

지역 위성항법시스템 항법메시지 및 광역 보정정보 성능 분석을 위한 MATLAB GUI 기반 소프트웨어 개발

Development of MATLAB GUI-based Software for Performance Analysis of RNSS Navigation Message and WAD-RNSS Correction

박재욱¹ · 김부겸¹ · 기창돈^{1*} · 김동욱²
¹서울대학교 항공우주공학과, 정밀기계설계공동연구소
²국방과학연구소

Jaek Park¹ · Bu-Gyeom Kim¹ · Changdon Kee^{1*} · Donguk Kim²
¹Department of Aerospace Engineering and SNU-IAMD, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea
²Agency for Defense Development, Daejeon 34186, Korea

[요 약]

본 논문에서는 지역 위성항법시스템의 항법메시지와 광역 보정정보 성능 분석을 위해 MATLAB GUI (graphic user interface) 기반으로 개발된 소프트웨어에 대해 소개한다. 본 소프트웨어는 한반도 및 주변 지역에 서비스를 제공하는 가상의 지역 위성항법시스템의 감시국 및 기준국 배치에 따른 항법메시지와 광역 보정정보의 위성 궤도/시각 관련 성능을 분석하기 위해 개발되었다. 본 소프트웨어 구동 시 항법메시지 및 광역 보정정보가 MATLAB 파일 형식으로 출력된다. 개발된 소프트웨어의 출력을 검증한 결과, 궤도 및 시계 예측 오차가 통계적 예측에 부합하며, 파라미터 피팅 오차가 cm 수준임을 확인하였다. 또한, 광역 보정정보가 측정치 차원의 오차를 81.9% 개선함을 확인하여 유효한 항법메시지 및 광역 보정정보 성능 분석이 가능함을 확인하였다.

[Abstract]

This paper introduces a MATLAB graphical user interface (GUI) based software for performance analysis of navigation message and wide area differential correction of regional navigation satellite system (RNSS). This software was developed to analyze satellite orbit/clock-related performance of navigation message and wide area differential correction simulating RNSS for regions near Korea based on different distributions of monitor and reference stations. As a result of software operation, navigation message and wide area differential correction are given as output in MATLAB file format. From the analysis of output, it was confirmed that valid navigation message and wide area differential correction could be generated from the results about statistical feature of orbit and clock prediction errors, cm-level fitting errors for navigation message parameters, and 81.9% enhancement in range error for wide area differential correction.

Key word : MATLAB GUI Software, Navigation Message, RNSS, Wide Area Differential Correction.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2023.27.5.510>



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 26 September 2023; Revised 12 October 2023
Accepted (Publication) 27 October 2023 (30 October 2023)

*Corresponding Author; Changdon Kee

Tel: +82-02-880-1912
E-mail: kee@snu.ac.kr

1. 서론

지역 위성항법시스템 (RNSS; regional navigation satellite system)는 전지구 위성항법시스템 (GNSS; global navigation satellite system)와는 달리 적은 수의 항법위성을 통해 효율적으로 특정 지역에만 PNT (positioning, navigation, and timing) 서비스를 제공하는 위성항법시스템이다. RNSS는 이를 위하여 지면에 대해 일정한 지상 궤적을 유지할 수 있는 지구동기 궤도의 항법위성을 주로 사용한다. 일본의 QZSS (quasi-zenith satellite system)이 지구동기궤도인 GEO (geostationary orbit), IGSO (inclined geosynchronous orbit)의 항법위성을 활용하는 대표적인 RNSS이다[1]. 또한, 중국의 BeiDou도 전지구 영역에서 서비스를 제공하지만 지구동기궤도의 항법위성을 활용한다[1]. 대한민국에서도 이러한 RNSS의 특성을 고려하여 한반도 주변 지역에 서비스를 제공하는 한국형 위성항법시스템 (KPS; Korean positioning system)의 구축을 계획하고 있다[2].

RNSS 서비스를 사용하기 위해선 기본적으로 RNSS 항법위성들의 궤도/시각 정보가 사용자에게 제공되어야 한다. 일반적으로 위성항법시스템에서는 이를 방송궤도력과 위성 시계 보정정보 파라미터를 포함한 항법메시지의 형태로 제공한다. 이러한 항법메시지는 시스템의 지상 부분의 주 관제국에서 감시국들의 측정치 정보를 수집하고 처리한 후 궤도/시각 정보를 예측하여 생성된다[3]. 사용자가 이를 활용하여 측위를 수행할 때 궤도/시각 정보의 정확도가 측위 정확도에도 영향을 미치기 때문에, 높은 정확도의 항법메시지를 제공하는 것이 바람직하다[1]. 이 때 감시국들의 배치가 지상 부분이 생성하는 항법메시지의 품질에 영향을 미치므로, RNSS에서도 시스템 설계 과정에서 감시국 배치에 따른 항법메시지 생성에 대한 영향을 확인하는 것이 필요하다.

위성항법시스템의 항법메시지는 지상 부분의 한계로 인해 실제 위성의 궤도/시각 정보 대비 오차를 갖는다. 이에 대해 보정정보를 적용하여 사용자의 측위 성능을 개선하는 보정항법 시스템들이 많이 연구되었다. 그 중 대표적인 시스템이 WAD-GNSS (wide area differential GNSS)로, 3차원 위성 궤도 오차와 위성 시계 오차를 기준국들의 측정치를 기반으로 추정하여 이를 광역 보정정보로 제공함으로써 높은 수준의 정확도를 제공한다[4]. 이러한 개념을 RNSS에도 적용하여 RNSS 위성에서 광역 보정정보를 항법메시지와 같이 한반도 주변 지역에 방송하는 시스템 WAD-RNSS (wide area differential RNSS)에 대한 연구도 진행된 바 있다[5]. 해당 광역 보정정보 생성 시 기준국의 배치가 보정정보 성능에 영향을 주기 때문에 시스템 설계 단계에서는 기준국 배치에 따른 보정정보 생성 성능 분석이 필요하다.

따라서, 본 논문에서는 한반도 및 그 주변을 대상으로 하는 가상의 RNSS 및 WAD-RNSS 설계 시 활용할 수 있도록 감시국 및 기준국 배치에 따른 항법위성의 궤도/시각 정보 관련 항법메시지 및 광역 보정정보의 성능 분석이 가능한 시뮬레이션

소프트웨어를 제작하였고, 이를 MATLAB GUI로 구현하였다.

