

NTCM-BC 전리층 모델을 이용한 한반도 내 위치추정 정확도 분석

A Positioning Accuracy Analysis in Korea by using NTCM-BC Ionosphere Model

김민규 · 명재욱 · 김정래*

한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

Mingyu Kim · Jaewook Myung · Jeongrae Kim*

School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Gyeonggi-do, 10540, Korea

[요 약]

독일 DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt)에서 개발한 NTCM (Neustrelitz TEC model) 전리층 모델은 전리층 지연 값을 예측함에 있어서 Klobuchar 모델보다 높은 정확도를 가진다. NTCM 모델은 Galileo의 NeQuick 모델보다 계산 시간이 빠르며, 정확도가 비슷하다. NTCM 모델은 태양 활동 함수의 파라미터로 F10.7을 사용하지만, NTCM-BC (NTCM-Broadcast) 모델은 Klobuchar 모델의 전리층 지연 값을 사용한다. 이러한 이유로 NTCM-BC 모델은 실시간 전리층 지연 보정 모델로 사용할 수 있다. 본 논문에서는 2009년부터 2014년까지 한반도 내에서 NTCM-BC 모델을 적용하였을 때 수직 전리층 지연 오차 및 사용자 위치 오차를 분석하고 Klobuchar 모델의 결과와 비교하였다. 6년간의 통계에서 Klobuchar 모델 사용 대비 NTCM-BC 모델 적용 시 수직 전리층 지연 오차는 17.7% 감소하였으며, 수평 위치 정확도는 25.6%, 수직 위치 정확도는 6.7% 더 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다.

[Abstract]

A Neustrelitz TEC model (NTCM) developed by Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) provides a better accuracy than the global positioning system (GPS) Klobuchar model for predicting ionospheric delay. The NTCM model accuracy is comparable to Galileo NeQuick model, and it has less computation time. The NTCM model uses F10.7 values as a parameter of solar activity function, while a NTCM-Broadcast (NTCM-BC) uses TEC values from a Klobuchar model. For this reason, a NTCM-BC model can be used for real-time ionosphere correction. In this paper, vertical ionospheric delay and GPS positioning errors in Korea by using a NTCM-BC ionosphere model from 2009 to 2014 are analyzed and compared with those of a Klobuchar model. In the 6-year statistics, the vertical ionospheric delay is reduced by 17.7%, and horizontal and vertical positioning accuracies by the NTCM-BC model are improved by 25.6% and 6.7%, respectively, over the Klobuchar model.

Key word : Global navigation satellite system, Ionosphere correction, Klobuchar model, Neustrelitz total electron content model, Neustrelitz total electron content - broadcast model.

<https://doi.org/10.12673/jant.2017.21.5.479>



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 27 September 2017; Revised 1 October 2017
Accepted (Publication) 17 October 2017 (30 October 2017)

*Corresponding Author; Jeongrae Kim

Tel: +82-2-300-0110

E-mail: jrkim@kau.ac.kr

I. 서론

단주파 GNSS (global navigation satellite system) 수신기를 이용한 위치 추정에서 가장 큰 오차 요인은 전리층에 의한 신호 지연이다. 전리층 신호 지연은 50~1000 km에 분포하는 전리층에 신호가 통과하면서 300 ns 이상의 지연이 발생한다고 알려져 있다[1]. 단주파 수신기에 대한 전리층 보정 모델로는 GPS (global positioning system) 항법메시지에 포함된 Klobuchar 전리층 모델, 위성보강항법 시스템 (SBAS; satellite-based augmentation system) 전리층 지연 보정, IGS (international GNSS service)에서 제공되는 전 지구적 전리층 지도 등이 있다.

GPS 전리층 지연 보정 모델은 1987년 Klobuchar가 제안한 모델로, 항법메시지에서 제공되는 8가지 파라미터 및 사용자의 위치, 시간을 입력으로 전리층 보정 값을 계산할 수 있다[2, 3]. 후처리된 데이터를 입력으로 사용하지 않기 때문에 실시간 전리층 보정 모델로 사용할 수 있다.

