

## 한국지역에서의 단일주파수 GNSS 사용자를 위한 전리층 잔류 오차 모델 개발

# A Residual Ionospheric Error Model for Single Frequency GNSS Users in the Korean Region

윤문석\* · 안종선 · 주정민

한국항공우주연구원 위성항법사업부

Moonseok Yoon\* · Jongsun Ahn · Jung -Min Joo

GNSS R&D Division, Korea Aerospace Research Institute, Daejeon, 34133, Korea

### [요 약]

GNSS (global navigation satellite system) 측정치 보정 후에 남아 있는 전리층 잔류 오차에 대해 시뮬레이션 기반의 영향분석(오차 및 서비스 영역 분석 등)을 수행하기 위해서는 전리층 잔류 오차에 대한 통계적 모델링이 필수적으로 선행되어야 한다. 본 논문에서는 국내 GNSS 측정치 및 Klobuchar 모델을 활용하여 국내 정상상태 전리층 환경에서의 전리층 잔류 오차에 대한 보수적인 표준편차의 해석적 모델을 도출하였다. 다양한 전리층 활동 상태를 포함하기 위해 美 CAT I (category I) LAAS (local-area augmentation system) 전리층 통계치 산출일 중 ROTI (rate-of-tec index) 지수를 활용하여 전리층 활동이 비정상적인 날씨는 제외하고 GNSS 분석 데이터를 구성하였다. GNSS 데이터 처리를 통해 전리층 잔류 오차를 계산하고, 잔류 오차 거동의 특성을 근거하여 지역 시 및 위성 양각에 따라 통계치를 산출하였다. 마지막으로 전리층 잔류 오차의 확률적 거동을 보수적으로 포함할 수 있는 표준편차값에 대한 해석적 모델을 감쇠 지수 접합을 통해 도출하였다.

### [Abstract]

Ionosphere, one of the largest error sources, can pose potentially harmful threat to single-frequency GNSS (global navigation satellite system) user even after applying ionospheric corrections to their GNSS measurements. To quantitatively assess ionospheric impacts on the satellite navigation-based applications using simulation, the standard deviation of residual ionospheric errors is needed. Thus, in this paper, we determine conservative statistical quantity that covers typical residual ionospheric errors for nominal days. Extensive data-processing computes TEC (total electron content) estimates from GNSS measurements collected from the Korean reference station networks. We use Klobuchar model as a correction to calculate residual ionospheric errors from TEC (total electron content) estimate. Finally, an exponential delay model for residual ionospheric errors is presented as a function of local time and satellite elevation angle.

**Key word** : GNSS, GNSS remote sensing, Ionosphere, Klobuchar model, Residual ionospheric error.

<https://doi.org/10.12673/jant.2021.25.3.194>



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 21 May; Revised 31 May 2021

Accepted (Publication) 28 June (30 June 2021)

\*Corresponding Author: Moonseok Yoon

Tel: +82-42-870-3508

E-mail: msyoon@kari.re.kr

## 1. 서론

GNSS (global navigation satellite system)는 전 지구적인 측위 정보 시스템으로서 위성으로부터 방송되는 항법메시지를 이용하여 3차원 위치 및 속도, 시각 정보를 제공한다. 이러한 이점을 바탕으로 GNSS는 항공, 교통, 국방, 통신 등 다양한 분야에서 활용되고 있다.

GNSS는 위성과 수신기 사이의 신호 전파 경로를 따라 존재하는 다양한 오차 요소들로 인해 측위 성능이 열화된다. 대표적으로 위성 궤도 및 시계 오차, 전리층 오차, 대류층 오차, 다중경로 오차, 수신기 시계 오차가 있다. 이 중 전리층 오차는 모든 오차 중 그 크기가 가장 크고 예측하기가 힘들다.

전리층은 고도 50 - 2000 km에 분포하는 고층대기로서 태양으로부터 입사된 자외선에 의해서 이온화된 입자로 구성된다. 따라서 이 지역의 자유전자와 이온은 GNSS 신호를 굴절시켜 신호의 지연효과를 발생시키며, 그 정도가 가장 극심할 때는 지연량이 30 m 이상에 달하기도 한다 [1]. 전리층 내 전자밀도는 태양 활동, 지자기 활동, 위도, 경도, 계절, 지역 시 등 다양한 요인에 의해 변화한다.

정밀한 GNSS 측위 정확도를 확보하기 위해서는 전리층 오차는 반드시 제거되어야 한다. 전리층 오차의 정보는 서로 다른 두 주파수의 GNSS 측정치를 선형 조합하여 ionosphere-free 생성하고, 사용 함으로써 그 효과를 대부분 제거할 수 있다 [2], [3]. 따라서 이중주파수 수신기를 사용할 경우 전리층에 의한 영향을 추정하여 보정하는 것이 가능하다. 그러나 단일주파수 수신기 대비 고가의 이중주파수 수신기는 가격적인 측면에서 효용성이 발생하지 않는다. 이러한 이유로 고정밀의 측위해를 요구하지 않는 일반 응용시스템들에서는 이중주파수 수신기 대신 단일주파수 수신기를 주로 사용 한다.

단일주파수 수신기용 전리층 보정 모델로는 GPS (global positioning system)의 Klobuchar 모델이 가장 대표적이다 [4]. Klobuchar 모델은 GPS 항법메시지에 포함된 8개의 보정계수로 제공되며, 중위도 지역에서는 모델을 적용할 경우 큰 계산량 필요없이 50 - 60 %의 전리층 오차를 제거할 수 있는 것으로 알려져 있다 [5].

위와 같은 모델을 통해 단일주파수 수신기 사용자의 전리층 오차를 보정한다 하더라도, 제거되지 못한 오차는 잔류하게 되어 사용자 위치성능에 악영향을 끼칠 수 있다. 따라서 다양한 응용시스템에서의 전리층 잔류 오차의 영향 분석( 위치오차 분석, 서비스 영역 분석 등 service volume simulation 등)과 전리층 관련 알고리즘 설계에 대한 검증을 위해서는 주어진 전리층 환경에서의 전리층 잔류 오차의 모델 개발이 반드시 선행되어야 한다. 본 논문에서는 Klobuchar 모델 및 GNSS 관측데이터를 활용하여 정상상태의 한반도 전리층 환경에서의 전리층 잔류 오차에 대한 통계적 모델을 도출하였다. 정상상태의 전리층 상태를 구별하기 위한 날짜 선정을 수행하고, 해당 날짜의 GNSS 관측데이터를 처리하여 전리층

정보를 산출하였다. 획득된 전리층 정보에 Klobuchar 모델을 적용하여 전리층 잔류 오차를 계산하고, 이를 활용하여 지역 시와 위성 양각에 따른 전리층 잔류 오차의 보수적인 표준편차 모델을 개발하였다.