2장에서는 개발한 소프트웨어의 구성과 항법메시지 및 광역 보정정보를 생성하는 알고리즘에 대해 기술하였다. 3장에서는 개발한 소프트웨어를 통한 항법메시지 및 광역 보정정보 검증과 성능 평가에 대해 기술하였다.

II. RNSS 항법메시지 및 광역 보정정보 성능 분석 소프트웨어

2-1 항법메시지 및 광역 보정정보 성능 분석 소프트웨어의 소개

그림 1은 본 소프트웨어의 구성도를 나타낸 것으로, 소프트웨어는 시나리오 및 데이터 처리 설정 모듈, 데이터 처리 모듈, 데이터 출력 모듈로 구성되어 있다. 시나리오 설정 모듈에서는 항법메시지 및 광역 보정정보 시뮬레이션 분석 일시 및 시간 구간을 설정하고, 감시국 및 기준국의 위치 좌표와 항법위성의 궤도 요소를 설정한다. 데이터 처리 설정 모듈에서는 항법위성의 참값 궤도 및 시계 정보 생성, 위성항법신호 측정치 생성, 궤도/시각 결정 및 예측, 항법메시지 생성, 광역 보정정보 생성에서의 상세 조건을 설정한다. 데이터 처리 모듈 중 참값 및 측정치 시뮬레이션 모듈에서는 앞서 설정을 기반으로 항법위성의 참값 궤도 및 시계 정보와 위성항법신호 측정치를 생성한다. 항법메시지 생성 모듈에서는 앞서 생성된 위성항법신호 측정치와 동역학 모델을 활용해 항법위성의 궤도/시각 정보를 예측하고, 예측 결과를 사용자에게 방송하기 위한 항법메시지 형태로의 피팅을 수행한다. 다음으로 광역 보정정보 생성 모듈에서는 앞서 생성한 항법메시지의 궤도 및 시계 오차를 추정한다. 본 프로그램은 결과로서 궤도 및 시계 결정 및 예측 정확도와 이를 기반으로 한 항법메시지 및 광역 보정정보 활용 시 사용자 측위 정확도 결과를 제공한다.

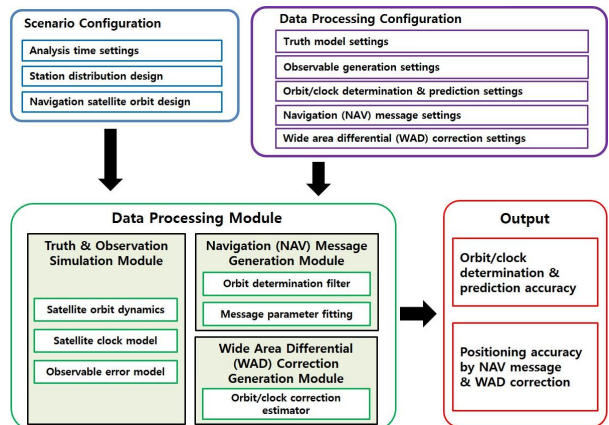


그림 1. 소프트웨어 구성도
Fig. 1. Block diagram of software

그림 2는 MATLAB GUI로 구현된 본 소프트웨어의 메인 화면

면이다. 메인 화면에서는 분석일, 시뮬레이션 전체 시간 및 예측 시간을 입력할 수 있다. 좌측 하단의 지도는 항법메시지 생성에 활용되는 감시국과 광역 보정정보 생성에 활용되는 기준국의 배치안을 나타내는데, 그림 3의 추가적인 창을 통하여 해당 정보들을 입력할 수 있다. 이외에도 메인 화면에서의 버튼들을 통해 연결되는 별도 입력창을 통해 항법위성 궤도 설계안이나, 데이터 처리 설정 등을 입력할 수 있다. 또한 우측 상단의 소프트웨어 상태창에서 소프트웨어의 실행 현황이 표시된다. 상태창 하단에는 처리 결과를 도시하는 출력창으로 연결되는 버튼과 소프트웨어 실행 및 종료 버튼이 위치한다. 그림 4-6은 소프트웨어 처리 결과를 도시하는 결과 창으로, 각각 RNSS 궤도 결정 및 예측 결과, RNSS 항법메시지 피팅 결과, RNSS 항법메시지 및 광역 보정정보 활용 시의 측위 오차 결과를 나타낸다. 해당 결과 창들은 앞서 기술한 메인 화면에서 버튼을 통해 활성화할 수 있다.

