# Accuracy Analysis of Predicted CODE GIM in the Korean Peninsula

Ei-Ju Sim, Kwan-Dong Park<sup>†</sup>, Jae-Young Park, Bong-Gyu Park



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.

## Accuracy Analysis of Predicted CODE GIM in the Korean Peninsula

Ei–Ju Sim<sup>1</sup>, Kwan–Dong Park<sup>1,2†</sup>, Jae–Young Park<sup>2</sup>, Bong–Gyu Park<sup>1</sup> <sup>1</sup>Department of Geoinformatic Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea <sup>2</sup>PP-Solution Inc., Seoul 08504, Korea

## ABSTRACT

One recent notable method for real-time elimination of ionospheric errors in geodetic applications is the Predicted Global Ionosphere Map (PGIM). This study analyzes the level of accuracy achievable when applying the PGIM provided by the Center for Orbit Determination of Europe (CODE) to the Korean Peninsula region. First, an examination of the types and lead times of PGIMs provided by the International GNSS Service (IGS) Analysis Center revealed that CODE's two-day prediction model, C2PG, is available approximately eight hours before midnight. This suggests higher real-time usability compared to the one-day prediction model, C1PG. When evaluating the accuracy of PGIM by assuming the final output of the Global Ionosphere Map (GIM) as a reference, it was found that on days with low solar activity, the error is within ~2 TECU, and on days with high solar activity, the error reaches ~3 TECU. A comparison of the errors introduced when using PGIM and three solar activity indices—Kp index, F10.7, and sunspot number—revealed that F10.7 exhibits a relatively high correlation coefficient compared to Kp-index and sunspot number, confirming the effectiveness of the prediction model.

Keywords: GNSS, ionosphere, CODE GIM

## 1. 서론

GNSS 신호전달과정에서 전리층은 가장 큰 오차 요인으로 작 용한다 (Misra & Enge 2006). 만약 이중주파수 수신기를 사용한 다면 무전리층 조합(ionosphere-free combination)을 통해 전리 층 오차를 거의 완벽하게 제거할 수 있다. 반면 소형 및 저비용 수 신기의 경우 대부분 단일주파수만을 수신하기 때문에 전리층 오 차를 제거 혹은 모델링 하는 방안을 강구해야 한다. 단일 주파 수의 경우, 전리층 오차의 보정에 사용되는 대표적인 방식으로 Klobuchar 모델과 Global Ionosphere Map (GIM)이 있다. 실시 간 항법메시지에서 제공되는 Klobuchar 모델은 8개의 매개변수 로 구성되어 있는데, 전리층 오차를 50-60% 수준으로만 보정할 수 있다는 한계가 있다. 보정 효과가 낮은 이유는 8개 매개변수가 I일 단위로 고정된 값이고, 시간해상도에 관한 고려가 지나치게

Received Sep 06, 2023 Revised Oct 10, 2023 Accepted Nov 06, 2023 <sup>†</sup>Corresponding Author

E-mail: kdpark@inha.ac.kr

Tel: +82-032-873-4310 Fax: +82-32-863-1506

Ei-Ju Sim https://orcid.org/0000-0002-9639-554X Kwan-Dong Park https://orcid.org/0000-0003-1538-8768 Jae-Young Park https://orcid.org/0000-0002-6963-7224 Bong-Gyu Park https://orcid.org/0000-0001-6704-8816 단순화되어 있기 때문이다 (Klobuchar 1987).

GIM은 격자형 전리층 모델로, 전세계 상시관측소에서 수집된 데이터를 실시간 및 준실시간 처리해서 생성된다. 격자의 공간해 상도는 경도 5°와 위도 2.5°로, 각 격자점에서의 수직방향 총전자 수(Vertical Total Electron Content, VTEC)를 TEC Unit (TECU) 단위로 확보할 수 있다. 현재 다수의 International GNSS Service (IGS) 분석센터가 전리층 VTEC 격자 모델을 생성하고 Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS)와 같은 IGS 데이터 센터를 통해 GIM 산출물(product)을 제공하고 있다 (IGS 2023). 대표적인 IGS 분석센터로는 Center for Orbit Determination of Europe (CODE), NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL), European Space Agency (ESA), Chinese Academy of Sciences (CAS), Canadian Geodetic Survey (CGS), Group of Astronomy and Geomatics Technical Univ. of Catalonia (UPC), 그리고 Wuhan University (WHU)가 있다. 각 분석센터들은 최종 분 석 결과물인 최종산출물(final product) 혹은 신속산출물(rapid product)을 기본적으로 제공하고 있으며, 예측(predicted) 모 델이나 신속-고율(rapid high rate) 모델, 그리고 신속-초-고율 (rapid ultra-high rate)모델을 제공하는 분석센터도 있다.

