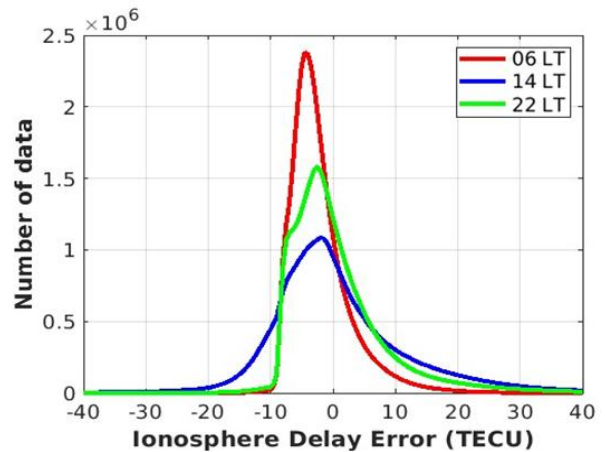


그림 12. 지방시별 전리층 오차 분포 (2002-2022)  
 Fig. 12. Histogram of the Klobuchar model error for selected local times (2002-2022)

그림 12는 각 시간대별 Klobuchar 모델의 오차크기에 대한 데이터 개수를 나타낸 것인데, 동일 시간대 데이터를 지방시로 나타낸 것이다. 데이터의 개수는 오차의 크기를 0.5 TECU 간격으로 설정한 후 해당 오차 범위에 포함된 데이터의 수를 나타내었다. 전리층 오차가 큰 데이터는 오후 2시일 때 다른 시간대보다 많이 포함되어 있으며, 오전 6시일 때 오차의 크기가 작은 데이터가 많았다. 이는 오후 2시 부근에서 1일 전리층 지연의 값과 변화가 크기 때문이며, 오후 8시 이후에 값과 변화가 작기 때문이다.

태양활동, 지자기활동과 Klobuchar 모델의 상관관계를 분석

하였는데, 이는 전리층 지연값을 예측하는데 중요한 정보이다. 태양활동에 관한 지표는 F10.7과 태양흑점의 개수로 설정하였는데, F10.7은 태양 전파 방출선의 10.7 cm 파장에서 단위 진동수당 태양 전파 플럭스를 나타내며 태양흑점의 개수는 1일 태양의 흑점 개수이다. 지자기활동에 관한 지표는 Ap와 Dst인데, Ap 지수는 지자기활동 지수인 Kp의 하루 평균값이며 Dst는 지자기 폭풍의 정도를 평가하는데 사용되는 값으로 적도 부근 관측소에서 획득한 수평 자기장 값을 평균한 값인데, Dst가 -100 이하일 때 전리층이 발생할 가능성이 있다고 판별한다.

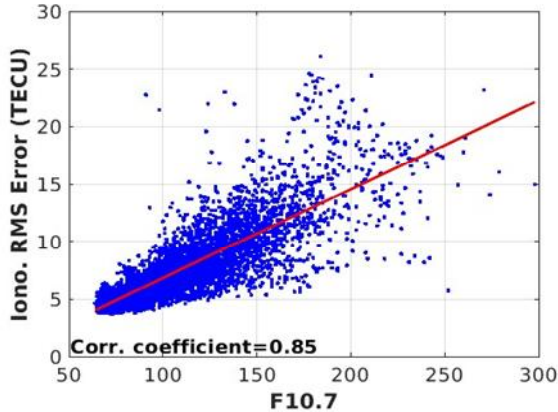


그림 13. 전리층 오차 RMS와 F10.7의 상관관계 (2002-2022)  
 Fig. 13. Daily mean magnitude of the Klobuchar and IGS models along geomagnetic latitude (2002-2022)

그림 13은 F10.7에 따른 Klobuchar 모델 오차의 상관관계를 계산한 것으로 그래프에서 빨간색 직선은 추세선을 나타낸 것이다. Klobuchar 모델 오차와 F10.7의 상관계수는 0.85으로 상관관계가 상당히 큰 것을 알 수 있다. 전리층 지연값의 세기 역시 F10.7과 높은 상관관계를 가지는데, 전리층 지연값의 크기가 클 때 Klobuchar 모델 오차도 커지므로, F10.7과도 높은 상관관계를 가지는 것을 알 수 있다. 다른 우주환경지수 중, F10.7과 유사하게 전리층 오차와 높은 상관관계를 가지는 것은 SSN (Sun Spot Number)가 있다. 지자기 관련 계수인 Ap, Dst 등은 F10.7에 비해 상대적으로 전리층 오차와의 상관관계가 높지는 않았다.

## V. 결 론

단주파수 GPS 수신기의 위치해 정확도에 큰 영향을 끼치는 GPS 항법메시지의 Klobuchar 전리층모델 정확도를 분석 하였다. 1993년부터 2022년까지의 GPS 항법메시지의 전리층 데이터를 조사하여 Klobuchar 모델 계수 존재 여부와 효용성 여부를 분석 하였다. 초기 GPS 항법메시지의 경우 전리층데이터를 포함하지 않는 경우가 많으며, 전리층모델을 포함되어 있더라도 정확도가 상당히 낮은 경우가 많이 존재하였다. 전리층모델

정확도가 안정화된 2002년부터 2022년까지 전리층모델의 정확도를 IGS에서 제공하는 정밀모델과 비교하였으며, 시간/지역별 오차분포 및 태양활동과의 상관관계를 분석 하였다.