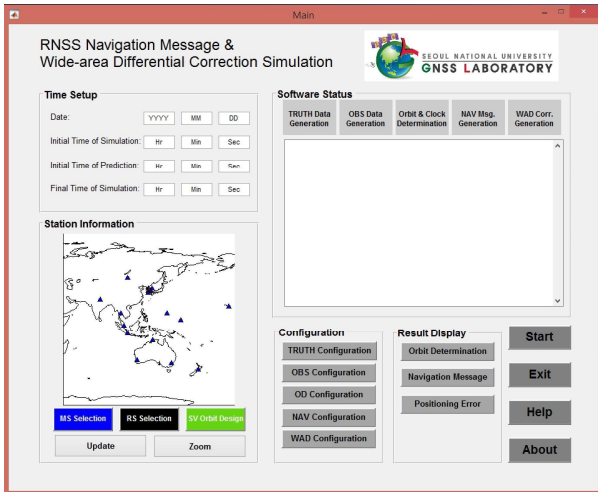


그림 2. 소프트웨어 메인 화면
Fig. 2. Main window of software

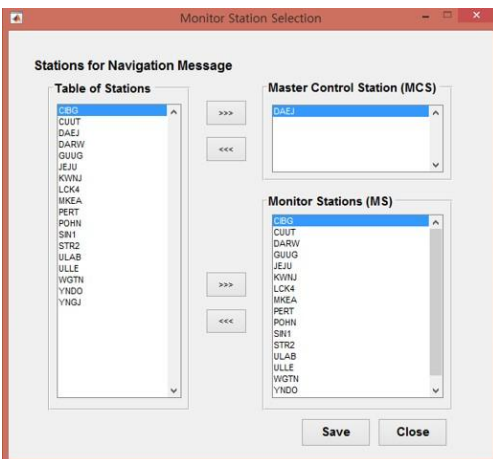


그림 3. 감시국 구성 선택 창
Fig. 3. Window for monitor station selection

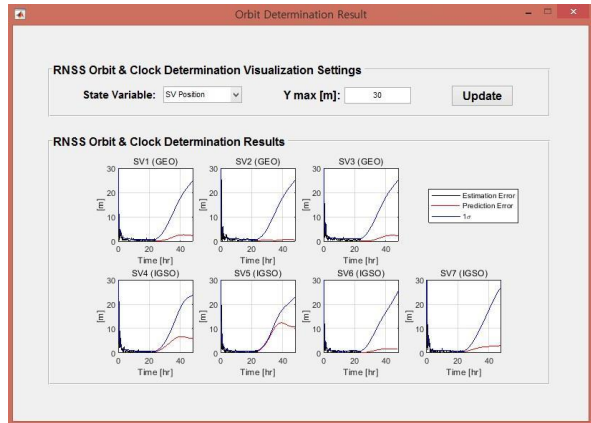


그림 4. RNSS 궤도 결정 및 예측 결과 창
Fig. 4. Window for RNSS orbit determination and prediction results

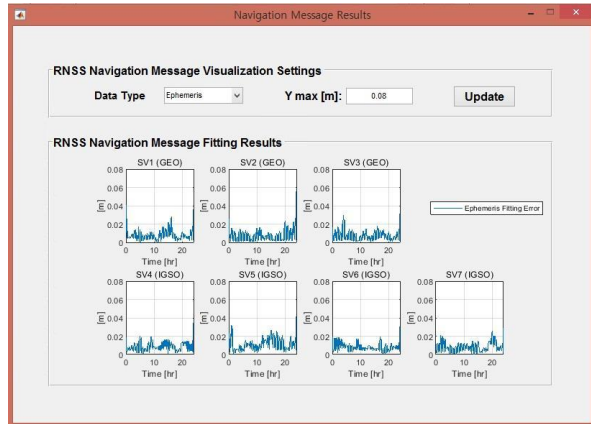


그림 5. RNSS 항법메시지 생성 시 피팅 결과 창
Fig. 5. Window for fitting results in RNSS navigation message generation

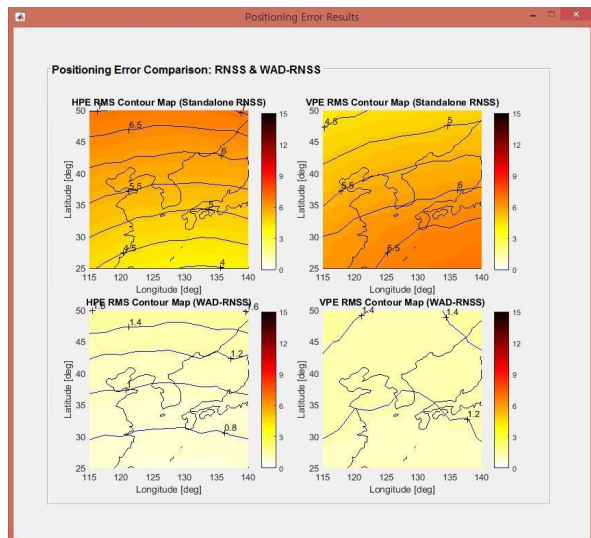


그림 6. Standalone RNSS와 WAD-RNSS 위치 오차 결과 창
Fig. 6. Window for positioning error results of standalone RNSS and WAD-RNSS

2-2 개발한 소프트웨어의 알고리즘

2-2-1 RNSS 항법메시지 생성 알고리즘

RNSS의 항법메시지는 다른 GNSS와 마찬가지로 항법위성의 궤도/시각 예측 결과를 기반으로 생성된다. 이를 위해 RNSS의 지상 부분에서는 예측에 앞서 측정치와 동역학 정보를 결합하여 현재 시점까지의 궤도/시각 정보를 결정한 뒤, 그 결정 결과로부터의 동역학 정보를 활용하여 미래 시점의 예측을 수행한다. 본 소프트웨어에서는 이러한 지상 부분의 궤도/시각 결정 및 예측 필터를 확장칼만필터 기반으로 구현하였다. 해당 필터에서 추정되는 상태 벡터는 식 (1)과 같이 모든 위성 위치와 시계 오프셋, 모든 감시국 시계 오프셋 정보를 포함하도록 구성된다. 궤도/시각 결정에 활용되는 의사거리 측정치는 오차 요소 제거, 평활화 등의 처리를 거친 후 식 (2)와 같이 위성 위치와 시계 오프셋, 감시국 시계 오프셋 항에 대해 표현된다. 해당 측정치 처리 과정에서 전리층 지연 오차는 이중 주파수를 활용한 무전리층 조합을 통해 제거되고, 대류층 지연 오차는 Black 모델과 같은 대류층 모델을 통해 보상된다. 수신기 잡음은 해치필터와 같은 평활화 기법을 통해 감소되며, 다중 경로 오차의 경우 감시국 환경에 대한 모델링을 통해 보상될 수 있다.

$$\mathbf{X}_{OD} = [\mathbf{R}_{OD}^T \mathbf{b}_{OD}^T \mathbf{B}_{OD}^T]^T \quad (1)$$

$$\tilde{\rho} = \mathbf{R} \cdot \hat{\mathbf{e}} - b + B + \epsilon_{\rho} \quad (2)$$

식 (1)에서 \mathbf{X}_{OD} 는 궤도/시각 결정 및 예측 필터의 상태 벡터를, \mathbf{R}_{OD} , \mathbf{b}_{OD} , \mathbf{B}_{OD} 는 각각 상태 벡터에 포함된 위성 위치 벡터, 위성 시계 오프셋 벡터, 감시국 시계 오프셋 벡터를 의미한다. 식 (2)에서 $\tilde{\rho}$ 는 궤도/시각 결정에 활용되는 의사거리 측정치를, \mathbf{R} 는 위성의 위치 벡터를, $\hat{\mathbf{e}}$ 는 감시국-위성 시선방향 단위 벡터를, b 는 위성 시계 오프셋을, B 는 감시국 시계 오프셋을, ϵ_{ρ} 는 처리를 거친 후 의사거리 측정치의 잡음을 의미한다. 식 (1), (2)의 상태 벡터와 측정치에 대해서 확장칼만필터는 다음의 과정을 통해서 궤도/시각 결정 및 예측을 수행한다[6].