NTCM (Neustrelitz TEC model) 모델은 독일 DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt)에서 개발된 전 지구적 전리층 보정 모델이다[4]. NTCM 모델은 전리층을 얇은 막으로 가정하고, 수직 전리층 지연 값을 계산하는 모델이다. 모델에 사용자 위치 및 시간뿐만 아니라 태양활동에 관한 파라미터도 포함되어 Klobuchar 모델보다 정확도가 높으며, NeQuick 모델보다 계산 속도가 빠르다는 장점이 있지만 태양 활동을 나타내는 지표를 사용하기 때문에 실시간 전리층 보정으로 활용할 수 없다.

NTCM-BC (NTCM-Broadcast) 모델은 NTCM 모델과 유사한데, 태양활동 관련 함수의 파라미터를 Klobuchar 전리층 지연 값으로 사용하는 모델이다[4]. NTCM으로부터 도출된 모델이기 때문에 전 세계에서 수직 전리층 지연 값을 계산할 수 있다. 태양활동 관련 파라미터를 더 이상 사용하지 않기 때문에 NTCM-BC 모델도 Klobuchar 모델과 마찬가지로 실시간 전리층 지연 보정 모델로 사용할 수 있다.

Klobuchar 모델과 NTCM 모델의 수직 전리층 지연 값 정확도 비교는 이전부터 연구가 수행되었다. Hoque와 Jakowski는 전 지구에서 통계적으로 NTCM-BC 모델 사용 시 Klobuchar 모델 사용 대비 전리층 지연 값의 정확도를 분석하였다[4]. 또한, 같은 저자는 2011년 한해 전 세계에 분포된 200여개의 IGS 관측소에서 데이터를 사용하여 Klobuchar, NeQuick, 그리고 NTCM 모델의 수직 전리층 지연 정확도를 비교하였다[5]. 이들의 연구는 공통적으로 전 세계 지역에 대해 각 모델별 전리층 지연 정확도의 통계를 계산하였다. 전리층 지연은 낮은 지자기 위도에서 높은 지자기위도로 갈수록 작기 때문에 지역에 따른 전리층 변화의 차이가 존재한다. 따라서 국내에서 NTCM-BC 모델을 적용하여 전리층 지연 오차 및 사용자 위치 추정 정확도를 분석할 필요가 있다. 본 논문에서는 국내에서 2009년부터 2014년까지 6년간 NTCM-BC 모델을 적용하여 사용자의 위치 추정 정확도를 분석하였다. 실시간 전리층 모델로 사용되는 Klobuchar 모델도 적용하여 정확도를 비교하였다.

II. NTCM 모델

NTCM 모델은 지방시, 지자기 위도, 태양 활동이 반영되어 있으며, 전리층의 일간 변화뿐만 아니라 계절 변화 등이 반영된 5가지 함수로 전리층 변화를 모델링한다[5]. GPS 방송케도에 포함된 Klobuchar 파라미터와는 달리 NTCM 모델은 총 12개인 것이 특징이다. 함수의 파라미터를 계산하기 위해 CODE (center for orbit determination system)에서 제공되는 전 세계 전리층 지도 (GIM; global ionosphere map)를 관측 값으로 설정하고, 계수를 제외한 각 모델의 함수를 계산한 후 비선형 최소자승법을 사용하여 계산한다[1]. 계산된 함수의 계수들은 시간에 따라 변화하지 않고 고정된 값을 계속 사용한다. NTCM 모델은 국지적 함수 모델과 전 지구적 함수 모델이 있으며, 국지적 함수 모델로는 유럽 지역에서 사용되는 NTCM-EU 모델, 북극 지역의 NTCM-NP, 남극 지역의 NTCM-SP 등이 있다. 전 세계에 적용 가능한 모델인 NTCM은 5가지 함수의 조합으로 구성되어 있으며 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$TEC_{NTCM} = F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 \cdot F_4 \cdot F_5 \tag{1}$$

위 식에서 F_1 은 전리층의 일간, 1/2일, 그리고 1/3일 변화가 반영된 함수이며, F_2 는 전리층의 계절 변화가 반영된 함수, F_3 는 지자기 위도에 대한 함수, F_4 는 지자기 적도 부근에 존재하는 북쪽과 남쪽의 이온화 마루와 사용자 간 거리에 대한 함수, F_5 는 태양 활동이 반영된 함수이다. 식 (1)에서 F_1 은 각각의 일간 변화를 삼각 함수로 모델링된 함수이며, 다음과 같다.

