Performance Analysis of Wide-Area Differential Positioning Based on Regional Navigation Satellite System

Donguk Kim[†], Hyoungmin So, Junpyo Park

Agency for Defense Development, Daejeon 34186, Korea

ABSTRACT

The position accuracy of the stand-alone Regional Navigation Satellite System (RNSS) users is more than tens of meters because of various error sources in satellite navigation signals. This paper focuses on wide-area differential (WAD) positioning technique, which is already applied in Global Navigation Satellite System (GNSS), in order to improve the position accuracy of RNSS users. According to the simulation results in the very narrow ground network in regional area, the horizontal position error of stand-alone RNSS is about RMS 11.6 m, and that of RNSS with WAD technique, named the WAD-RNSS, is about RMS 2.5 m. The accuracy performance has improved by about 78%.

Keywords: RNSS, WAD-GNSS, WAD-RNSS, SBAS

1. INTRODUCTION

위성 항법은 위성에서 방송하는 측위 신호를 이용하여 사용 자에게 정확한 Positioning, Navigation, and Timing (PNT) 정 보를 제공하는 시스템으로 경제·사회·국방 전반에 걸쳐 오 늘날 없어서는 안될 핵심 인프라로 자리매김하고 있다. 미국의 Global Positioning System (GPS)을 시작으로 러시아, 유럽, 중 국과 같은 우주 강국 들은 전지구 어디에서나 24시간 PNT 정 보 제공이 가능한 전지구 위성항법시스템 (Global Navigation Satellite System, GNSS)을 구축하여 운영하고 있으며, 인도와 일 본은 24시간 주기를 갖는 지구동기궤도를 사용하여 좁은 서비스 영역 내 PNT 정보를 제공하는 지역 위성항법시스템 (Regional Navigation Satellite System, RNSS)을 운영하고 있다. 우리나라 도 해외 위성항법시스템에 대한 의존도를 낮추고, 4차 산업혁명 시대를 완성하는 국가 핵심 PNT 인프라를 확보하기 위하여 지역 위성항법인 한국형 위성항법시스템 (Korean Positioning System, KPS)을 개발하여 구축할 계획을 가지고 있다 (Ahn et al. 2020, Joo & Heo 2020).

Received Feb 05, 2021 Revised Feb 19, 2021 Accepted Feb 23, 2021 [†]Corresponding Author

E-mail: donguk319@add.re.kr Tel: +82-42-821-4507 Fax: +82-42-823-3400

Donguk Kim https://orcid.org/0000-0001-9151-4434 Hyoungmin So https://orcid.org/0000-0001-5279-8833 Junpyo Park https://orcid.org/0000-0002-0813-4594

지역 위성항법시스템은 전지구 위성항법시스템과 마찬가지 로 위성 궤도/시계 오차, 코드/위상 바이어스, 전리층/대류층 지연 등 다양한 오차요소들로 인해 단독 측위 시 수십 m 수준의 위치 오차가 발생하게 된다. 사용자가 더 높은 수준의 정확도와 신뢰 도를 갖는 위치를 계산하기 위해서는 GNSS의 오차요소들을 제 거하기 위한 보정정보를 제공하는 보정항법 기술이 필요하며, 대 표적으로 광역 보정항법시스템 (Wide-Area Differential GNSS, WAD-GNSS)이 있다 (Kee et al. 1991). WAD-GNSS는 다수의 기 준국으로 구성된 지상의 기준국 네트워크를 활용하여 위성 궤도/ 시계 및 전리층 보정정보를 생성하여 사용자에게 제공하는 시스 템으로 광범위한 영역에서 1m급 정확도의 정밀 항법이 가능하 다 (Kaplan & Hegarty 2006, Kim 2007). WAD-GNSS의 m급 정 밀 보정정보를 정지궤도위성을 통해 사용자에게 방송하는 시스 템을 Satellite-Based Augmentation System (SBAS) 라고 하며, SBAS는 항공기 이착륙 등 높은 안전성을 요구하는 분야에 필수 적인 인프라로 국제 표준화가 완료되었다 (ICAO 2006). 우리나 라도 GPS 기반의 SBAS 시스템인 Korea Augmentation Satellite System (KASS)가 2023년 운영을 목표로 개발 중에 있다 (Yun et al. 2020).

본 논문에서는 지역 위성항법시스템의 사용자 위치 정확도 를 수십 m에서 m급으로 향상시키기 위해 기존 전지구 위성항법 시스템에만 적용되던 광역 보정항법 알고리즘을 지역 위성항법 에 적용한 WAD-RNSS에 대해 연구한다. SBAS가 GPS가 아닌 별 도의 정지궤도 위성을 통해 보정정보를 중계 방송했다면, WAD-RNSS는 지역 항법위성 자체에서 항법신호와 m급 보정신호를



Fig. 1. Conceptual figure of wide-area differential RNSS (WAD-RNSS).