$$\bar{\mathbf{X}}_{k+1} = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{X}}_k, t_k) \quad (3)$$

$$\bar{\mathbf{P}}_{k+1} = \Phi_{k+1,k} \hat{\mathbf{P}}_k \Phi_{k+1,k}^T + \mathbf{Q}_k \quad (4)$$

$$\Phi_{k+1,k} = \left. \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{X}, t)}{\partial \mathbf{X}} \right|_{\mathbf{X}=\hat{\mathbf{X}}_k, t=t_k} \quad (5)$$

$$\mathbf{K}_{k+1} = \bar{\mathbf{P}}_{k+1} \mathbf{H}_{k+1}^T (\mathbf{H}_{k+1} \bar{\mathbf{P}}_{k+1} \mathbf{H}_{k+1}^T)^{-1} \quad (6)$$

$$\mathbf{H}_{k+1} = \left. \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{X})}{\partial \mathbf{X}} \right|_{\mathbf{X}=\bar{\mathbf{X}}_{k+1}} \quad (7)$$

$$\hat{\mathbf{X}}_{k+1} = \bar{\mathbf{X}}_{k+1} + \mathbf{K}_{k+1} (\mathbf{z}_{k+1} - \mathbf{h}(\bar{\mathbf{X}}_{k+1})) \quad (8)$$

$$\hat{\mathbf{P}}_{k+1} = \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{R}_{k+1} \mathbf{K}_{k+1}^T + (\mathbf{I} - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{H}_{k+1}) \bar{\mathbf{P}}_{k+1} (\mathbf{I} - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{H}_{k+1})^T \quad (9)$$

식 (3)~(5)는 동역학 정보를 활용하는 예측을 나타낸 것이고, 식 (6)~(9)는 측정치와 상태 벡터의 관계 정보를 활용한 갱신을 나타낸 것이다. 식의 아래 첨자 k 는 시간 t_k 를 나타내며, $\hat{\mathbf{X}}$, $\hat{\mathbf{P}}$ 는 추정된 상태 벡터와 공분산 행렬을, $\bar{\mathbf{X}}$, $\bar{\mathbf{P}}$ 는 예측된 상태 벡터와 공분산 행렬을 의미한다. \mathbf{f} 는 상태 벡터 동역학 모델을, Φ 는 상태 천이 행렬을, \mathbf{Q} 는 프로세스 잡음 공분산 행렬을 의미한다. 또한, \mathbf{K} 는 칼만 이득 행렬을, \mathbf{R} 는 측정치 잡음 공분산 행렬을, \mathbf{h} 는 측정치 벡터와 상태 벡터 관계를 나타내는 관측 모델을, \mathbf{H} 는 관측 행렬을, \mathbf{z} 는 측정치 벡터를 의미한다. 이러한 구성의 확장칼만필터를 거쳐 측정치 정보가 있는 시간 구간에서 궤도/시각 결정이 우선 수행되고, 그 결과로부터 측정치 정보가 없는 미래의 시간 구간에 대해 궤도/시각 예측이 진행된다. 궤도/시각 예측 결과는 RNSS 사용자에게 방송되는 형태인 항법메시지의 방송궤도력과 위성 시계 보정정보로 각각 피팅된다. 본 연구의 RNSS 항법메시지는 GEO 및 IGSO 위성이 있는 QZSS 및 BeiDou의 항법메시지에서 공통으로 활용하는 GPS LNAV (legacy navigation) 형식의 방송궤도력 파라미터 15개를, 위성 시계 보정정보 파라미터 3개를 활용한다[7], [8]. 피팅 과정에 사용되는 방송궤도력, 위성 시계 보정정보의 상태 벡터를 정리하면 다음과 같다.

$$\mathbf{X}_{eph} = [\sqrt{A} \alpha \beta \gamma i_0 \Omega_0 \Delta n \dot{i} \dot{\Omega} \dots \quad C_{rc} \ C_{rs} \ C_{uc} \ C_{us} \ C_{ic} \ C_{is}]^T \quad (10)$$

$$\alpha = e \cos \omega, \beta = e \sin \omega, \gamma = \omega + M_0 \quad (11)$$

$$\mathbf{X}_{sv_dk_corr} = [a_{f0} \ a_{f1} \ a_{f2}]^T \quad (12)$$

식 (10)은 방송궤도력 파라미터 피팅의 상태 벡터로, \sqrt{A} 는 궤도 장반경의 제곱근을, i_0 는 기준 시각의 궤도 경사각을, Ω_0 는 weekly epoch의 궤도면의 승교점 경도를, Δn 는 평균 운동의 변화량을, \dot{i} 는 궤도 경사각의 변화율을, $\dot{\Omega}$ 는 궤도면의 승교점 경도의 변화율을 의미한다. C_{rc} , C_{rs} 는 궤도 반경에 대한 보정항을, C_{uc} , C_{us} 는 위도 인수에 대한 보정항을, C_{ic} , C_{is} 는 궤도 경사각에 대한 보정항을 나타낸다. α, β, γ 는 이심률 e , 근지점 편각 ω , 기준 시각의 평균 근점 이각 M_0 에 대한 정보를 피팅 과정에서의 낮은 이심률로 인한 특이점을 해소하기 위해 다른 형태로 나타낸 것이다[1]. 식 (11)은 변화된 파라미터와 원래 방송궤도력에서 활용되는 파라미터 간의 관계를 나타낸 것이다. 또한, GEO 위성의 경우 낮은 궤도 경사각으로 인해 발생하는 피팅 과정에서의 추가적인 특이점을 해소하기 위해 BeiDou를 참고하여 궤도 경사각을 5° 틀어진 기준면을 기준으로 정의하여 사용하였다[9]. 식 (12)는 위성 시계 보정정보 파라미터 피팅의 상태 벡터로, a_{f0} 는 위성 시계 바이어스 보정

계수를, a_{f1} 는 위성 시계 드리프트 보정 계수를, a_{f2} 는 위성 시계 드리프트 변화율 계수를 의미한다. 이렇게 정의된 상태 벡터에 대한 피팅 과정의 다음과 같다.

$$Y_{orbit} = \bar{Y}_{eph}(X_{eph}, t, t_{oc}) + \epsilon_{eph} \quad (13)$$

$$H_{eph} = \frac{\partial Y_{orbit}}{\partial X_{eph}} \quad (14)$$

$$Y_{sv_dk} = \bar{Y}_{sv_dk_corr}(X_{sv_dk_corr}, t, t_{oc}) + \epsilon_{sv_dk_corr} \quad (15)$$

$$H_{sv_dk_corr} = \frac{\partial Y_{sv_dk}}{\partial X_{sv_dk_corr}} \quad (16)$$