$$F_1 = \cos\chi^{***} + V\cos\chi^{**} \tag{2}$$

$$V = k_1\cos(V_D) + k_2\cos(V_{SD}) + k_3\sin(V_{SD}) + k_4\cos(V_{TD}) + k_5\sin(V_{TD}) \tag{3}$$

위 식에서 $\cos\chi$ 는 태양 천정각과 관련된 함수로, 천정각이 증가할수록 전리층 지연 값이 증가한다. k_i 는 비선형 최소자승법으로 계산된 12개의 NTCM 모델의 계수이다. 각 계수들은 F_1 함수에 5개, F_2, F_4, F_5 에 2개, F_3 함수에 1개씩 포함되어 있다. V 는 일간 변화를 나타내는 함수인데, V_D, V_{SD}, V_{TD} 는 각각 1일, 1/2일, 1/3일을 주기로 하는 위상각으로, 이들을 계산하는 자세한 알고리즘은 [1]에 제시되어 있다.

함수 F_2, F_3 , 및 F_4 는 다음 식을 통해 계산할 수 있다.

$$F_2 = 1 + k_6\cos(V_A) + k_7\cos(V_{SA}) \tag{4}$$

$$F_3 = 1 + k_8\cos\phi_m \tag{5}$$

$$F_4 = 1 + k_9\exp(EC_1) + k_{10}\exp(EC_2) \tag{6}$$

위 식에서 V_A 는 1년을 주기로 하는 위상각, V_{SA} 는 반년을 주기로 하는 위상각이다. ϕ_m 은 IPP (ionosphere pierce point)의 지자기 위도로, dipole 모델에서 사용되는 북극의 위도, 경도로부터

계산할 수 있다[1]. EC_1 과 EC_2 는 각각 북쪽과 남쪽의 이온화 마루와 IPP 지자기위도 거리에 관한 무차원 변수이다. IPP 지자기위도가 이온화 마루의 통계적 위치와 가까워질수록 함수 값이 지수적으로 증가하게 된다.

F_5 는 태양활동을 반영하는 함수이며, 다음과 같이 계산한다.

$$F_5 = k_{11} + k_{12}F_{10.7} \quad (7)$$

위 식에서 $F_{10.7}$ 은 태양 활동 지표를 나타내는 $F_{10.7}$ 이다. $F_{10.7}$ 은 10.7 cm 파장에서의 태양 전파를 나타내는 것으로, 전 세계에 분포된 관측소로부터 도출된 $F_{10.7}$ 데이터를 취합하는 시간이 필요하기 때문에 실시간으로 획득할 수 없는 지표이다. 이러한 이유로 NTCM 모델은 실시간 전리층 지연 보정 모델로 사용할 수 없으며, 후처리 용도로만 사용 가능하다. 위의 5가지 함수를 이용하여 계산된 수직 전리층 지연 값은 고도각으로 모델링된 경사 지표를 적용하여 경사 전리층 지연 값으로 변환할 수 있다.

III. NTCM-BC 모델

NTCM-BC 모델은 NTCM 모델에서 파생된 모델로, 일간 변화 및 계절 변화, 이온화 마루의 거리에 따른 변화는 NTCM 모델과 동일하게 모델링되었으며, 모델의 계수도 마찬가지로 12 개를 사용한다. 두 모델의 차이점으로 NTCM 모델에서는 태양 활동 관련 함수의 파라미터로 $F_{10.7}$ 값을 사용하지만, NTCM-BC 모델은 Klobuchar 모델로부터 계산된 2개 지점의 수직 전리층 지연 값을 사용한다[4]. 이는 Klobuchar 모델로부터 도출된 전리층 지연 값 또한 태양활동이 반영되어 있으며, 계절 변화가 $F_{10.7}$ 값보다 뚜렷하여 Klobuchar 모델의 수직 전리층 지연 값을 사용하는 것이 모델의 정확도를 높일 수 있기 때문이다. Klobuchar 모델에서 위도 $\pm 10^\circ$, 경도 -90° 에서의 전리층 지연 값을 태양활동에 관한 함수의 파라미터로 사용하는 것이 NTCM-BC 모델로, NTCM 모델의 F_5 함수를 다음과 같이 변형하여 계산한다.