## II. 데이터 및 전리층 지연 추정

### 2-1 GNSS 데이터

전리층 잔류 오차 모델 개발을 위해 국내 GNSS 상시관측소에서 획득한 GPS L1 (1575.42 MHz) 및 L2 (1227.60 MHz) 이중주파수 코드 및 반송파 측정치를 활용하였다. 데이터 획득 시점인 2004년의 국내 GNSS 관측소는 총 70개로 기관별로 천문연구원 (KASI; Korea Astronomy and Space Science Institute) 10개, 국토지리정보원 (NGII; National Geographic Information Institute) 43개, 위성항법사무소 (NDGPS; National Wide Differential Global Positioning System) 17개이다 (표 1 참조). 각 운용 기관별 상시관측소의 위치는 그림 1을 통해 확인할 수 있다.

표 1. 운용 기관별 상시관측소 개수 (2004년 기준)

Table 1. Agencies that operate Korean reference stations (as of 2004)

Korean GNSS reference station network	# of stations
KASI (Korea Astronomy and Space Science Institute)	10
NGII (National Geographic Information Institute)	43
NDGPS (National Wide Differential Global Positioning System)	17

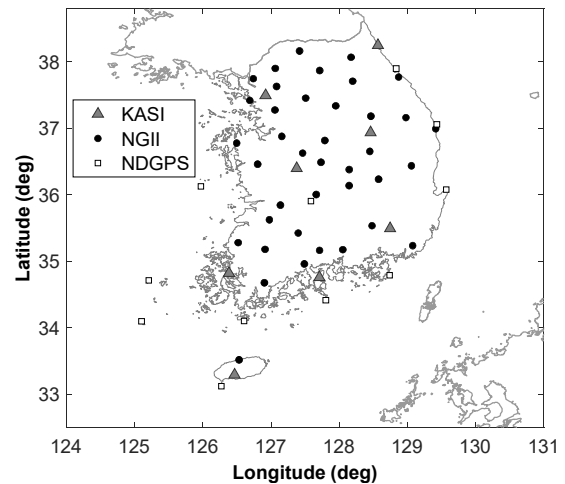


그림 1. 국내 GNSS 상시관측소 운용 현황 (2004년 기준)

Fig. 1. Locations of the Korean GNSS reference stations (as of 2004)

### 2-2 TEC 추정

GNSS 신호는 분산 매질 (dispersive medium)인 전리층에서 굴절되면서 코드 측정치에서는 군 지연 (group delay)을 반송파 측정치에는 위상 앞섬 (phase advance) 현상을 일으킨다 [2]. 이때 굴절되는 양은 전리층 내 총 전자량 (TEC; total electron content)에 비례하여 발생한다. 이때, 총 전자량이란 위성과 사용자 사이의 신호 전파 경로를 따라 측정되는 전자의 수로 정의되며, 1 TECU (TEC unit)는  $10^{16}$  electrons/m<sup>2</sup> (L1 신호 기준 약 16 cm)를 의미한다. 이러한 성질을 활용할 경우 GNSS 측정치로부터 주어진 신호 경로에서의 전리층 내 총 전자량을 추정할 수 있다.

식 1, 2와 같이 L1 신호에서의 코드 및 반송파 TEC 측정값은 L1/L2 코드 및 반송파 측정치를 차분하여 계산할 수 있다.

$$TEC_{\rho\_meas} = \frac{\rho_{L2} - \rho_{L1}}{K\gamma} = TEC + \frac{c(IFB + \tau_{gd})}{K\gamma} + \epsilon_{\rho} \quad (1)$$

$$TEC_{\phi\_meas} = \frac{\phi_{L2} - \phi_{L1}}{K\gamma} = TEC + \frac{c(IFB + \tau_{gd})}{K\gamma} + \frac{\lambda_{L1}N_{L1} - \lambda_{L2}N_{L2}}{K\gamma} + \epsilon_{\phi} \quad (2)$$

- 여기서  $TEC_{\rho\_meas}$  : 코드 TEC 측정치  
 $TEC_{\phi\_meas}$  : 반송파 TEC 측정치  
 $\rho_{L1}, \rho_{L2}$  : L1, L2 코드 측정치  
 $\phi_{L1}, \phi_{L2}$  : L1, L2 반송파 측정치  
 $TEC$  : 위성 신호 경로에서의 총 전자수  
 $c$  : 진공상태에서의 빛의 속도  
 $K$  : L1 TEC 변환 상수 (=  $40.3m^3s^{-2}$ )  
 $\gamma$  : L1, L2 주파수 제곱의 비  
 $IFB, \tau_{gd}$  : 수신기 및 위성 하드웨어 바이어스  
 $\lambda_{L1}, \lambda_{L2}$  : L1, L2 반송파 파장  
 $N_{L1}, N_{L2}$  : L1, L2 반송파 위상 미지정수  
 $\epsilon_{\rho}, \epsilon_{\phi}$  : 코드, 반송파 잡음

코드 TEC 측정치  $TEC_{\rho\_meas}$  는 반송파 TEC 측정치  $TEC_{\phi\_meas}$  보다 잡음이 많지만 ( $\epsilon_{\rho} \gg \epsilon_{\phi}$ ), 모호정수가 존재하지 않는다. 반면, 반송파 측정치는 코드 측정치보다 작은 잡음 수준을 가지고 있어 정밀한 TEC 추정에 사용될 수 있지만, L1 및 L2 주파수의 모호정수  $N_{L1}, N_{L2}$  를 반드시 제거하여야 한다. 또한 L1 및 L2 신호 생성 과정에서 내부회로의 신호지연 차이로 인해 주파수간 바이어스 (IFB; inter-frequency bias)가 발생한다. 주파수간 바이어스는 위성 ( $\tau_{gd}$ )과 수신기 (IFB) 모두에서 발생하며, 정밀 TEC 추정을 위해서 반드시 제거되어야 한다.