식 (13), (14)는 방송케도력 파라미터 피팅 과정을, 식 (15), (16)은 위성 시계 보정정보 파라미터 피팅 과정을 나타낸 것이다. Y 는 피팅에 활용되는 측정치 벡터로 방송케도력의 경우에는 케도 예측 결과, 위성 시계 보정정보의 경우 시계 예측 결과를 의미한다. \bar{Y} 는 사용자 알고리즘으로 얻어지는 케도/시각 정보를 의미하며, X 는 방송케도력 및 위성 시계 보정정보 파라미터를 의미한다. t 는 측정치의 시각을, t_{oc} 및 t_{oc} 는 파라미터의 기준 시각을, ϵ 는 사용자 알고리즘의 결과와 측정치의 잔차를 의미한다. H 는 측정치에 대한 파라미터 상태 벡터의 변화율을 계산한 행렬로, 피팅은 이 행렬을 활용하여 잔차를 최소화하는 Least Square 해를 찾는 과정으로 진행된다. 여기서 틀어진 기준면을 기준으로 정의된 GEO 위성 방송케도력 파라미터에 대해서는 해당 기준면을 고려한 별도의 사용자 알고리즘을 사용하였다[9].

2-2-2 WAD-RNSS 광역 보정정보 생성 알고리즘

앞서 생성된 RNSS 항법메시지에도 예측 및 피팅에 의한 오차가 있기 때문에 사용자가 이를 기반으로 측위를 수행할 때 그로부터 영향을 받는다. 이런 오차를 보정하는 WAD-RNSS는 위성 케도 오차, 위성 시계 오차에 대한 광역 보정정보를 제공한다. 광역 보정정보 추정에는 식 (17)과 같이 위성 케도 오차와 시계 오차, 수신기 시계 오차가 포함된 상태 벡터가 활용되며, 식 (18)과 같이 상태 벡터의 항들에 대해 정리되도록 오차 요소 제거, 평활화 등의 처리를 거친 측정치가 활용된다. 상태 벡터와 측정치 벡터에 대한 관측 방정식은 식 (19)와 같이 주어지는데, Minimum variance estimator를 활용하여 식 (20), (21)과 같이 상태 벡터와 공분산을 추정한다[10].

$$X_{WAD} = [\Delta R^T \ \Delta b^T \ \Delta B^T]^T \quad (17)$$

$$\delta \rho = \delta R \cdot \hat{e} - \delta b + \delta B + \epsilon_{\delta \rho} \quad (18)$$

$$z = HX_{WAD} + \epsilon \quad (19)$$

$$\hat{X}_{MV} = (\Lambda^{-1} + H^T W^{-1} H)^{-1} H^T W^{-1} z \quad (20)$$

$$\hat{P}_{MV} = (\Lambda^{-1} + H^T W^{-1} H)^{-1} \quad (21)$$

식 (17)에서 X_{WAD} 는 광역 보정정보 추정 시의 상태 벡터를, ΔR , Δb , ΔB 는 각각 상태 벡터에 포함된 위성 위치 오차 벡터, 위성 시계 오차 벡터, 감시국 시계 오차 벡터를 의미한다. 식 (18)에서 $\delta \rho$ 는 광역 보정정보 추정에 활용되는 의사거리 측정치를, δR 는 위성의 위치 오차 벡터를, \hat{e} 는 감시국-위성 시선방향 단위 벡터를, δb 는 위성 시계 오차를, δB 는 감시국 시계 오차를, $\epsilon_{\delta \rho}$ 는 처리를 거친 후 의사거리 측정치의 잡음을 의미한다. 식 (19)에서 z 는 측정치 벡터를, H 는 관측 행렬을, ϵ 는 측정치 잡음 벡터를 의미한다. 식 (20), (21)에서 \hat{X}_{MV} , \hat{P}_{MV} 는 추정된 상태 벡터와 공분산 행렬을, Λ 는 선형적으로 선택된 a priori 상태 공분산, W 는 측정치 잡음 공분산을 의미한다.

III. RNSS 항법메시지 및 광역 보정정보 성능 분석 소프트웨어 검증 및 성능 평가

3-1 검증 및 성능 평가 시나리오

소프트웨어로 생성되는 위성 케도/시각 정보 관련 항법메시지 및 광역 보정정보의 검증 및 성능 평가를 위하여 감시국 및 기준국과 사용자의 위치를 선정하였다. 감시국 및 기준국의 위치로는 [11], [12]의 국외 12개, 국내 6개의 선정안을 활용하였고, 항법위성의 케도는 [13]의 GEO 위성 3개, IGSO 위성 4개로 총 7개의 위성을 배치하는 설계안을 활용하였다. 또한, 성능 평가 대상 사용자는 한반도 주변 지역 북위 25°~50°, 동경 115°~140°의 영역에 2.5° 간격으로 균일하게 분포한다고 가정하였다. 그림 7의 좌측은 감시국 및 기준국의 위치와 항법위성의 케도의 지상궤적을, 우측은 사용자의 위치를 나타낸다. 표 1은 성능 평가 시나리오의 분석 시간 등의 상세한 설정을 나타낸다. 표 2는 데이터 처리에 대한 상세 설정 중 시뮬레이션에 활용된 케도 동역학 모델을, 표 3은 데이터 처리에 대한 상세 설정 중 측정치 관련 모델의 사항들을 나타낸다[6]. 또한, 표 4는 항법메시지 생성 관련 설정을 나타내는데, 예측 구간은 보수적인 수치를 확인하기 위해 한 케도 주기인 24시간으로 설정하였고, 피팅 구간은 BeiDou와 QZSS의 ICD를 참고하여 2시간으로 설정하였다[7], [8].