GIM 예측 모델은 CODE에서 제공하고 있으며, CIPG (1-day prediction), C2PG (2-day prediction)의 두 가지 종류가 있다. Schaer (1999)가 GPS 관측 값을 처리해 CIPG와 C2PG 모델을 생



Fig. 1. Latency in days of final and rapid products obtained from eight analysis centers. Two predicted products from CODE, which are denoted as one-day (C1PG) and two-day (C2PG), are denoted in the upper left plot.

성하는 아이디어를 제안한 이후 다양한 준실시간 또는 실황예보 (nowcasting) 방식의 GIM 서비스가 개발되고 있다. 최근 Wang et al. (2018)은 적응형자기회귀모형(adaptive autoregressive model) 기반으로 예측 VTEC을 산출하였다. 산출 결과를 CODE 의 최종 GIM과 비교한 다음 Jason-2와 Jason-3 위성고도계 관 측값을 기준으로 재차 검증했을 때 예측 정확도가 root mean square error (RMSE)로 1.5 TECU 수준임을 보였다.

Ren et al. (2019)은 CODE의 예측 모델인 CIPG와 IGS 최종산 출물을 비교하였다. 해당 연구는 2017년에서 2019년까지 3년간의 장기간에 걸친 분석으로 진행되었으며, Jason 위성고도계로 측정 한 TEC 값을 참값으로 간주하였다. 연구 결과, CIPG GIM과 IGS GIM의 일일 평균 편향값은 Jason-2 VTEC의 경우 1-4 TECU이 며 Jason-3 VTEC의 경우 4-6 TECU의 수준으로 나타났다. 가 장 최신 실황예보 개발 사례로 24시간 슬라이딩 윈도(sliding window) 방식으로 1-2시간 단위의 예측모델을 개발한 Jin & Song (2023)의 경우를 들 수 있다. 해당 연구에서도 다수의 선행 연구와 유사하게 예측 정확도를 Jason 위성고도계 결과와 비교하 였는데, CODE의 CIPG보다 정확하고 안정적인 예측이 가능함을 입증하였다.

선행연구를 살펴보면 다양한 수학, 물리적 모델을 기반으로 GIM 예측모델을 개발하고 최종 IGS 산출물 및 위성고도계 관측 값을 기준으로 유효성을 검증하였다. 그러나 기존 연구는 해외 연구진에 의해 전지구를 대상으로 수행된 연구로 한반도 및 주 변지역을 중심으로 평가한 사례는 발견되지 않았다. 대륙의 경계 에 위치해 있어 해양지역의 상시관측소 관측 데이터를 사용할 수 없다는 점, 그리고 중국에서 운영하는 GNSS 상시관측소 데이터 는 국제사회에 제한적으로 공개되고 있는 현실을 고려하면 해외 에서 생산하는 CIPG, C2PG의 정확도가 기존 연구에서 발표하는 수준으로 한반도에 유효한지 평가할 필요가 있다고 판단된다.

본 연구에서는, CODE 예측 모델의 실시간 국내 사용 가능 여 부를 대기시간(latency)과 정확도라는 두 가지 측면에서 판단 한다. 먼저 CDDIS에 기록된 업로드 시간을 한국표준시로 변환 해 모델 확보 가능 시간대 및 대기시간을 파악하였다. 다음으로, 한반도 일대에서 GNSS를 사용할 경우 발생하는 전리층통과점 (Ionosphere Piercing Point, IPP)의 범위인 동경 105.0~150.0°와 북위 22.5~50.0° 범위에서 예측모델의 정확도를 분석하였다. 이 때 기준은 IGS GIM 최종산출물을 채택하였다. 마지막으로 예측 성능의 평가 결과를 태양 활동을 나타내는 지표와 연관 지어 분 석하기 위해 Kp-지수(Kp-index)와 F10.7, 그리고 태양 흑점 개수 를 활용하였다.