식 (2)에서의 모호정수 항인  $\frac{\lambda_{L1}N_{L1} - \lambda_{L2}N_{L2}}{K\gamma}$  은 레벨링 (leveling) 과정을 통해 제거된다. 본 과정에서는 반송파 TEC

측정치  $TEC_{\phi\_meas}$  를 코드 TEC 측정치  $TEC_{\rho\_meas}$  에 접합하여 레벨링 파라미터인  $Level_{\phi}$  를 계산하고, 이를 다시 반송파 TEC 측정치인  $TEC_{\phi\_meas}$  에 적용함으로써 모호정수 항을 제거하게 된다. 위성의 하드웨어 바이어스인  $\tau_{gd}$  는 IGS (International GNSS Service)에서 제공하는 값을 사용한다 [6]. 수신기 바이어스인 IFB는 참고문헌 [7]에 기술된 것과 동일하게 1일 동안 추적된 모든 위성의 수직 TEC 값인 VTEC (vertical TEC) 정보의 누적 표준편차를 최소화하는 값으로 정해지게 된다. 이렇게 모호정수 항, 위성 및 수신기 바이어스를 제거하게 되면 식 3, 4와 같이 코드 TEC 추정치  $TEC_{\rho\_est}$  와 반송파 TEC 추정치  $TEC_{\phi\_est}$  를 획득할 수 있다.

$$TEC_{\rho\_est} = TEC_{\rho\_meas} - \frac{c(IFB + \tau_{gd})}{K\gamma} \quad (3)$$

$$TEC_{\phi\_est} = TEC_{\phi\_meas} + Level_{\phi} - \frac{c(IFB + \tau_{gd})}{K\gamma} \quad (4)$$

본 논문에서는 잡음이 많은 코드 TEC 추정치  $TEC_{\rho\_est}$  대비 정밀한 반송파 TEC 추정치  $TEC_{\phi\_est}$  을 전리층 잔류 오차 모델 개발에 활용한다.

### 2-3 분석날짜 선정

표 2. 美 CAT I LAAS 정상상태 전리층 통계치 산출에 사용된 분석일

Table 2. Data set used for assessing nominal ionospheric spatial decorrelation for CAT I LAAS

Date (yy/mm/dd)	G-class	Kp	Dst (nT)	Note
00/07/02	Quiet	1.7	2	-
02/09/11	Moderate	5.0	-78	-
04/07/26	Strong	7.3	-94	-
04/07/27	Severe	8.7	-197	Ionospheric Disturbances
04/11/09	Severe	8.7	-223	-
04/11/10	Severe	8.7	-287	Ionospheric Disturbances

본 논문의 전리층 잔류 오차 모델은 전리층 폭풍 등 전리층 이상현상을 제외한 다양한 활동성의 전리층 상태를 반영하는 것을 목표로 한다. 이러한 논리는 美 CAT I (category I) LAAS (local-area augmentation system)의 정상상태 전리층 통계치 산출에도 적용된 바 있다 [8]. 해당 모델은 Kp (planetary K), Dst

(disturbance, storm time), *G-class* (geomagnetic storm class) 등의 정보를 이용하여 잠재적인 전리층 활동성을 고려 (전리층 폭풍 발생 날 제외)하고, 이를 통해 태양 활동 23주기 극대기 기간 내 분석 날짜를 선별하였다. *Kp*는 3시간에 한 번씩 산출되는 지수이며, 중위도 지역에 위치한 관측소들에서 측정된 지자기 활동 값을 평균하여 사용자에게 제공한다 [9]. *Kp* 지수는 0 (활동성 없음)과 9 (극심한 활동성)의 범위에서 1/3의 단위로 값으로 산출된다. *Dst*는 전 세계적으로 지자기 활동을 측정하여 산출된 지수로서 [10], 음 (-)의 방향으로 큰 값일수록 더 극심한 지자기 활동을 나타낸다. SWPC (space weather prediction center)에서는 지자기 활동 정도를 나타내는 *G-class*를 제공하고 있으며 [11], 그 정도에 따라 minor, moderate, strong, severe, extreme으로 구분하고 있다. 표 2는美 CAT I LAAS 정상상태 전리층 통계치 산출에 사용된 6개의 분석일과 해당 날짜에서의 *Kp*, *Dst*, *G-class* 값을 나타내고 있다. *Kp*, *Dst*, *G-class* 모두 넓은 값의 범위에서 선택함으로써 다양한 활동성을 보이는 전리층 상태를 고려한 것을 알 수 있다.

본 논문에도 다양한 전리층 상태를 모델에 반영한다는 논리로美 CAT I LAAS의 정상상태 전리층 통계치 산출일을 분석 날짜로 고려하였다. 태양 활동 24주기 (2010 - 2019년)보다 활동성이 더 높은 것으로 알려진 23주기 (1996 - 2008년)의 데이터만을 모델의 보수성 및 데이터 처리의 효율성 확보 측면의 이유로 분석에 고려하였다.

통상적으로 태양 활동 24주기 (2010 - 2019년)는 23주기보다 태양의 활동성이 낮은 것으로 알려져, 태양활동 23주기만을 분석에 고려하는 것이 모델의 보수성, 데이터 처리의 효율성 측면에서 더 효과적이다. 지자기 활동 및 전리층 거동은 지역에 따라 그 양상이 다르게 나타나므로 해당 날짜에 대한 한반도 지역의 전리층 이상현상 발생하였는지에 대한 교차 검증이 필요하다. 본 논문에서는 전리층 이상현상에 의한 전자밀도 교란 발생 유무를 판단하기 위해 각 분석 날짜에서의 DAEJ (36.40°N, 127.37°E) 관측소의 측정치를 활용해 산출된 ROTI (rate-of-TEC index) 값 조사하였다. ROTI 지수는 전리층 내 전자밀도의 불균질 현상 발생 여부를 조사하는데 널리 활용되는 지수이다 [12]. ROTI 값을 산출하기 위해서는 식 5와 같이 30초 독의 연속된 TEC값을 차분하여 ROT (rate-of-TEC)을 먼저 계산해야 한다.

$$ROT = \frac{TEC_{\phi\_est}(t_k) - TEC_{\phi\_est}(t_{k-1})}{t_k - t_{k-1}} \quad (5)$$