표 1. 검증 및 성능 평가 시나리오 상세 설정

Table 1. Configurations for performance assessment

Determination interval	2025.01.01. 00:00 – 23:59 (UTC)
Prediction interval	2025.01.02. 00:00 – 23:59 (UTC)
Data generation time step	1 sec
Data processing time step	60 sec

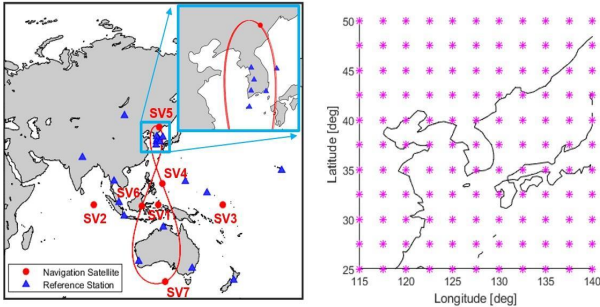


그림 7. 검증 및 성능 평가 시나리오 (좌: 감시국 및 기준국, 우: 사용자)

Fig. 7. Performance evaluation scenario (Left: Stations, Right: Users)

표 2. 궤도 동역학 모델 설정

Table 2. Orbit dynamics model configurations

	Truth	Filter propagation
Geopotential	EGM96 (60x60)	EGM96 (12x12)
Third-body	DE405 (Moon, Sun)	DE405 (Moon, Sun)
Solar radiation pressure	ECOM, conical shadow	ECOM, conical shadow
Tides	IERS 2010, FES2004	-
General relativity	IERS 2010	-

표 3. 측정치 모델 설정

Table 3. Measurements model configurations

Observable	Smoothed Ionosphere-free pseudorange
Sampling time	60 sec
Satellite clock	Atomic clock model (Rubidium)
Receiver clock	Atomic clock model (Cesium)
Ionospheric delay	Eliminated by ionosphere-free combination
Tropospheric delay	Eliminated by black model
Receiver noise	Gaussian random (function of elevation)
Smoothing	Hatch filtering with N = 100

표 4. 항법메시지 생성 관련 설정

Table 4. Navigation message generation configurations

Raw data	24 hour satellite orbit and clock prediction results
Fitting interval	2 hours

3-2 항법메시지 및 광역 보정정보 생성 검증

개발된 소프트웨어의 항법메시지 및 광역 보정정보 생성 결과를 검증하기 위해 앞선 설정으로 처리한 궤도 결정, 항법

메시지 피팅, 광역 보정정보 결과를 확인하였다. 2장에서 언급한 바와 같이 측정치 정보를 활용한 궤도/시각 결정 후, 그 결과로부터 측정치 정보가 없는 미래의 시간 구간에 대한 궤도/시각 예측을 수행하였다. 그림 8, 9는 RNSS의 궤도/시각 결정과 예측 결과 그래프로, 24시간 결정 이후 24시간 예측 시의 오차와 표준편차를 나타낸다. 결정 구간 전체적으로 오차의 크기가 표준편차와 유사하고, 예측 구간에서는 오차의 크기가 표준편차 범위 내에 유지되는 것을 확인할 수 있다. 표 5는 결정 구간에서 필터의 신뢰수준을 나타내는 표준편차가 수렴되는 12시간으로부터 24시간까지의 결정 구간의 RMS 값과 24시간 이후 48시간까지의 예측 구간의 RMS 값을 나타낸 것이다. 수치를 통해 확인할 수 있는 것처럼 필터에서 추정된 상태 벡터의 참값 대비 오차가 필터의 신뢰수준을 나타내는 표준편차 내로 유지됨을 통해 궤도/시각 결정 및 예측 결과를 검증할 수 있었다.

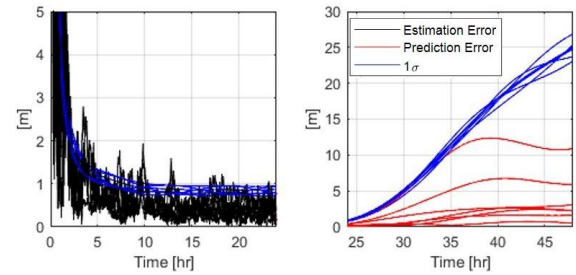


그림 8. RNSS 궤도 결정 및 예측 결과 (좌: 결정, 우: 예측)

Fig. 8. RNSS orbit determination and prediction results (Left: Determination, Right: Prediction)

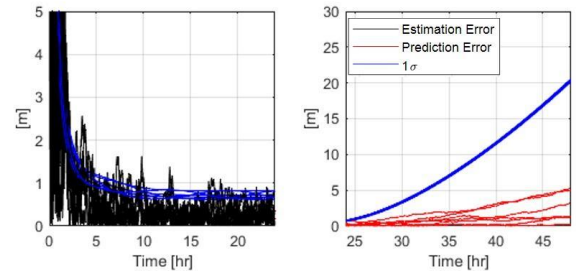


그림 9. RNSS 시각 결정 및 예측 결과 (좌: 결정, 우: 예측)

Fig. 9. RNSS clock determination and prediction results (Left : Determination, Right: Prediction)

표 5. RNSS 궤도/시각 결정 및 예측 결과 통계 (RMS)

Table 5. Statistics for RNSS orbit/clock determination and prediction results (RMS)

	Error [m]	Standard deviation [m]
Satellite orbit determination	0.46	0.84
Satellite clock determination	0.33	0.63
Satellite orbit prediction	3.09	14.72
Satellite clock prediction	1.17	9.52

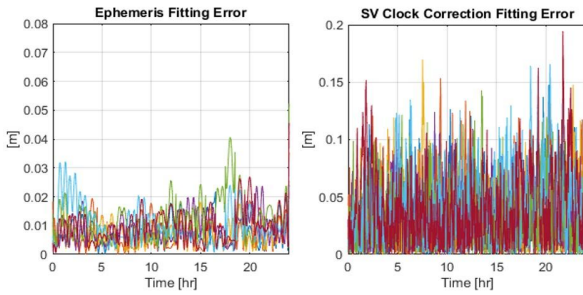


그림 10. RNSS 항법메시지 피팅 오차 (좌: 방송궤도력, 우: 위성 시계 보정정보)
Fig. 10. Fitting errors of RNSS navigation message (Left : Ephemeris, Right: SV clock correction)

표 6. RNSS 항법메시지 피팅 오차 (24시간 RMS)

Table 6. RNSS navigation message fitting error (24 hour RMS)

	Fitting error [cm]
Ephemeris parameter	1.05
SV clock correction parameter	4.63

항법메시지 생성 결과를 검증하기 위해, 24시간의 궤도/시각 예측 결과를 항법메시지의 형태인 방송궤도력 및 위성 시계 보정정보로 피팅하였을 때의 피팅 오차를 확인하였다. 피팅 오차는 항법메시지와 사용자 알고리즘으로 궤도/시각 정보를 계산한 결과와 항법메시지를 생성하는데 사용된 예측 결과의 차이를 의미한다. 그림 10은 RNSS 항법메시지 생성 시 시간에 따른 피팅 오차를 나타낸 것이고, 전체 시간에 대한 RMS 값은 표 6에 제시되어 있다. 표 6의 수치에서 본 소프트웨어를 통해 항법메시지 피팅을 cm 수준으로 정확하게 수행할 수 있음을 알 수 있다.