$$F_5 = k_{11} + k_{12}K \quad (8)$$

$$K = TEC_A + TEC_B \quad (9)$$

위 식에서 TEC_A 는 위도 10° , 경도 -90° 에서 지방시로 14시일 때 계산된 수직 전리층 지연이며, TEC_B 는 위도 -10° , 경도 -90° 에서 같은 시간에 계산된 수직 전리층 지연이다. Klobuchar 모델은 사용자 위치, 시간, 위성위치, 그리고 방송궤도력에서 획득 가능한 모델 계수만을 사용하기 때문에 NTCM-BC 모델의 입력에 후처리 데이터가 포함되어 있지 않다. 따라서 NTCM-BC 모델은 실시간 전리층 보정 모델로 사용할 수 있다.

IV. 사용자 위치오차 분석

2009년부터 2014년까지 6년간 국토지리정보원의 수원 관측소에서 수신된 C/A 코드를 이용하여 NTCM-BC 모델을 적용한 사용자 위치 추정을 수행하였다. 해당 기간은 태양 활동의 반주기를 분석하기 위함으로, 태양 활동이 활발하지 않은 2009년부터 활동이 최대인 2014년을 포함하는 6년으로 분석 기간을 설정하였다. 수원 관측소에서 사용하는 수신기는 TRIMBLE NETR9이다. IGS GIM을 비교군으로 설정하였으며, Klobuchar 모델도 같이 사용하여 NTCM-BC 모델과 전리층 지연 오차 및 사용자 위치 오차를 비교하였다. 대류층 모델은 날짜와 고도각, 그리고 사용자의 위치의 함수로 모델링된 RTCA (radio technical commission for aeronautics) MOPS (minimum operational performance standards)의 대류층 지연 모델을 사용하였다[6]. 가중치는 고도각에 따른 지수 함수를 사용하였으며, 위치해는 최소자승법을 사용하여 계산하였다[7]. NTCM-BC 모델의 12개 파라미터는 [4]의 논문에서 제시된 값을 적용하였다. 1일 각 전리층 모델의 신호 변화 및 모델 적용 시 위치 오차 변화를 분석하였으며, 6년간 낮과 밤에 따른 위치 오차 및 지방시에 따른 위치 오차도 분석하였다.

4-1 1일 전리층 지연 및 사용자 위치오차 분석

2014년 3월 28일 하루 수원 관측소에서 IGS GIM, Klobuchar, 그리고 NTCM-BC 모델의 수직 전리층 지연값을 계산하였으며, 각 모델을 전리층 보정 모델로 사용하여 수평 및 수직 위치 오차를 계산하였다. 그림 1은 3가지 모델의 1일 수직 전리층 지연의 변화를 계산한 결과다. Klobuchar 모델의 전리층 지연은 밤에서는 9.24 TECU로 일정하며, 6시부터 증가하여 14시에서 최대가 된다. NTCM-BC 모델로부터 계산된 수직 전리층 지연 값은 Klobuchar 모델보다 항상 높게 추정되었으며, IGS GIM 데이터의 값과 비슷한 것을 볼 수 있다. IGS GIM과 유사한 경향을 가지며, 일간 변화를 모두 반영하였기 때문에 NTCM-BC 모델은 Klobuchar 모델과는 달리 밤에서 일정한 값을 가지지 않는 것을 볼 수 있다.

그림 2는 각 모델을 전리층 지연 보정 모델로 적용하였을 때 수평 위치 오차를 나타낸 것이다. Klobuchar 모델을 적용한 경우 낮 12시부터 수평 오차가 증가하기 시작하여 22시에 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 Klobuchar 모델이 낮에 한반도에서 실제 값보다 작게 추정되었기 때문에 낮 시간대에서 오차가 크게 증가하였다[3]. 이러한 이유로 수평 위치오차의 표준편차는 Klobuchar 모델이 1.942 m, NTCM-BC 모델이 0.916 m로 2.1배 차이가 나타났다. IGS GIM 사용 시 표준편차는 0.600 m로, NTCM-BC 모델과 0.316 m의 차이가 나타났다. NTCM-BC 모델은 IGS GIM과 같이 낮과 밤에서 수평 오차의 편차가 작음을 확인할 수 있다.