여기서 *ROT* : 두 개의 연속된 시간의 TEC 차분  
*t<sub>k</sub>* : 현재 시각  
*t<sub>k-1</sub>* : 이전 시각 (즉, 30초 이전)

ROT 계산한 이후, 식 6과 같이 특정 시간 구간 동안 ROT의

표준편차를 취함으로써 ROTI를 산출 할 수 있다.

$$ROTI = \sqrt{\langle ROT^2 \rangle - \langle ROT \rangle^2} \quad (6)$$

본 논문에서는 5분의 시간창 (time window)를 적용하였다. 해당 시간창은 약 20 km 이상의 공간 규모 (spatial scale)를 가진 전리층 불균질 현상을 규명하는 데 널리 활용되고 있다. 또한 다중경로 오차의 효과를 최소화하기 위해 30° 이상의 위성 양각을 가진 TEC 값만을 ROTI 산출에 활용하였다. 선행연구에서는 0.5 TEC/min의 ROTI 값을 수 십 km 공간 규모의 전리층 불균질이 존재한다고 판단하기 위한 임계값 (threshold)으로 사용하였으며 [13], 본 논문에서도 동일한 값을 적용하여 전리층 교란 발생 유무를 판단하였다.

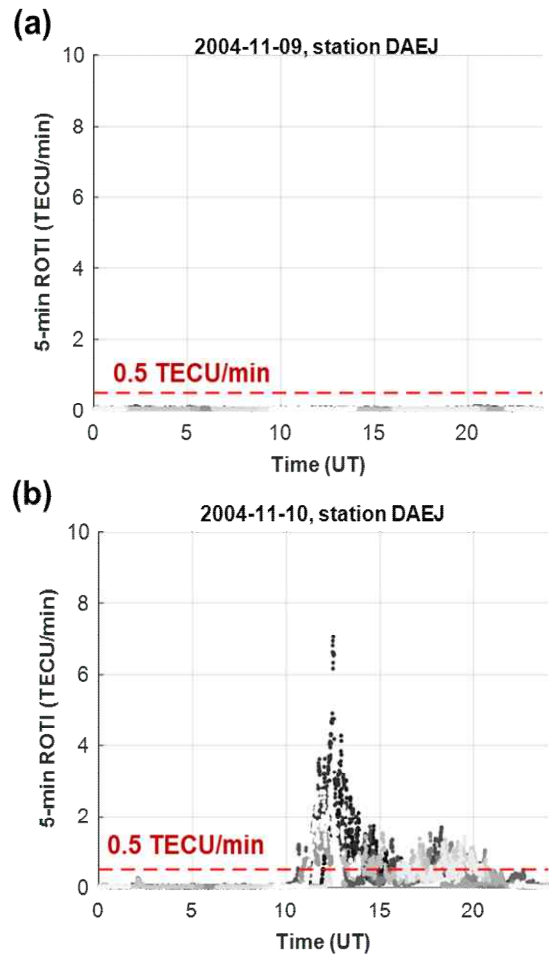


그림 2. (a) 2004년 11월 09일과 (b) 2004년 11월 10일의 DAEJ (36.40°N, 127.37°E) 관측소의 시간에 따른 ROTI  
**Fig. 2.** ROTIs observed from DAEJ (36.40°N, 127.37°E) viewing all GPS satellites on (a) 9 November 2004 and (b) 10 November 2004

그림 2는 2004년 11월 09일과 2004년 11월 10일의 DAEJ (36.40°N, 127.37°E) 관측소의 ROTI 값을 나타내고 있다. x축은 시간을, y축은 5분 시간창을 적용한 ROTI 값을 나타낸다. 각기

다른 색의 그래프는 각기 다른 위성의 ROTI 값을 나타낸다. 2004년 11월 09일의 경우 모든 위성의 ROTI 값이 임계값인 0.5 TECU/min 미만으로 보임으로써 전리층 불균질 현상이 발생하지 않음을 알 수 있다. 그러나 2004년 11월 10일의 경우 약 10 UT 이후부터 ROTI 값이 증가하기 시작하여 약 12.5 UT에는 최대 7.051 TECU/min을 나타내며 전리층 불균질 현상이 발생하였음을 알 수 있다. 실제로 이 날에는 한반도 상공으로 국지성 전리층 이상현상인 MSTID (medium-scale traveling ionospheric disturbances)가 발생하였으며 [14], 이로 인해 138.5 mm/km의 전리층 공간기울기가 관측되기도 하였다 [15]. 정상상태의 전리층에서는 약 4 mm/km의 기울기가 발생한다고 알려져 있다 [8]. 이와 같이 ROTI 분석 결과를 통해 표 2와 같이 국지성 전리층 교란이 발생한 2004년 7월 27일 및 2004년 11월 10일을 제외한 나머지 날들을 이용하여 전리층 잔류 모델 개발을 수행하였다.

### III. 전리층 잔류 오차 모델링

#### 3-1 Klobuchar 전리층 오차 모델

Klobuchar 모델을 사용하여, Klobuchar 전리층 오차 모델은 350 km의 고도에 얇은 구각의 단일층에 전리층 내 모든 전자들이 응집되어있다고 가정하고, GPS 위성과 수신기 사이에 신호 경로에 따른 전리층 지연값을 추정하여 보상한다. 보상의 정도는 지역에 따라 다르지만 50 - 60 %까지 제거할 수 있는 것으로 알려져 있다. 총 전자수는 지역 시 기준으로 반정현과의 형태로 모델링 되는데 14시에 가장 높으며, 22시에서 06시 사이에 일정한 값을 유지한다고 가정한다 [5].

Klobuchar 모델에 필요한 입력 변수는 사용자 및 위성의 3차원 위치, 시각, 모델의 계수인  $\alpha_n$  및  $\beta_n$  ( $n = 1, 2, 3, 4$ )이다. 이를 이용하여 수직 방향의 전리층 지연값과 모델의 주기를 계산하고 주어진 위성 양각에서의 전리층 지연값을 산출하여 제거하게 된다. 모델의 계수  $\alpha_n, \beta_n$ 는 GPS 제어국에서 결정되며 생성일과 태양의 Flux 값을 사용하여 추정한 뒤, 이를 항법 메시지로 인코딩되어 위성 신호를 통해 사용자에게 제공된다.