다음으로는 광역 보정정보 생성 결과를 검증하기 위해, 생성된 24시간 궤도/시각 예측 결과를 기반으로 생성된 항법메시지를 활용했을 때 추가로 광역 보정정보를 생성하고 적용하였을 때의 Signal in Space User Range Error (SIS URE)를 비교하였다. SIS URE는 위성 궤도 및 시계 오차에 의한 측정치 차원을 오차로, 다음과 같이 계산할 수 있다 [14]. 식 (22)에서 δR 는 위성의 위치 오차 벡터를, \hat{e} 는 감시국-위성 시선방향 단위 벡터를, δb 는 위성 시계 오차를 의미한다.

$$SIS\ URE = \delta R \cdot \hat{e} - \delta b \quad (22)$$

그림 11은 시나리오에서 상정한 모든 사용자 위치에서의 시간에 따른 SIS URE를 나타낸 그래프로 파란색은 RNSS 기본 항법메시지를 사용하였을 때, 빨간색은 WAD-RNSS 광역 보정정보를 적용한 이후의 SIS URE를 나타낸다. 표 7은 24시간 RMS 값을 나타낸다. 해당 표와 그래프를 통해 본 소프트웨어로 생성한 항법메시지 활용 시 SIS URE가 WAD-RNSS보정정보도 적용하면 81% 개선됨을 확인할 수 있다.

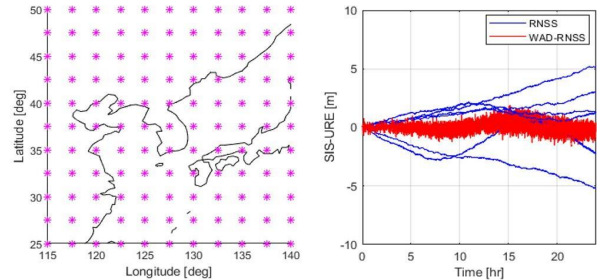


그림 11. Standalone RNSS와 WAD-RNSS의 SIS URE (좌: 사용자 위치, 우: SIS URE)
Fig. 11. SIS URE of standalone RNSS and WAD-RNSS (Left: Location of users, Right: SIS URE)

표 7. Standalone RNSS와 WAD-RNSS의 SIS URE (24시간 RMS)

Table 7. SIS URE of standalone RNSS and WAD-RNSS (24 hour RMS)

	SIS URE [m]
Standalone RNSS	1.82
WAD-RNSS	0.33

3-3 항법메시지 및 광역 보정정보 성능 평가

본 소프트웨어로 생성한 항법메시지 및 광역 보정정보의 성능 평가하기 위해 이를 활용한 사용자의 측위 결과를 확인하였다. 해당 분석에서는 궤도 및 시계 정보의 측위 정확도의 영향만을 평가하기 위해 사용자의 전리층 지연 오차는 참값으로 제거되며 대류층 지연 오차는 모델로 제거됨을 가정하였으며, 별도의 평활화를 거치지 않은 측정치를 활용하였다. 그림 12는 시나리오에 상정한 사용자들의 24시간 RMS 위치 오차 등고선 지도를 나타낸 것으로, 상단 좌측과 우측 그래프는 각각 Standalone RNSS의 수평과 수직 측위 오차를, 하단 좌측과 우측 그래프는 각각 WAD-RNSS의 수평과 수직 측위 오차를 나타낸다. RNSS 항법메시지만을 사용하는 Standalone RNSS의 경우보다 WAD-RNSS 광역 보정정보까지 적용하였을 때 위치 오차가 전반적으로 개선됨을 확인할 수 있다. 표 8은 사용자가 분포하는 전체 영역 측위 오차에 대한 RMS 값을 제시한 것으로, RNSS 항법메시지만을 사용할 때 5 m 수준의 수평 및 수직 오차가 WAD-RNSS 광역 보정정보를 적용하면 1 m 수준으로 81.9% 개선됨을 확인할 수 있다.

표 8. Standalone RNSS와 WAD-RNSS의 위치 오차 (24시간 RMS)

Table 8. Position error of standalone RNSS and WAD-RNSS (24 hour RMS)

	Horizontal Position Error [m]	Vertical Position Error [m]
Standalone RNSS	5.49	5.71
WAD-RNSS	1.04	1.26

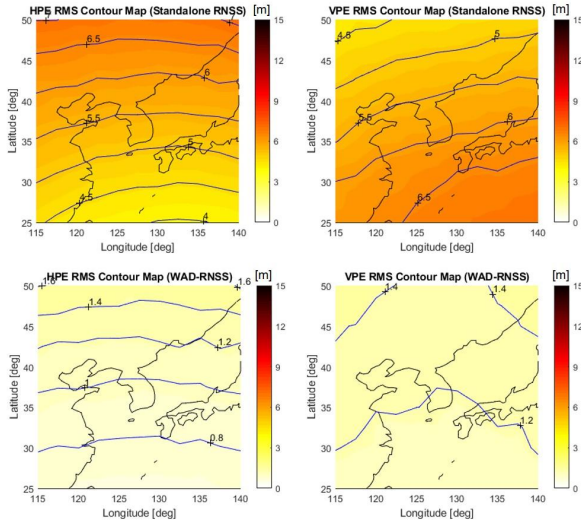


그림 12. Standalone RNSS와 WAD-RNSS의 위치 오차 등고선 지도 (24시간 RMS) (상: Standalone RNSS, 하: WAD-RNSS)

Fig. 12. Contour map of position error of standalone RNSS and WAD-RNSS (24 hour RMS) (Top: Standalone RNSS, Bottom: WAD-RNSS)