Klobuchar 모델의 수직 위치 오차는 수평 위치 오차와 같이

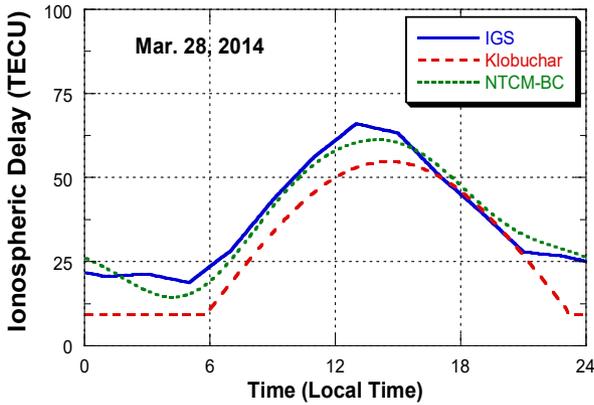


그림 1. 1일간 수원 관측소에서 수직 전리층 지연 변화 (2014. 03. 28)
 Fig. 1. The vertical ionospheric delay variations over Suwon station (March 28, 2014).

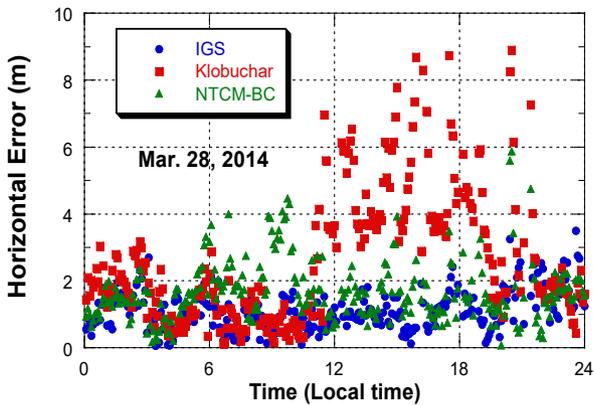


그림 2. 1일간 전리층 모델별 수평 위치 오차 변화 (2014. 03. 28)
 Fig. 2. The horizontal position error time series for different ionosphere models (March 28, 2014).

12시 이후부터 편차가 증가하며 22시부터 감소한다. NTCM-BC와 Klobuchar 모델 간 수직 위치 오차의 표준편차 차이는 각각 2.483 m, 2.339 m로 0.144 m의 차이가 나타난다. 이는 밤 시간대에서 전리층 지연의 변화가 작으며, Klobuchar 모델의 수직 전리층 지연 값은 실제 값보다 작게, NTCM-BC 모델은 실제 값보다 크게 추정되었기 때문이다. 이는 수직 위치 오차의 평균이 각각 1.839 m, -0.802 m로 나타난 것을 통해 확인할 수 있다. 위의 결과들은 Klobuchar 모델 대신 NTCM-BC 모델 적용 시 수평 위치 오차를 크게 감소시킬 수 있으며, 수직 위치 오차도 소폭 감소시킬 수 있음을 의미한다.

4-2 6년간 사용자 위치오차 분석

6년간 수원 관측소 상공의 전리층 지연 값을 계산하고, 위치 추정을 수행하였다. 그림 3은 IGS GIM을 참값으로 하여 각 모

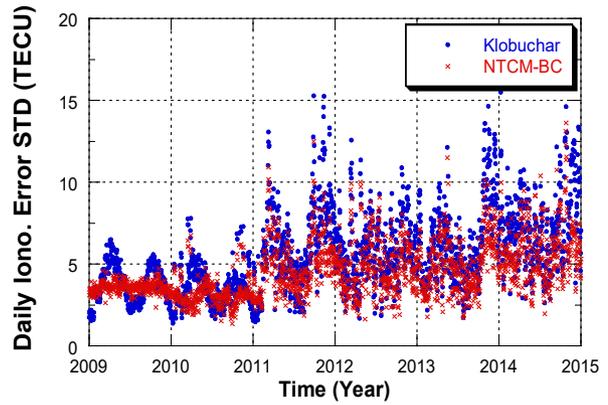


그림 3. 모델별 수직 전리층 지연 오차의 일일 표준편차
 Fig. 3. Daily standard deviation of the ionosphere vertical errors.