#### 3-2 전리층 잔류 오차 계산

전리층 잔류 오차 계산을 위해 먼저 Klobuchar 전리층 오차 모델을 통해 주어진 사용자 및 위성의 3차원 위치, 시각, 모델 계수를 입력하여 값을 수직 TEC 값인  $VTEC_{klob}$  산출한 뒤, 식 7, 8과 같이 mapping function을 통해 주어진 위성 양각에서의 STEC 값인  $TEC_{klob}$  값을 산출하였다. 이때 Klobuchar 모델 계수  $\alpha_n, \beta_n$ 는 분석 날짜의 GPS 항법메시지를 디코딩하여 획득하였다. 전리층 잔류 오차 값인  $TEC_{resid}$  값은 식 9와 같이

이중주파수 반송파 TEC 추정치  $TEC_{\phi\_est}$ 에서 Klobuchar 모델 기반 TEC 추정치  $TEC_{klob}$ 를 차분함으로써 획득할 수 있다.

$$TEC_{klob} = m(el) \cdot VTEC_{klob} \tag{7}$$

$$m(el) = 1 + 16(0.53 - el/\pi)^3 \tag{8}$$

$$TEC_{resid} = TEC_{\phi\_est} - TEC_{klob} \tag{9}$$

where  $TEC_{klob}$  : Klobuchar 모델 기반 STEC 추정치  
 $VTEC_{klob}$  : Klobuchar 모델 기반 VTEC 추정치  
 $TEC_{resid}$  : 잔류 TEC 값  
 $m(el)$  : mapping function  
 $el$  : 위성 양각

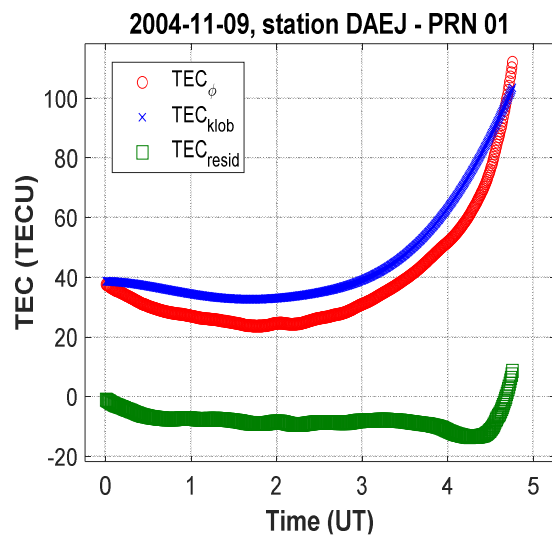


그림 3. 2004년 11월 09일의 PRN 01을 추적하는 DAEJ (36.40°N, 127.37°E) 관측소의 시간에 따른 반송파 TEC 추정치  $TEC_{\phi\_est}$ , Klobuchar 모델 기반 추정치  $TEC_{klob}$ , 전리층 잔류 오차  $TEC_{resid}$

Fig. 3. Dual-frequency estimates of TECs  $TEC_{\phi\_est}$  observed DAEJ viewing PRN 01, Klobuchar model-derived TECs  $TEC_{klob}$ , and their residual TECs  $TEC_{resid}$

그림 3는 2004년 11월 09일 PRN 01을 추적하는 DAEJ (36.40°N, 127.37°E) 관측소의 TEC 값을 예시로써 보여주고 있다. 이중주파수 반송파 TEC 추정치  $TEC_{\phi\_est}$ , Klobuchar 모델 기반 TEC 추정치  $TEC_{klob}$ , 잔류 TEC 값  $TEC_{resid}$ 는 붉은색의 'O' 기호, 푸른색의 'X' 기호, 녹색의 '□' 기호로 각각 나타내었다. 보는 바와 같이 시간에 따라  $TEC_{\phi\_est}$ 을 위치, 시각, 위성 양각을 바탕으로 계산된  $TEC_{klob}$ 를 차분함으로써  $TEC_{resid}$  값을 계산할 수 있다. 또한, 지역 시 기준 (세계표준 시 + 9시)에 한 낮에 가까워 질수록 TEC 값이 상승하고, 이에 따라 잔류 오차의 크기가 점점 커지는 경향성도 그림 3를 통해 확인할 수 있다.

### 3-3 전리층 잔류 오차의 표준편차 모델링

그림 4는 전리층 잔류 오차 통계치 모델의 개발 절차를 나타낸 다이어그램이다. 먼저 모든 선정된 날짜의 가용한 모든 관측소 및 위성들에서 획득된 GNSS 측정치들로부터 전리층 잔류 오차  $TEC_{resid}$ 를 계산하고, 지역 시에 따라 데이터를 분류한다. 위성 양각에 따른 샘플의 평균  $\mu_{TEC_{resid}}$  및 표준편차  $\sigma_{TEC_{resid}}$ 를 계산하고, 비(非) 정규분포적 오차를 보정할 수 있는 비(非) 정규분포의 오차 보정(NGEC; non-Gaussian error corrected) 표준편차값인  $\sigma_{TEC_{resid\_NGEC}}$ 를 계산한다. 다음, 감쇠 지수 모델 접합을 이용한 해석적인 표준편차 유계 모델을 개발한다. 이와 같은 일련의 과정을 모든 지역 시 구간의 전리층 잔류 오차 데이터에 대해 수행하게 된다.