IV. 결론

본 논문에서는 한반도 및 주변 지역에 서비스를 제공하는 가상의 RNSS의 위성 궤도/시각 정보 관련 항법메시지와 광역 보정정보의 성능을 분석하는 소프트웨어를 소개하였다. 시뮬레이션 기반으로 RNSS 항법위성, 감시국 및 기준국을 모사하여 참값 궤도 및 시계, 측정치를 생성하였고, 이를 기반으로 궤도/시각 예측을 통한 항법메시지 생성, 항법메시지의 오차에 대한 광역 보정정보 생성을 수행하였다. 생성 결과에 대한 검증 결과, 24시간 궤도/시각 예측의 오차가 표준편차 내에 유지됨을 확인하여 궤도/시각 결정 및 예측 필터를 검증하였고, 항법메시지 피팅 오차가 cm 수준임을 확인하여 항법메시지 생성 과정을 검증할 수 있었다. 또한, 광역 보정정보 적용 시 궤도/시각 오차에 의한 측정치 차원의 오차인 SIS URE가 81.9% 개선됨을 확인함으로써 광역 보정정보 생성도 검증할 수 있다. 생성한 RNSS 항법메시지와 광역 보정정보의 성능을 비교한 결과, 항법메시지를 통해선 24시간 RMS 5 m 수준의 수평 및 수직 측위 오차를 얻었고 광역 보정정보 추가 적용 시 이를 1 m 수준으로 개선할 수 있음을 확인하였다. 본 논문에서 소개한 소프트웨어를 추가적으로 활용한다면, 항법메시지 생성 시 요구 성능을 만족할 수 있는 예측 시간 선정 등도 수행할 수 있을 것으로 보인다. 또한, 항법메시지 및 광역 보정정보에 위성 궤도/시각 정보 이외에도 전리층 관련 정보 등을 추가하거나 데이터 규격에 대해서도 고려한다면 보다 현실적인 분석을 수행할 수 있을 것으로 기대한다.

Acknowledgements

본 연구는 서울대학교 항공우주신기술연구소를 통해 계약된 과제로 2021년 정부 (방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행되었습니다 (UD210006SD). 그리고 서울대학교 공학연구원의 시설 지원에도 감사드립니다.

References

- [1] E. D. Kaplan, and C. J. Hegarty, *Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications*, 3rd ed. Boston, MA: Artech House, 2017.
- [2] J. M. Joo, and M. B. Heo, "Korean Positioning System Development Plan," in *Proceeding of 2020 IPNT Conference*, Yeosu, Korea, pp. 29-30, 2020.
- [3] Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard, Department of Defense, GPS SPS PS, Apr. 2020.
- [4] C. D. Kee, B. W. Parkinson, and P. Axelrad, "Wide area differential GPS," *NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation*, Vol. 38, No. 2, pp. 123-146, 1991.
- [5] D. U. Kim, H. M. So, and J. P. Park, "Performance Analysis of Wide-Area Differential Positioning Based on Regional Navigation Satellite System," *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*, Vol. 10, No. 1, pp. 35-42, Mar. 2021.
- [6] J. U. Park, B. G. Kim, C. D. Kee, and D. U. Kim, "Performance Analysis of Real-time Orbit Determination and Prediction for Navigation Message of Regional Navigation Satellite System," *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*, Vol. 12, No. 2, pp. 167-176, Jun. 2023.
- [7] Quasi-Zenith Satellite System Interface Specification Satellite Positioning, Navigation, and Timing Service, Cabinet Office, IS-QZSS-PNT-004, Jan. 2021.
- [8] BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document: Open Service Signal B1I, China Satellite Navigation Office, BDS-SIS-ICD-B1I-3.0, Feb. 2019.
- [9] X. Fu, and M. Wu, "Optimal design of broadcast ephemeris parameters for a navigation satellite system," *GPS Solutions*, Vol. 16, No. 4, pp. 439-448, Oct. 2012.
- [10] D. Y. Kim, A Study on Correction Generation Algorithms for Wide Area Differential GNSS, Ph.D. dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea, 2007.
- [11] S. B. Chun, and M. B. Heo, "Conceptual Design of Ground Infrastructure for the Korean Satellite Navigation System," in

Proceeding of the Society for Aerospace System Engineering 2019 Fall Conference, Changwon, Korea, 2019.

- [12] S. L. Cho, H. J. Jang, H. H. Jeong, B. S. Lee, and G. W. Nam, "The Development for KASS Reference Station Site," *The Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 24, No. 4, pp. 273-279, Aug. 2020.
- [13] G. M. Kim, H. J. Oh, C. D. Park, and S. M. Seo, "Real-Time Orbit Determination of Korean Navigation Satellite System

based on Multi-GNSS Precise Point Positioning," in *Proceeding of the International Symposium on Global Navigation Satellite System 2018 (ISGNSS 2018)*, Bali, Indonesia, 2019.

- [14] Quasi-Zenith Satellite System Service Performance Report for 1stH FY2021: Satellite Positioning, Navigation, and Timing Service (PNT), Quasi-Zenith Satellite System Services Inc., Feb. 2022.



박재욱 (Jaeuk Park)

2020년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학사)
2020년 3월 ~ 현재 : 서울대학교 항공우주공학과 석박사통합과정
※관심분야 : 궤도 결정, 지역 위성항법시스템, 큐브위성



김부겸 (Bu-Gyeom Kim)

2018년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학사)
2018년 3월 ~ 현재 : 서울대학교 기계항공공학부 석박사통합과정
※관심분야 : 위성항법시스템, SBAS, 전리층, 실시간 정밀 측위 (RTK, Network RTK)



기창돈 (Changdon Kee)

1984년 2월 : 서울대학교 항공공학과 (공학사)
1986년 2월 : 서울대학교 항공공학과 (공학석사)
1994년 1월 : 미국 스탠포드대학교 항공우주공학과 (공학박사)
1996년 9월 ~ 현재 : 서울대학교 기계항공공학부 교수
※관심분야 : 위성항법시스템, 보정위성항법시스템, 광역보정위성항법시스템, 초정밀위치결정시스템, 우주비행체 자세결정, 무인항공기 자동제어 시스템, 실내용 자동항법시스템, 항공교통관제시스템



김동욱 (Donguk Kim)

2013년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학사)
2020년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학박사)
2019년 12월 ~ 현재 : 국방과학연구소 선임연구원
※관심분야 : 지역 위성항법시스템, SBAS, 실시간 정밀 측위 (RTK), 항재밍/항기만 알고리즘