## 2. 분석센터별 대기시간

각 IGS 분석센터에서 GIM이 생성되면 해당 산출물은 CDDIS 에 자동으로 업로드가 진행된다. 그러나 분석센터와 산출물의 종 류에 따라 대기시간은 다르다. 일반적으로, 최종모델은 1~2주, 신 속모델은 대략 1주, 예측모델은 1일전과 2일전에 업로드 절차가 완료되는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 2021년 1월 1일부터 10일간의 대기시간을 확인하고 그 결과를 Table 1에 정리하였다. 표에서 "-"로 표시한 것은 산출물이 제공되지 않은 경우를 의미 한다.

Products	CODE	JPL	ESA	IGS	CAS	CGS	UPC	WHU
Final	5.1	3.6	9.0	24.1	35.6	2.8	6.2	3.6
Rapid	1.6	1.6	1.6	2.1	35.6	-	2.8	2.8
Rapid high rate	-	-	1.6	-	-	-	2.8	-
Rapid ultra-high rate	-	-	-	-	-	-	2.8	-
1-day prediction	0.7	-	-	-	-	-	-	-
2-day prediction	-0.6	-	-	-	-	-	-	-

Table 1.	Latency in c	days of six different	GIM products availab	le from eight analysis centers.
----------	--------------	-----------------------	----------------------	---------------------------------



Fig. 2. Geographic locations of 120 grid points of the study area.

전체 분석센터 중 ESA와 IGS, CAS를 제외한 5곳은 최종 및 신속 산출물을 1주일 이내에 제공하고 있는 것으로 파악되었다. IGS는 각 분석센터가 생성한 산출물을 취합한 다음 최종 조합 모 델(combination model)을 생성하기 때문에 상당한 시간, 즉 대략 2주의 시간이 필요하다. 이를 고려한다면 CAS의 35.6일은 매우 이례적인 경우라고 볼 수 있다. CAS는 DOY 10일차에 10일 동안 의 GIM을 한 번에 업로드하였다. 이는 타 분석센터에서도 간헐 적으로 발생하는 상황이다.

Table 1에서는 평균값을 나타낸 반면 Fig. 1에서는 10일간 8개 분석센터에서 제공하는 최종과 신속 산출물의 대기시간을 그래 프로 나타냈다. 그리고 유일하게 예측 산출물을 제공하는 CODE 에 대해서는 1일 예측과 2일 예측 모델의 대기시간을 좌측 상단 에 따로 구분해 도식하였다. Fig. 1에서 규칙적인 시간대에 업로드 를 진행하는 기관과 불규칙한 업로드 시간대를 가지는 기관들이 다양하게 나타났으며, CODE와 JPL, CGS, WHU는 규칙적인 업 로드가 진행되는 것으로 나타났다.

Table 1과 Fig. 1의 결과를 정리해보면 다음과 같은 결론을 도출 할 수 있다. 우선 CODE, ESA, UPC는 예측모델 혹은 신속-고율, 신속-초-고율 모델을 제공한다. ESA와 UPC의 신속-고율 모델 의 시간 간격은 각각 1시간과 15분으로 시간해상도가 높다는 장 점을 가지고 있어 특수한 목적에 유용하다고 할 수 있다. 하지만, 신속모델과 비교했을 때 대기시간에 큰 차이가 없고 업로드 시각 역시 불규칙적이므로 실시간 활용이 불가능하다. 두 번째 결론으 로는 CODE가 예측모델을 제공하며, 모델 업로드 시각이 규칙적 이라는 사실이다. 또한, 한국표준시(Korean Standard Time, KST) 를 기준으로 2일-예측모델은 0.6일 앞선 시간에 모델 확보가 가 능하다. 0.6일을 시간으로 환산하여 해석하면, 자정 기준 약 8시 간 전에 2일-예측모델을 획득할 수 있는 것이 된다. 1일-예측모 델은 자정 기준 16시간 후에 획득할 수 있다. 따라서, CODE에서 제공하는 예측 모델인 C2PG가 GNSS 전리층 오차의 실시간 보 정에 가장 유용하게 사용될 수 있다.