델의 수직 전리층 지연 오차를 계산하고 6년 동안의 일간 변화를 나타낸 것이다. 태양 활동은 2007년부터 활발해지기 시작하였는데, 2011년부터 2014년까지 태양 활동이 급격히 증가하여 2014년에서 최대가 되었다. 2011년부터 태양 활동이 크게 활발해짐에 따라 두 모델의 수직 전리층 지연 오차 크기는 증가하였는데, 일간 수직 전리층 지연 오차의 평균은 Klobuchar 모델이 5.49 TECU, NTCM-BC 모델이 4.52 TECU로 Klobuchar 모델의 82.3 % 수준으로 나타났다. 특히 태양 활동이 활발한 2014년에서 비교하면, NTCM-BC 모델 적용 시 Klobuchar 모델보다 오차가 19.3 % 감소하였다. Klobuchar 모델은 계절에 따라 오차의 변화가 나타나는 반면, NTCM-BC 모델에서는 계절 변화가 크게 나타나지 않는데, 이를 통해 NTCM-BC 모델이 Klobuchar 모델보다 계절 변화에 대해 더 정교하게 모델링된 것으로 볼 수 있다.

그림 4는 연간 각 모델별 수평 및 수직 오차의 표준편차를 계산한 결과이다. 태양활동이 활발해짐에 따라 Klobuchar 및 NTCM 모델의 수평 및 수직오차도 증가하는 것을 볼 수 있다. Klobuchar 모델에 비해 NTCM-BC 모델의 연간 위치 오차 증가율이 더 작게 나타났는데, 2009년 한 해 수평 및 수직 위치 오차의 표준편차 차이는 각각 3.4 %, 2.0 %인 것에 반해 2014년에는 차이가 30.5 %, 8.9 %로 증가하였다. 이는 그림 3에서 태양 활동이 증가하면서 두 모델의 전리층 오차의 편차가 증가하였기 때문이다. 특히 두 모델의 수평 위치 오차 차이가 태양활동이 활발해질 때 크게 증가하였다.

각 모델별 수평 및 수직 위치오차는 지방시에 따라 변화하는데, 이를 계산한 결과는 그림 5와 같다. IGS GIM 모델은 밤과 낮에 따른 위치 오차의 차이가 없음을 볼 수 있다. NTCM-BC 모델은 7시부터 위치 오차가 증가하며, 수직 오차는 19시, 수평 오차는 10시에서 최대가 된다. Klobuchar 모델은 전리층 지연 오차가 가장 큰 15시에서 최대가 되는데, NTCM 모델과 비교하였을 때 수평오차는 0.609 m, 수직오차는 0.383 m의 차이를 보였다. 즉, 낮 시간일 때는 NTCM 모델과 Klobuchar 모델의 차이

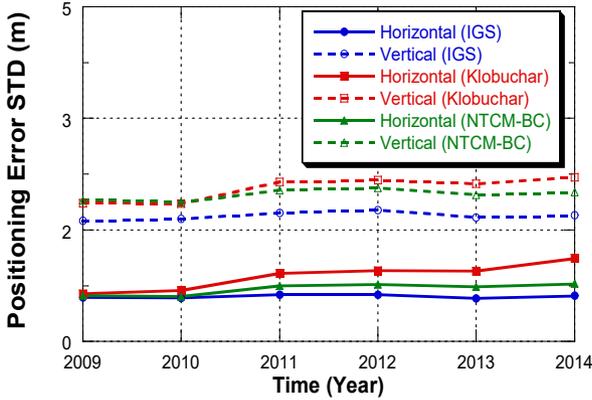


그림 4. 각 모델별 수평 및 수직 위치 오차의 연간 표준편차 변화
 Fig. 4. Yearly standard deviation of the horizontal and vertical position errors.