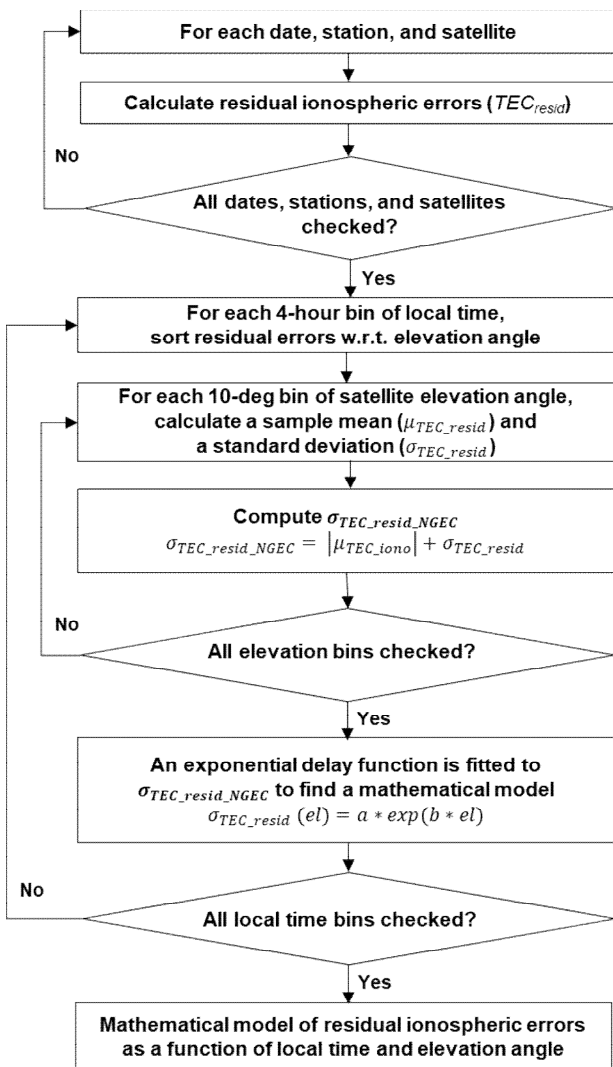


그림 4. 전리층 잔류 오차의 표준편차 모델링 절차  
 Fig. 4. Procedure of developing an analytical sigma model of residual ionospheric errors

우선 선정된 특정 분석 날짜에 대한 모든 GNSS 관측소 및 위성에 대한 전리층 잔류 오차 값인  $TEC_{resid}$ 를 계산한다. 이와 같은 과정을 모든 분석 날짜에 대해서 수행한다. 계산된 전리층 잔류 오차  $TEC_{resid}$ 은 여러 조건에 따라 다른 확률적 거동을 나타내므로, 통계치 산출을 위해서는 데이터 분류 작업이 반드시 선행되어야 한다. 그림 5는 모든 분석 날짜의 지역 시간에 따른 전리층 잔류 오차  $TEC_{resid}$ 의 절대값을 나타낸다. 보는 바와 같이 지역 시간에 따라 일정한 경향성을 가지고 변화하며, 15시 기준으로 그 값이 가장 극심해 짐을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 지역 시에 따라 전리층 잔류 오차 값이 변화하는 거동을 반영하기 위해 기준 4시간 구간으로 데이터를 먼저 분류하였다.

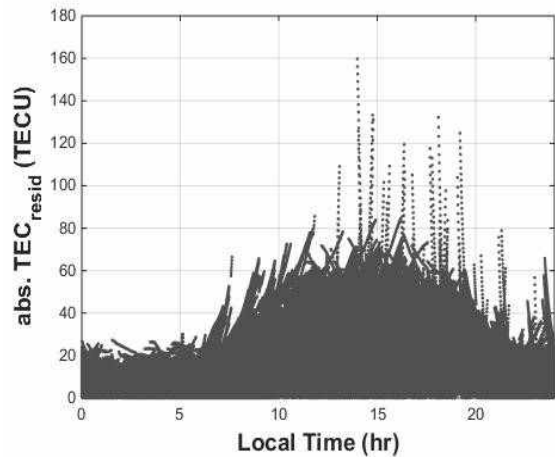


그림 5. 모든 분석날짜의 시간에 따른 전리층 잔류 오차  $TEC_{resid}$ 의 절대값  
 Fig. 5. Absolute values of residual ionospheric errors  $TEC_{resid}$  for all dates analyzed as a function of local time

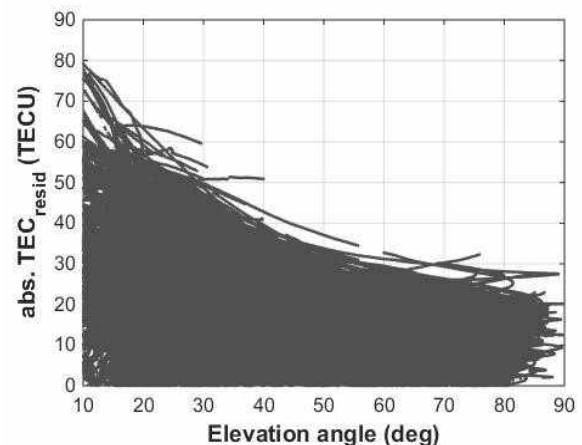


그림 6. 지역 시 08-12시 데이터 구간의 위성 양각에 따른 전리층 잔류 오차  $TEC_{resid}$ 의 절대값  
 Fig. 6. Absolute values of residual ionospheric errors  $TEC_{resid}$  for all dates analyzed as a function of satellite elevation angle

다음 데이터 분류를 위한 고려 요소는 위성의 양각이다. 그림 6은 위성 양각에 따른 전리층 잔류 오차  $TEC_{resid}$ 의 절대값(지역 시 기준 08 - 12시 구간에서 획득된 데이터)을 나타낸다. 참고로 본 논문에서는 다중경로 오차의 영향을 감소시키기 위해  $10^\circ$  미만의 양각을 가진 위성의 측정치는 통계치 산출에 이용하지 않았다. 보는 바와 같이 위성의 양각이 작을수록 전리층 잔류 오차의 절대값이 상승하는 경향을 알 수 있다. 이러한 경향의 이유는 위성의 신호가 저양각에 위치할수록 고양각 대비 전리층 내 이동거리가 증가하고, 결과적으로 전리층 지연 오차 값 및 그 변화량이 증가하기 때문이다. 위성의 양각에 따른 전리층 잔류 오차의 거동을 반영하기 위해 지역 시 기준에 따라 분류를 마친 데이터들에 대해서 위성 양각  $10^\circ$  구간에 따라 데이터를 분류하고 데이터 처리 작업을 수행한다.