## 3. 예측모델 성능 검증

실시간 GNSS 측위에 예측 GIM 모델을 적용하는 경우의 측위 성능을 파악하기 위해 다음과 같은 검증 실험을 수행하였다. 먼저 계절에 따른 전리층 활동 강도의 차이가 예측 성능에 미치는 영 향을 파악하기 위해 봄, 여름, 가을, 겨울 기간 모두를 대상으로 하 였다. 3개월 간격으로 겨울, 봄, 여름, 가을을 각각 대표하는 기간 이라고 판단한 2021년 2월, 5월, 8월, 11월에서 매달 1일에서 7일까 지 1주일씩 총 28일간의 실험 일자로 선정하였다. 다음으로 공간 적인 범위는 아래와 같은 논리로 선정하였다. 본 연구는 한반도와 인근지역에서의 측위로 한정하기 때문에 해당 지역에서 GNSS 수신기를 사용할 때 발생하는 IPP의 지리학 범위를 그 대상으 로 하였다. Ryu et al. (2018)에 따르면 한반도 IPP의 범위는 동경 105~150°와 북위 20~50°이다. 본 연구에서도 이와 유사하게 동경 105.0~150.0°와 북위 22.5~50.0°범위를 선정하였다. Fig. 2는 본 연 구의 대상이 되는 공간적 범위를 보여준다. 지도에서 점으로 나타 낸 것은 위도 2.5°, 경도 5° 간격으로 설정한 격자점으로 그 값은 GIM에서 제공하는 동일한 지리적 좌표를 사용하였다. 그림에서 보는 바와 같이 격자점이 위도 방향으로 12개씩, 경도 방향으로 10 개씩 존재하므로 전체 120개의 격자점이 분석대상이 된다.

시간적인 범위를 보면 IGS GIM이 매 2시간 간격으로 제공되 므로 특정 날짜의 0시부터 24시까지의 VTEC 값을 고려하면 총 13개 값이 존재한다. 연속적인 날짜를 분석할 경우 두 날짜에 공 통되는 0시 값이 존재하므로 총 N 날의 VTEC값을 고려한다면 데이터 수는 (12 N + 1)가 된다. 본 연구에서는 7일 연속 데이터를 분석하기 때문에 85개 시점의 VTEC 값을 사용하였다. 결론적으 로 120개 격자점이 존재하고 각 격자점마다 85개의 오차 값을 산 출하게 되었다.

이 연구에서 계산한 오차는 최종 모델과 예측 모델의 차이값 의 절댓값이다. 오차가 작을수록 최종 모델과 예측 모델이 유사 한 것이기에 예측 모델의 정확도는 높다고 판단한다. 예측 모델 의 정확도 분석은 모든 격자에서의 시계열 오차, 오차가 가장 큰 계절에서의 위도별 오차 그리고 최소와 최대 오차를 가지는 계절 의 오차 RMS를 통해 검증하였다.

전체 격자점 120개에서 발생한 오차의 시계열 그래프는 Fig. 3 과 같다. 가로축은 UTC를 기준으로 한 시간이며, 세로축은 예측 모델의 오차를 TECU 단위로 나타낸 것이다. 모든 격자점에서의 오차는 연두색 원으로, 같은 시각에서 발생한 모든 격자점의 평 균은 초록색 사각형으로, 표준편차는 오차막대(error bar)로 나 타내었다. Fig. 3을 보면 한국표준시를 기준으로 오후에 오차의



Fig. 3. Time series of VTEC differences at 120 grid points for the first seven days in February, May, August, and November.



Fig. 4. VTEC differences at every grid points (black dots), at grid points with latitude of  $50^{\circ}$  (red circle), and  $22.5^{\circ}$  (blue circles) in November.

평균과 표준편차가 크게 나타났다가 오전에 그 값들이 줄어들고 있는 것을 확인할 수 있다. 가을을 제외한 나머지 계절에서는 전 체 격자점 오차의 평균이 5 TECU 미만으로 나타났다. 빨간색 사 각형으로 표현한 가을의 최대 오차는 11월 1일 10시에 16.2 TECU 로 나타났다. 이는 동일한 시각에 발생한 다른 계절의 최대 오차 와 비교했을 때 가을의 최대 오차가 약 4배 정도 큰 값을 가진 것 이다. 겨울, 봄, 여름의 표준편차의 평균은 각각 0.61, 0.85, 0.90 TECU로 1 TECU 이하의 값으로 나타났다. 반면 가을 표준편차 의 경우 1.44 TECU로 최대값을 나타냈다. 표준편차가 크게 나오 는 것은 동일한 시각에 격자간 오차 차이가 큰 것을 의미한다. 따 라서 가을에는 오차가 크게 발생하는 것뿐만 아니라 위도에 따른 오차 차이도 크게 발생하는 것으로 보인다.