Klobuchar 전리층모델의 21년 오차 평균은 -2.27 TECU로 Klobuchar 지연값이 IGS 지연값보다 약간 큰 값을 나타낸다. 21년 오차 RMS 평균은 7.77 TECU로 IGS 전리층 크기 대비 오차 보정율은 58.15%로 GPS 목표치인 50% RMS 성능을 만족하고 있음을 알 수 있다. Klobuchar 모델오차는 하루 중 가장 크게 나타나는 오후 2시의 오차 RMS 평균은 9.76 TECU이며, 태양활동이 활발한 시기에 두 시간대의 오차 차이는 증가하였다. 중위도 지역에서 전리층 보정정보 성능에 최적화된 Klobuchar 특성 상 지자기적도 지역에서는 매우 큰 오차를 나타낸다. Klobuchar 모델의 오차는 F10.7가 크고 및 태양흑점 개수가 많은 시기에 증가하며, F10.7과 높은 상관관계를 나타낸다.

## References

- [1] B. Hoffmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and E. Walse, GNSS-Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more, *Springer*, 1st ed. Berlin, 2008.
- [2] J. A. Klobuchar, "Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users," *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems*, Vol. AES-23, No. 3, pp. 325-331, May. 1987.
- [3] W. A. Feess, and S. G. Stephens, "Evaluation of GPS ionospheric time-delay model," *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems*, Vol. AES-23, No. 3, pp. 332-338, May. 1987.
- [4] M. Hernández-Pajares, J. M. Juan, J. Sanz, R. Orus, A. Garcia-Rigo, J. Feltens, A. Komjathy, S. C. Schaer, and A. Krankowski, "The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998," *Journal of Geodesy*, Vol. 83, pp. 263-275, Mar. 2009.
- [5] Q. Liu, M. Hernández-Pajares, H. Yang, E. Monte-Moreno, D. Roma-Dollase, A. García-Rigo, Z. Li, N. Wang, D. Laurichesse, A. Blot, Q. Zhao, Q. Zhang, A. Hauschild, L. Agrotis, M. Schmitz, G. Wübbena, A. Stürze, A. Krankowski, S. Schaer, J. Feltens, A. Komjathy, and R. Ghoddousi-Fard, "The cooperative IGS RT-GIMs: a reliable estimation of the global ionospheric electron content distribution in real time," *The Journal of Earth System Science Data*, Vol. 13, No. 9, pp. 4567-4582, Sep. 2021.
- [6] K. Stepniak, P. Wielgosz, and J. Paziewski, "Accuracy analysis of the Klobuchar ionosphere model transmitted by the GPS system," in *The proceedings of the 9th International Conference "Environmental Engineering"*, Vilnius: LT, pp. 1-6, 2014.

- [7] K. C. T. Swamy, A. D. Sarma, V. S. Srinivas, P. N. Kumar, and P. V. D. S. Rao, "Accuracy evaluation of estimated ionospheric delay of GPS signals based on Klobuchar and IRI-2007 models in low latitude region," *IEEE Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 10, No. 6, pp. 1557-1561, Nov. 2013.
- [8] A. M. A. Farah, "Comparison of GPS/Galileo single frequency ionospheric models with vertical TEC maps," *Journal of Artificial Satellites*, Vol. 43, No. 2, pp. 75-90, May. 2009.
- [9] M. G. Kim, J. R. Kim, "A long-term accuracy analysis of the GPS Klobuchar ionosphere model," *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, Vol. 24, No. 2, pp. 11-18, Jun. 2016.
- [10] S. H. Kwon, Y. R. Kim, and J. R. Kim, "Analysis of availability and accuracy variation of GPS Klobuchar ionospheric delay model," in *Proceeding of the 2023 Institute of Positioning, Navigation, and Timing Conference*, Jeju: KR, pp. 651-652, 2023.
- [11] M. S. Jeong, and J. R. Kim, "Analysis of MSAS ionosphere correction messages and the effect of equatorial anomaly," *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, Vol. 16, No. 2, pp. 12-20, Jun. 2008.



**김 정 래 (Jeongrae Kim)**

1991년 2월: 서울대학교 항공우주공학과 (공학사),  
2000년: 미국 University of Texas at Austin (공학박사),  
2002년 ~ 2004년: 한국항공우주원 선임연구원  
2004년 ~ 현재: 한국항공대학교 항공우주공학과 교수  
※관심분야: GNSS, 위성항법, 위성궤도결정

1993년 2월: 서울대학교 항공우주공학과 (공학석사)  
2000년 ~ 2002년: 미국 Center for Space Research 연구원



**김 용 래 (Yongrae Kim)**

2023년 8월: 한국항공대학교 항공우주공학과 (공학사)  
2023년 9월 ~ 현재: 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 대학원 석사과정  
※관심분야: 위성항법, 위성궤도