주어진 위성 양각의 데이터 구간마다 전리층 잔류 오차의 통계치인 평균 ( $\mu_{TEC_{resid}}$ ) 및 표준편차 ( $\sigma_{TEC_{resid}}$ )의 산출 작업을 진행한다. 전리층 잔류 오차의 영향성을 분석하기 위한 시뮬레이션에서는 선형 조합 등의 장점을 이유로 영평균으로 하는 정규 분포를 가정하는 것이 용이하다. 그러나 실제 전리층 잔류 오차는 영평균이 아니며, 정규분포의 확실적인 거동도 나타내지 않는다. 따라서 본 논문에서는 평균의 절대값과 표준편차를 더하여, 잔류 오차 값의 비(非) 정규분포적 오차를 보정할 수 있는  $\sigma_{TEC_{resid\_NGEC}}$  값을 식 10과 같이 구하게 된다.

$$\sigma_{TEC_{resid\_NGEC}} = |\mu_{TEC_{resid}}| + \sigma_{TEC_{resid}} \quad (10)$$

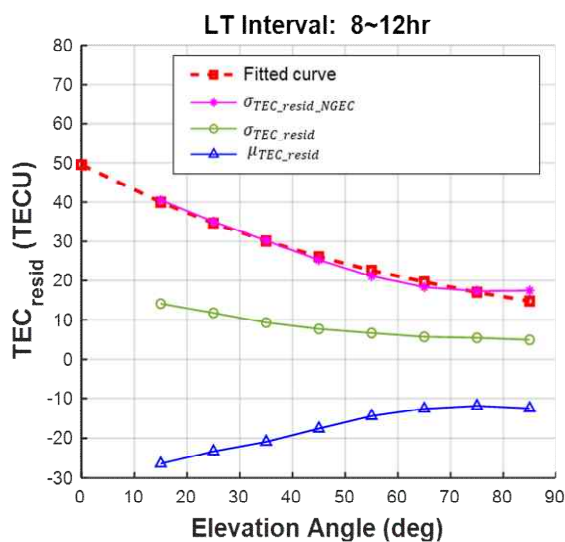


그림 7. 지역 시 기준 8 - 12시 구간에 대한 위성 양각에 따른 전리층 잔류 오차의 평균  $\mu_{TEC_{resid}}$ , 표준편차  $\sigma_{TEC_{resid}}$ , 비(非) 정규분포 오차 보정 표준편차값  $\sigma_{TEC_{resid\_NGEC}}$ , 접합 곡선  $\sigma_{TEC_{resid\_model}}$

Fig. 7. Mean  $\mu_{TEC_{resid}}$ , standard deviation  $\sigma_{TEC_{resid}}$ ,  $\sigma_{TEC_{resid\_NGEC}}$ , and fitted curve for a time interval of 8 - 12 hr as a function of elevation angle

그림 7은 지역 시 기준 8 - 12시 구간에 대한 위성 양각에 따른 전리층 오차의 평균 ( $\mu_{TEC_{resid}}$ ; 푸른색의 “△”), 표준편차 ( $\sigma_{TEC_{resid}}$ ; 녹색의 “○”), 비(非) 정규분포 오차가 보정된 표준편차( $\sigma_{TEC_{resid\_NGEC}}$ ; 마젠타색의 “◇”)의 예시를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 실제 전리층 잔류 오차의 거동이 “0” 평균이 아니며 (Klobuchar 모델이 과 추정하는 경향이 존재), 저양각일수록 평균의 절대값과 표준편차가 더 큰 것을 알 수 있다. 따라서 이러한 비(非) 정규분포적 오차를 보정하기 위해, 식 10과 같이  $\sigma_{TEC_{resid\_NGEC}}$  라는 보수적인 표준편차 값을 정의하게 된다.

다음, 각 위성 양각 구간별로  $\sigma_{TEC_{resid\_NGEC}}$  값을 산출한 뒤, 식 11과 같은 감쇠 지수 모델 접합을 통해 표준편차의 해석적 모델을 도출하게 된다.

$$\sigma_{TEC_{resid\_model}} = a * \exp(b * el) \quad (11)$$

여기서  $a, b$  : 감쇠 지수 모델 계수

지역 시 기준 8-12시 구간에 대한 양각에 따른 표준편차 유계 모델값  $\sigma_{TEC_{resid\_model}}$ 의 예시결과는 그림 7에서 볼 수 있다 (붉은색의 “□”로 표시). 여기서 II 장에서 언급한 것과 마찬가지로 본 논문에서는  $10^\circ$ 의 막음각 (mask angle)을 적용함에 따라  $0 - 10^\circ$  구간에서는 전리층 잔류 오차의 평균 및 표준편차 값들이 부재인 것을 알 수 있다. 따라서 모델 접합 통해 데이터가 부재인 양각 구간 ( $0 - 10^\circ$ )까지 값을 모델을 확장하였다. 본 지역 시 구간에서 접합을 통해 산출된 감쇠 지수 모델 계수  $a, b$ 는 각각 49.4949 및  $-0.0142$ 로 나타났다. 이와 같은 일련의 과정을 모든 시간 구간에 대해 적용하여, 일반화된 해석적 모델을 도출한다.

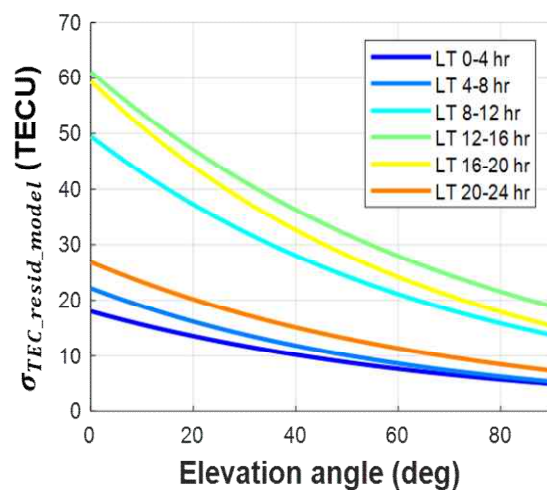


그림 8. 지역 시 및 위성 양각에 따른 전리층 잔류 오차의 표준편차 유계 모델 ( $\sigma_{TEC_{resid\_model}}$ )

Fig. 8. Sigma model fitted using an exponential decay function for all time intervals as a function of elevation angle

#### IV. 전리층 잔류 오차 모델링 결과

4개의 분석날짜의 GNSS 데이터 처리를 통해 전리층 잔류 오차 값을 계산하고, 지역 시 구간 및 위성 양각에 따른 전리층 잔류 오차의 표준편차 유계 모델을 그림 8에 도시하였다. 이에 해당하는 지수의 계수는 표 3에 나타내었다. 일반적으로 전리층의 생성은 지구에 도달하는 태양의 복사 에너지의 양에 따라 결정됨에 따라 밤과 낮의 TEC 차이가 발생한다. 이러한 경향성과 동일하게 본 논문의 결과에서도 전리층 잔류 오차의 변화량은 태양의 복사 에너지양이 가장 많은 낮 시간 구간인 12 - 16시에서 가장 극심하며, 복사 에너지의 양이 미미한 시간 구간인 0 - 4시에서 가장 낮은 것으로 확인되었다.