Fig. 4에는 격자에서 발생한 오차와 위도의 관계성을 분석하기 위해 Fig. 3의 가을 그래프에 가장 고위도인 북위 50°와 가장 저위 도인 북위 22.5°에서 발생한 오차를 추가하였다. 오차와 위도만의 관계성을 분석하기 위하여 경도와 무관하게 격자점을 선정했기 에 북위 50°와 22.5°에 격자점이 각각 10개씩 선택됐다. 검정색 점

 Table 2.
 Averages and standard deviations of weekly RMSE values at 120 grid points [Unit: TECU].

Model	February	May	August	November
C1PG	$1.34 \pm 0.29$	$1.67 \pm 0.44$	$1.96 \pm 0.40$	$3.18 \pm 1.34$
C2PG	$1.43 \pm 0.23$	$1.66 \pm 0.40$	$1.99 \pm 0.47$	$2.97 \pm 0.89$

은 모든 격자점에서 발생한 오차를 나타낸다. 위도가 가장 높은 북위 50°에서의 오차는 파란색 원, 위도가 가장 낮은 북위 22.5°에 서의 오차는 빨간색 원으로 검정색 점 위에 나타내었다. Fig. 4에 나타난 것과 같이 저위도에서의 오차를 나타내는 빨간색 원은 그 래프의 상단에 분포하며 고위도에서의 오차를 나타내는 파란색 원은 하단에 나타나고 있다. 파란색 원의 분포로 알 수 있듯이 고 위도에서 발생한 오차는 11월 3일을 제외한 나머지 일자에서 전 부 6 TECU 이하의 수치로 가을에 발생한 오차 중 상대적으로 낮 은 수치임을 알 수 있다. 그리고 빨간색 원의 분포를 통해 오차의 최대값은 저위도에서 여러 차례 나타난 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 예측 모델의 오차는 위도의 영향을 받으며 저위도에서 오차가 크게 나온다는 것을 확인하였다.

각 격자점에서 계절별로 모든 시간에 대한 예측 모델 오차의 RMSE를 구한 다음, 120개 격자점에 대한 RMSE의 평균 값과 표 준편차를 Table 2에 나열하였다. RMSE 평균 값을 보았을 때 봄, 여름, 겨울에는 두 모델 모두 2 TECU 이하의 값을 가졌지만, 가 을의 경우 C2PG는 2 TECU, CIPG는 3 TECU를 상회했다. 가을 에는 전리층 활동이 상대적으로 활발하기 때문에 다른 계절에서 의 RMSE 평균보다 높게 나왔다고 판단된다. 이를 통해 사계절 중 가을의 RMSE 평균이 가장 크게 나타난 것을 확인할 수 있었 다. 또한 CIPG 모델에서 가을과 다른 계절의 RMSE 표준편차의 차이가 크게 나타났다. 가을의 표준편차는 여름의 표준편차보다 약 3.4배 컸으며, 겨울의 표준편차와 비교했을 경우 약 4.6배로 가 장 큰 차이가 나타났다.

Table 2에서 C2PG 모델의 RMSE 평균은 2월에 1.43 TECU로 최소였으며, 최대값은 11월에 2.97 TECU로 나타났다. 2월과 11월 에 해당하는 C2PG RMSE의 등고선도(contour plot)를 Fig. 5에



Fig. 5. Contour plots of RMSE values in February (left) and November (right).



Fig. 6. Time-series of Kp-indices during the seven days in February, May, August, and November of the year 2021.

#### 나타냈다.

두 그래프 모두 0~4 TECU 범위를 가지는 동일한 스케일바 (scale bar)를 사용함으로써 둘의 차이를 쉽게 파악할 수 있도록 하였다. Fig. 5에서 11월은 2월에 비해 모든 격자점에서 전체적으 로 큰 값을 가지고 있으며, 공간적인 편차가 큰 것을 볼 수 있다. 이를 통해 Table 2의 11월이 2월에 비해 평균과 표준편차 모두 2 배 이상 큰 값을 가진 것을 알 수 있으며, 이러한 현상은 태양활 동이 활발한 가을에 나타나는 전형적인 전리층 특성이라고 할 수 있다 (Lee et al. 2010). 또한 저위도로 갈수록 RMSE가 높아지는 것을 알 수 있다. Ya'acob et al. (2008)에 의하면 저위도 지역에서 의 전자밀도가 높아 RMSE도 같이 증가하는 것이 일반적이기 때 문에 Fig. 5에서 발견되는 위도 별 변화 양상은 전형적인 전리층 변동 특성에서 기인한 것으로 볼 수 있다.