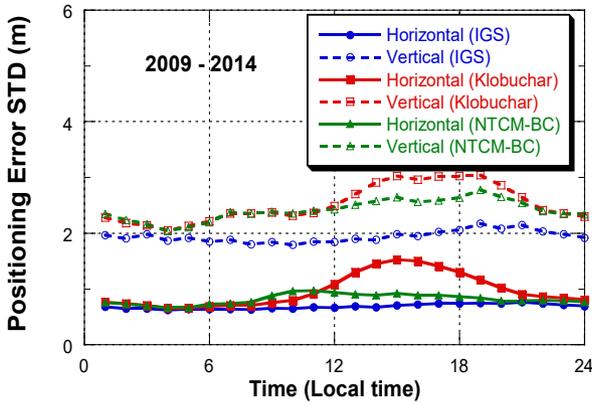


그림 5. 지방시에 따른 각 모델별 수평 및 수직 위치 오차 변화
 Fig. 5. Hourly standard deviations of horizontal and vertical position errors.

가 크며, 밤 시간일 때 차이가 작게 나타난다. 두 시간대에서 차이를 비교하기 위해 낮 시간은 12:00~20:00 LT (local time), 밤 시간은 22:00~06:00 LT로 설정하여 해당 시간에서의 수평 및 수직 위치 오차의 표준편차를 계산하였다. 그 결과 낮에서 NTCM-BC 모델의 수평 위치 오차는 Klobuchar의 64.8%, 수직 오차는 95.1% 수준으로 나타났다. 밤에서는 오히려 수직 오차가 16.7% 증가하였지만, 전체 시간대에서 8.9%가 감소하였기 때문에 NTCM-BC를 적용할 시 수직 위치 오차도 감소한다고 볼 수 있다. 이러한 결과들을 통해 낮 시간대에서 NTCM-BC 모델이 Klobuchar 모델보다 정확도가 높은 것을 알 수 있다.

표 1은 6년간 각 모델을 전리층 보정 모델로 적용 시 수평 및 수직 위치 오차의 통계를 계산한 결과이다. NTCM-BC 모델은 Klobuchar와 비교하였을 때 표준편차는 0.259 m 더 작았지만 평균은 오히려 증가하였다. 이는 본 연구에서 사용된 NTCM-BC 모델이 전 세계 지점에 대한 CODE의 IGS 수직 전리층 지연 값으로부터 계산된 모델을 사용하였기 때문인데, 저

표 1. 6년간 각 모델별 수평 및 수직오차의 통계 (단위: m)
 Table 1. Statistics of horizontal and vertical positioning errors from 2009 to 2014 (Unit: m).

	IGS GIM		Klobuchar		NTCM-BC	
	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical
Mean	-1.908	-1.991	1.784	-1.385	1.447	-2.636
STD	0.709	1.988	1.370	2.896	0.917	2.637

위도와 고위도에서 전리층 지연 값의 오차가 작으며, 중위도 지역에서는 Klobuchar 모델과 정확도가 비슷하기 때문이다. NTCM-BC 모델의 범위를 한반도 내로 국한하여 모델의 파라미터를 계산한다면 통계적으로 수직 위치 오차가 더 감소할 수 있을 것으로 판단된다. NTCM-BC의 수평 오차는 평균 및 표준편차가 모두 작게 나타났다. 6년간 표준편차의 통계 결과를 통해 Klobuchar 모델 사용 대비 NTCM-BC 모델 적용 시 수평 위치 정확도는 25.6%, 수직 위치 정확도는 6.7% 더 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다.

V. 결 론

NTCM 전리층 모델은 정교한 모델링 기법을 사용하여 Klobuchar 모델보다 정확도가 높지만 후처리 데이터인 F10.7 태양 활동 지표를 사용하기 때문에 실시간 전리층 보정으로는 활용할 수 없다. NTCM-BC 모델은 F10.7 대신 GPS에서 실시간으로 방송되는 Klobuchar 모델 변수를 사용하기 때문에 GPS 수신기의 알고리즘 변경을 통해 실시간 전리층 지연 보정 모델로 사용할 수 있다.

2009년부터 2014년까지 6년간 NTCM-BC 전리층 모델을 적용하여 수일 관측소의 위치 추정을 수행하였다. Klobuchar 모델도 적용하여 두 모델의 수직 전리층 지연 오차 및 위치 오차를 비교하였다.