**표 3.** 전리층 잔류 오차의 표준편차 유계 모델의 계수  
**Table 3.** Coefficients of sigma models for residual ionospheric errors

Local Time (hour)	Coefficient <i>a</i>	Coefficient <i>b</i>
00 - 04	18.0207	-0.0142
04 - 08	22.1467	-0.0157
08 - 12	49.4949	-0.0142
12 - 16	61.0726	-0.0130
16 - 20	59.4416	-0.0150
20 - 24	26.8809	-0.0144

#### V. 결 론

본 논문에서는 국내 GNSS 측정치를 활용해 Klobuchar 모델을 적용한 이후의 잔류 오차에 대한 통계치의 모델링을 수행하였고, 그 결과로서 감쇠 지수 형태의 표준편차 유계 모델을 제시하였다.

다양한 전리층 활동 상태를 포함하기 위한 美 CAT I LAAS 전리층 통계치 산출일 중 ROTI 지수를 활용하여 전리층 활동이 비정상적인 날씨는 제외하고 GNSS 분석 데이터를 구성하였다. GNSS 데이터 처리를 통해 전리층 잔류 오차를 계산한 결과 지역 시 (혹은 태양 복사 에너지의 양) 및 위성 양각에 따라 잔류 오차가 변화하는 것으로 확인되었으며, 특히 낮 시간의 저양각에서 잔류 오차의 크기가 큰 것으로 나타났다.

이러한 경향성을 바탕으로 지역 시 및 위성 양각에 따라 전리층 잔류 오차의 평균 및 표준편차를 산출하고, 전리층 잔류 오차의 확률적 거동을 보수적으로 표현할 수 있는 표준편차의 해석적 모델을 감쇠 지수 집합을 통해 도출하였다.

지역 시 및 위성 양각을 고려하여 전리층 상황을 보다

현실적으로 반영한 전리층 잔류 오차의 표준편차 유계 모델은 보다 정확한 시뮬레이션 기반의 항법오차분석 및 서비스 영역 분석과 전리층 관련 알고리즘의 성능 검증이 가능할 것으로 보인다.

#### Acknowledgments

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국항공우주연구원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 1711135077)

#### References

- [1] S. Datta-Barua, J. Lee, S. Pullen, M. Luo, A. Ene, D. Qiu, G. Zhang, and P. Enge, "Ionospheric threat parameterization for local area global-positioning-system-based aircraft landing system," *Journal of Aircraft*, Vol. 47, No. 4, pp. 1141-1151, 2010.
- [2] P. Misra and P. Enge, *Global Positioning System: signals, measurements, and performance*, Lincoln, MA: Ganga-Jamuna Press, 2006.
- [3] S. Jung and J. Lee, "Long term ionospheric anomaly monitoring for ground based augmentation systems," *Radio Science*, Vol. 47, RS4006, 2012.
- [4] J. A. Klobuchar, "Ionospheric time-Delay algorithm for single-frequency GPS users," *IEEE Transactions Aerospace and Electronic Systems*, Vol. AES-23, No. 3, pp. 325-331, 1987.
- [5] 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, 1987..
- [6] M. Hernández-Pajares, J. Juan, J. Sanz, R. Orus, A. Garcia-Rigo, J. Feltens, A. Komjathy, S. Schaer and A. Krankowski, "The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998," *Journal of Geodesy*, Vol. 83, No. 3-4, pp. 263-275, 2009.
- [7] G. Ma and T. Maruyama, "Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan," *Annales Geophysicae*, Vol. 21, No. 10, pp. 2083-2093, 2003.
- [8] J. Lee, S. Pullen, S. Datta-Barua, and P. Enge, "Assessment of ionosphere spatial decorrelation for GPS-based aircraft landing systems," *Journal of Aircraft*, Vol. 44, No. 5, pp. 1662-1669, 2006.
- [9] M. Menvielle and A. Berthelier, "The K-Derived Planetary Indices: Description and Availability," *Reviews of*



*Geophysics*, Vol. 29, No. 3, pp. 415-432, 1991.

- [10] M. Sugiura and T. Kamei, "Equatorial Dst Index 1957-1986," *International Association of Geomagnetism and Aeronomy*, Vol. 40, pp. 7-14, 1991.
- [11] B. B. Poppe, "New scales help public, technicians understand space weather," *Transactions of the American Geophysical Union*, Vol. 81, No. 29, pp. 322, 328, 2000.
- [12] X. Pi, A. Mannucci, U. Lindqwister, and C. Ho, "Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network," *Geophysical Research Letters*, Vol. 24, No. 18, pp. 2283-2286, 1997.
- [13] G. Ma and T. Maruyama, "A super bubble detected by dense GPS network at East Asian longitude," *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, L21103, 2006.
- [14] M. Yoon and J. Lee, "Medium-scale traveling ionospheric disturbances in the Korean region on 10 November 2004: potential impact on GPS-based navigation systems," *Space Weather*, Vol. 12, pp. 173-186, 2014.
- [15] M. Kim, Y. Choi, H. Jun, and J. Lee, "GBAS ionospheric threat model assessment for category I operation in the Korean region," *GPS solutions*, Vol. 19, No. 3, pp. 443-456, 2014



**윤문석 (Moonseok Yoon)**

2014년 4월: 한국과학기술원 항공우주공학 (공학석사)  
2018년 8월: 한국과학기술원 항공우주공학 (공학박사)  
2020년 8월~현재: 한국항공우주연구원 선임연구원  
※ 관심분야: 위성항법보강시스템, 무결성, 전리층 상태감시



**안종선 (Jongsun Ahn)**

2009년 2월: 건국대학교 항공우주정보시스템공학 (공학석사)  
2015년 8월: 건국대학교 항공우주정보시스템공학 (공학박사)  
2016년 12월~현재: 한국항공우주연구원 선임연구원  
※ 관심분야: 위성항법보강시스템, 정밀항법, 무결성



**주정민 (Jung-Min Joo)**

2004년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학 (공학석사)  
2015년: 한국과학기술원 항공우주공학 (공학박사)  
2004년~현재: 한국항공우주연구원 책임연구원  
※ 관심분야: 위성항법시스템, 위성항법보강시스템, 전리층 상태감시