#### 4. 예측모델 성능과 태양활동 지표

앞선 분석을 통해 예측 GIM 모델인 CIPG, C2PG의 정확도가 계절 및 위도와 밀접한 상관관계를 가지고 있음을 확인하였다. 추가적으로 예측성능과 태양활동의 연관성을 파악하기 위해 태 양활동의 크기와 변동성을 나타내는 지표인 Kp-지수, FI0.7, 그리 고 태양 흑점 개수 총 세 가지와 예측성능의 상관관계를 분석하 였다.



Fig. 7. Correlation of average VTEC differences and Kp-indices.

#### 4.1 Kp-지수

지구자기장의 변동 정도를 표시하는 물리량인 Kp-지수는 지 자기 관측소의 표준화된 K-지수에서 파생되었으며 지자기 변동 량을 0에서 9까지 범위의 숫자로 나타낸다. 본 연구에서는 GFZ-Potsdam에서 운영하는 FTP 서버를 통해 Kp-지수 자료를 확보하 였다. 해당 사이트에서 1일 8회, 즉 3시간 간격으로 제공하는 최종 Kp-지수를 사용하였다. 분석 기간에 해당하는 2021년 2월, 5월, 8 월, 그리고 11월의 첫 7일간의 시계열을 Fig. 6에 나타냈다.

Fig. 6에 나타낸 2월, 5월, 8월, 그리고 11월의 Kp-지수 평균과 표준편차는 각각 1.98 ± 1.25, 0.94 ± 0.73, 1.48 ± 1.1, 그리고 2.96 ± 1.8로 계산되었다. Table 2에서 나타났던 결과와 동일하게 가을의 Kp-지수 평균이 사계절 중 가장 높은 것을 알 수 있다. Kp-지수와 오차의 상관관계를 살펴보기 위해 Fig. 7과 같이 Kp-지수의 평균 과 표준편차를 가로축에, 그리고 각 계절별 예측 모델 오차 RMSE 의 평균 및 표준편차를 세로축에 나타냈다. Kp-지수를 기준으로 CIPG와 C2PG의 상관계수는 각각 0.66, 0.65로 계산되었다.

#### 4.2 F10.7

Kim & Kim (2016)에 따르면 Klobuchar 모델의 경우 Kp-지 수의 평균값인 Ap와 지자기 폭풍 정도를 평가 시 사용되는 값인 Dst는 상관관계가 낮았고, 태양 활동 지수인 F10.7과 태양 흑점

Table 3. Three different F10.7 values from NRC.

Month	Observed	Adjusted	USRI
February	$72.71 \pm 0.56$	70.67	63.61
May	$71.27 \pm 1.28$	72.48	65.23
August	$74.21 \pm 1.17$	76.38	68.73
November	$93.06 \pm 4.47$	91.50	82.36



Fig. 8. Correlation of average VTEC differences and F10.7 values.

개수는 큰 상관관계를 가진다. 특히 F10.7은 날씨에 관계없이 지 표면에서 매일 안정적으로 측정할 수 있기에 태양 활동의 대표 적인 지표로 사용된다. 본 연구에서는 캐나다 National Research Council (NRC)에서 제공하는 F10.7 측정값을 활용하였다. NRC의 F10.7 값은 Observed Flux, Adjusted Flux, USRI Flux 총 3종류로 분류되며 모두 하루 3번(18시, 20시, 22시) 제공된다. Table 3에는 모든 종류의 F10.7을 나열하였으며 표준편차의 경우 본 연구에서 사용할 Observed Flux의 경우에만 나타내었다.

Table 3에서 FI0.7은 11월, 8월 순서로 높은 값을 보이고, 2월과 5월은 유사하게 산출되었다. 2021년 전체기간에 대한 FI0.7의 평 균이 81.91인 것을 감안하면 11월은 태양 활동이 상당히 활발했던 것을 알 수 있다. FI0.7과 평균 TECU 오차의 상관관계를 살펴보 기 위해 Fig. 8과 같이 FI0.7 값의 평균과 표준편차를 가로축에, 그 리고 TECU 오차의 평균 및 표준편차를 세로축에 나타냈다. FI0.7 상관성 분석에서는 FI0.7이 제공되는 18시, 20시, 22시에 해당되 는 VTEC 오차의 평균만을 사용하였다. FI0.7을 기준으로 CIPG 와 C2PG의 상관계수는 모두 0.80으로 나타나 상관관계가 높음 을 알 수 있다.