6년간 각 모델별 수직 전리층 지연 오차를 비교한 결과 NTCM-BC 모델 오차의 표준편차는 Klobuchar 모델보다 17.7% 더 작게 나타났다. 위치 오차를 분석한 결과 태양 활동이 작은 2009년에서 두 모델의 수평/수직 위치 오차의 표준편차는 비슷하였지만, 태양 활동이 가장 활발했던 시기인 2014년에는 Klobuchar 모델 대비 NTCM-BC 모델 사용 시 표준편차 값이 각각 30.5%, 8.9% 감소하였다. 두 모델의 차이는 또한 낮 시간에서 큰 차이를 보였는데, 낮에서 NTCM-BC 모델 적용 시 수평 위치 오차의 표준편차는 Klobuchar 모델보다 35.2%, 수직 오차의 표준편차는 4.9% 더 작았다. Klobuchar 모델은 낮 시간에서 실제 전리층 지연보다 작게 추정되어 낮과 밤에서 위치 오차의 편차가 크지만, NTCM-BC 모델은 낮과 밤의 수평 및 수직 위치 오차의 편차가 모두 20% 이내로 나타났다. 앞의 결과들로부터 NTCM-BC 모델은 태양 활동이 활발해질수록 Klobuchar 모델

에 비해 정확도가 뛰어났으며, 낮 시간대에서 정확도가 높았다. 6년간의 통계에서 Klobuchar 모델 사용 대비 NTCM-BC 모델 적용 시 수평 위치 정확도는 25.6%, 수직 위치 정확도는 6.7% 더 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다. 다만 6년간 수직 지연 값의 평균은 Klobuchar 모델보다 더 크게 나타났지만, NTCM-BC 모델은 전 세계 모든 지점에 대해 모델링된 것으로 한반도 내의 전리층 지연 값을 사용하여 모델 계수를 생성하면 모델의 정확도를 더 높일 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgments

본 연구는 과학기술정보통신부 우주핵심기술개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다(NRF-2016M1A3A3A02016943).

References

[1] N. Jakowski, M. M. Hoque, and C. Mayer, "A new global TEC model for estimating transionospheric radio wave propagation errors," *Journal of Geodesy*, Vol. 85, No. 12, pp. 965-974, 2011.

[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, 1987.

[3] M. Kim and J. 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, 2016.

[4] M. M. Hoque, N. Jakowski, and J. Berdermann, "Ionospheric correction using NTCM driven by GPS Klobuchar coefficients for GNSS applications," *GPS Solution*, pp.1-10, 2017.

[5] M. M. Hoque and N. Jakowski, "An alternative ionospheric correction model for global navigation satellite systems," *Journal of Geodesy*, Vol. 89, No. 4, pp. 391-406, 2015.

[6] RTCA, Inc., *Minimum operational performance standards for global positioning system/wide area augmentation system airborne equipment*, RTCA DO-229C, 2001.

[7] J. S. Subirana, J. M. J. Zornoza, and M. Hernandez-Pajares, *GNSS data processing volume I: fundamentals and algorithm*, 1st ed. Noordwijk, ZH: ESA Communications, pp. 139-161, 2013.



김민규 (Mingyu Kim)

2013년 2월 : 한국항공대학교 항공우주공학과(공학사)
2013년 2월 ~ 현재 : 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과(박사과정)
※관심분야 : GNSS, 위성항법, SBAS



명재욱 (Jaewook Myung)

2016년 2월 : 한국항공대학교 항공우주공학과(공학사)
2016년 2월 ~ 현재 : 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과(석사과정)
※관심분야 : GNSS, 위성항법



김정래 (Jeongrae Kim)

1991년 2월 : 서울대학교 항공우주공학과(공학사)
1993년 2월 : 서울대학교 항공우주공학과(공학석사)
2000년 : 미국 University of Texas at Austin(공학박사)
2000년 ~ 2002년 : 미국 Center for Space Research 연구원
2002년 ~ 2004년 : 한국항공우주원 선임연구원
2004년 ~ 현재 : 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 교수
※관심분야 : GNSS, 위성항법, 위성궤도