## 4.3 흑점수

CIPG와 C2PG의 예측성능을 전리층 활동의 여부 및 크기와 연관 지어 설명하기 위해 태양 흑점 수(sunspot number)를 고려 하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 "태양 흑점 수"를 "흑점수"로 칭하기로 한다. 흑점수는 관측치가 하루에 하나씩 제공되기 때문 에 분석대상이 되는 2월, 5월, 8월, 11월의 1일부터 7일까지 총 7일 간의 값을 Fig. 9에 나타냈다. 흑점수는 Sunspot Index and Longterm Solar Observations (SILSO)에서 제공하는 데이터를 사용 하였다. 그림에 나타낸 2월, 5월, 8월, 11월의 흑점수 평균과 표준 편차는 각각 2.3 ± 3.9, 2.9 ± 4.9, 12.1 ± 7.4, 36.6 ± 8.0으로 산출되



Fig. 9. Time-series of sunspot numbers during the seven days in February, May, August, and November of the year 2021.



Fig. 10. Correlation of average VTEC differences and sunspot numbers.

Table 4. Correlation coefficient of each solar activity index and C1PG and C2PG.

Solar activity index	C1PG	C2PG
Kp-indices	0.66	0.65
F10.7 values	0.80	0.80
Sunspot numbers	0.76	0.75

었다.

흑점수와 평균 TECU 오차의 상관관계를 살펴보기 위해 Fig. 10과 같이 흑점수의 평균과 표준편차를 가로축에, 그리고 TECU 오차의 평균 및 표준편차를 세로축에 나타냈다. 상관계수는 CIPG와 C2PG에 대해 각각 0.76과 0.75로 나타났다.

#### 4.4 상관성 고찰

1일 단위 예측 GIM인 CIPG와 2일 단위인 C2PG 모델의 정 확도, 즉 예측오차를 평가한 결과를 태양활동 지표인 Kp-지수, F10.7 그리고 흑점수와 비교하였다.

Table 4에 태양활동 지표와 CIPG, C2PG의 상관계수를 나열 하였다. 특히 실시간으로 활용할 수 있는 C2PG의 경우 VTEC 계 산 오차와 Kp-지수의 상관계수가 0.65로 세가지 지표 중 가장 낮 게 나타났다. 반면 FI0.7은 0.80으로 가장 높고, 흑점수의 경우 거 의 FI0.7에 근접하는 0.75로 계산되었다. 이는 전리층 모델 오차와 FI0.7이 가장 큰 상관관계를 가졌던 Kim & Kim (2016)과 유사한 결과이다. 또한, 두 모델 모두 비슷한 수치의 높은 양의 상관관계 를 가졌다.

## 5. 결론

본 연구에서는 전지구를 대상으로 제공되는 PGIM의 가용성 과 정확도를 평가하였다. 다양한 IGS 분석센터에서 실황예보 성 격의 격자형 VTEC 값을 제공하고 있지만 실시간 가용성 측면 에서 매일 0시 기준으로 최소 8시간 이전부터 가용한 CODE의 C2PG가 실시간 적용에 가장 적합한 것으로 판단하였다. 정확도 를 검증하기 위해 한반도와 주변 지역, 즉 동경 105.0~150.0°와 북 위 22.5~50.0° 범위에서 발생하는 전리층통과점에 상응하는 120 개 격자점에서 예측오차를 2021년 봄, 여름, 가을, 겨울 계절별 7 일씩, 총 28일에 대해 분석하였다. 계절별 분석 결과 가을을 제 외한 나머지 세 계절에서는 두 예측 모델의 RMSE의 평균값이 2 TECU, 표준편차는 약 0.4 TECU로 나타났다. 하지만 가을의 RMSE의 평균값은 약 3 TECU로 다른 시기보다 높게 나타났다. 이러한 결과가 나타난 이유는 예측 모델의 성능을 평가하기 위한 지표로 사용했던 Kp-지수, F10.7 그리고 흑점수에서 가을의 수치 가 다른 계절에서 보다 높게 나왔기 때문이다. 활발한 전리층과 태양 활동이 가을의 PGIM 예측 성능에 크게 영향을 미친 것으로 추정된다. 마지막으로 예측성능과 태양활동의 연관성을 파악하 기 위해 사용했던 세가지 지표 중에서 F10.7의 상관계수가 0.8로 나와 연관성이 가장 높은 것을 확인하였다. 그리고 두 예측모델 에서의 각 지표의 상관계수는 유사했다. 분석센터별 대기시간과 예측 모델의 정확도 분석 결과를 종합하였을 경우 C2PG를 사용 하는 것이 실시간 국내 사용에 더 유용할 것이라고 판단된다. 그 러나 이 연구에서 분석 기간을 각 계절을 대표하는 사계절로 선 정했지만 2021년 총 1년 간의 태양활동 지표 수치와 비교한 결과 태양활동이 극심한 시기는 포함되지 않는 것을 확인하였다. 따라 서 향후 연구에서는 태양 극대기와 극소기를 포함한 장기간 분석 을 수행하는 추가 연구가 필요할 것으로 본다.

## ACKNOWLEDGMENTS

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음 (과제번호 RS-2022-00141819).

## AUTHOR CONTRIBUTIONS

All the authors have contributed to the presented work. K.D. conceived of the presented idea. E.J. performed the algorithm verification. J.Y. reviewed this work and edit the final manuscript. B.G. performed the tasks required for analysis. K.D. supervised the findings of this work.

## CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

## REFERENCES

- International GNSS Service, Ionospheric Products [Internet], cited 2023 Jul 25, available from: https://igs.org/ products/#ionosphere
- Jin, X. & Song, S. 2023, Near real-time global ionospheric total electron content modeling and nowcasting based on GNSS observations, Journal of Geodesy, 97, 27. https://doi.org/10.1007/s00190-023-01715-3
- Kim, M. & Kim, J. 2016, A Long-term Accuracy Analysis of the GPS Klobuchar Ionosphere Model, Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics, 24, 11-18. https://doi.org/10.12985/ksaa.2016.24.2.011
- 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
- Lee, C.-M., Park, K.-D., & Lee, S.-U. 2010, Comparison of Real-Time Ionospheric Delay Correction Models for Single-Frequency GNSS Receivers: Klobuchar Model and NeQuick Model, Journal of the Korean Society of Survey, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography, 28, 413-420.
- Misra, P. & Enge, P. 2006, Global positioning system: Signals, Measurements, and Performance, 2nd ed. (Lincoln, MA: Ganga-Jamuna Press).
- Ren, X., Chen, J., Li, X., Zhang, X., & Freeshah, M. 2019, Performance evaluation of real-time global ionospheric maps provided by different IGS analysis centers, GPS Solutions, 23, Article number: 113. https://doi.org/10.1007/ s10291-019-0904-5
- Ryu, G., So, H., & Park H. 2018, Performance Analysis of Artificial Neural Network for Expanding the Ionospheric Correction Coverage of GNSS, Journal of Advanced Navigation Technology, 22, 409-414. https:// doi.org/10.12673/JANT.2018.22.5.409
- Schaer, S. 1999, Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the Global Positioning System, dissertation, Astron. Inst., Univ. of Bern, Bern.
- Wang, C., Xin, S., Liu, X., Shi, C., & Fan, L. 2018, Prediction of global ionospheric VTEC maps using an adaptive autoregressive model. Earth, Planets and Space, 70, Article number: 18. https://doi.org/10.1186/s40623-

017-0762-8

Ya'acob, N., Abdullah, M., Ismail. M., Bahari, S. A., & M. K. Ismail. 2008, Ionospheric mapping function for total electron content (TEC) using global positioning system (GPS) data in Malaysia, 2008 IEEE International RF and Microwave Conference, Kuala Lumpur, Malaysia, 2-4 Dec 2008, pp.386-390. https://doi.org/10.1109/ RFM.2008.4897385



**Ei-Ju Sim** is a B.S. student in the Department of Geoinformatic Engineering at Inha University. Her research interests include ionospheric error correction model algorithm development.



Kwan-Dong Park received his Ph.D. degree from the Department of Aerospace Engineering and Engineering Mechanics at the University of Texas at Austin, and he is currently at Inha University as a professor. His research interests include PPP-RTK algorithm development and GNSS geodesy.



Jae-Young Park received M.S. degree in Geoinformatic Engineering from Inha University, Korea. He received B.S degree from the same university. His research interests include PPP-RTK and SSR2OSR algorithm development.



**Bong-Gyu Park** received his B.S. degree in Geoinformatic Engineering and Electronics Engineering from Inha University, Korea. His research interests include GNSS measurement analysis, Deep Learning and Signal Processing.