함께 방송하는 개념의 시스템이다. 일본의 지역 위성항법시스 템인 Quasi-Zenith Satellite System (QZSS)도 Sub-meter Level Augmentation Service (SLAS) 라고 부르는 m급 보정 서비스를 항법위성을 통해 제공하고 있다. 다만 일본의 SLAS 보정정보는 Differential GPS (DGPS) 형태의 보정 방식이다 (Cabinet Office 2019). 본 연구에서는 DGPS 보정이 아닌 기준국 네트워크 기반 의 광역 보정항법 개념을 지역 위성항법시스템에 적용함으로서 오차요소 별 보정정보를 생성하고, 훨씬 광범위한 영역에서 균일 한 m급 성능 달성을 목표로 한다.

본 논문에서는 특히 한반도 좁은 영역의 기준국 네트워크를 기반으로 7기 위성으로 구성된 지역 위성항법시스템에 적합한 광역 보정정보 생성 알고리즘을 소개하고, 이를 지역 위성항법 사용자에게 적용했을 때 항법 정확도 성능을 시뮬레이션을 통해 분석한다 (Kim et al. 2020).

2. CORRECTION GENERATION METHOD FOR WAD-RNSS SYSTEM

2.1 Introduction of WAD-RNSS System

Fig. 1은 WAD-RNSS시스템의 개념도를 나타낸 것이다. WAD-RNSS 시스템은 항법 신호를 방송하는 지역 항법위성 (RNSS satellites), 항법 신호 측정치를 수집하는 다수의 기준국 (Reference Stations, RS), 측정치를 활용하여 SBAS와 유사한 광 역 m급 보정정보를 생성하는 중앙처리국(Central Processing Facility, CPF), 그리고 보정정보를 항법위성으로 업로드하기 위 한 통신국(Uplink Station, US)으로 구성된다. 지역 항법위성은 고유의 항법신호와 마치 SBAS처럼 m급 보정신호를 추가로 방송 하며, 사용자는 항법신호와 m급 보정신호를 사용하여 자신의 위 치를 정확하게 결정하게 된다.

미국의 Wide-Area Augmentation System (WAAS)와 같은 SBAS 시스템은 기준국이 대륙 급 광범위한 영역에 분산 배치되 므로 보정정보 생성 정확도가 아주 높다. 반면 WAD-RNSS 시스 템은 기준국 네트워크가 한반도 지역과 같이 매우 좁은 영역 내 분포할 수밖에 없기 때문에 이를 고려하여 적절한 보정정보 생성 알고리즘을 선택할 필요가 있다 (Kim 2007). 본 장에서는 WAD-RNSS 시스템에 적용한 위성 궤도/시계 보정정보 생성 기법과 전 리층 보정정보 생성 기법에 대해 소개한다.

2.2 Satellite Orbit and Clock Correction Generation Algorithm

사용자가 4개 이상 항법위성의 의사거리로부터 자신의 위치 와 시계 오차를 계산하는 항법해 추정의 기본원리를 역으로 이용 하면, 같은 위성을 바라보는 다수의 기준국에서 수집한 의사거리 를 기반으로 위성의 궤도와 시계 오차를 정확하게 추정할 수 있 다. 전리층 지연 오차는 이중 주파수 조합을 통해 제거하고, 대류 층 지연 오차는 Saastamoinen model과 같은 모델을 통해 제거하 면 위성 궤도 및 시계 오차 추정을 위한 의사거리 측정치 δρ는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\delta\rho = \delta\bar{R} \cdot \hat{e} - \delta b + \delta B + \varepsilon \tag{1}$$

모든 위성-기준국 간 측정치 ôp를 모아 관측 방정식을 구성하 면 미지수인 위성 궤도 오차 ôR, 위성 시계 오차 ôb, 기준국 시계 오차 ôB를 추정할 수 있다. 여기서 ĉ는 위성-기준국 간 시선 벡 터이며, ɛ는 의사거리 측정치 잡음이다. 의사거리 측정치 잡음은 mm급 반송파 위상 측정치를 활용한 Hatch filter와 같은 스무딩 기법을 통해 감소시킬 수 있다.

관측 방정식을 풀기 위한 방법으로 Least Square, Weighted Least Square 등 여러가지 추정 기법이 존재한다. 이 때 한반도 좁은 지역에 배치된 기준국 네트워크 특성 상 위성-기준국 간 거 리를 고려하면 마치 한 곳에 집중된 것처럼 분포하므로 고전적인 기법 적용 시 추정된 위성 궤도 및 시계 오차 추정 값이 실제와 달 리 매우 커지는 왜곡 문제가 발생하게 된다 (Fig. 2 참조). 이러한 문제를 해결하기 위하여 Minimum Variance (MV) 추정 기법을 활용한 위성 궤도 및 시계 보정정보 생성에 알고리즘이 제안된 바 있다 (Kim 2007, Han et al. 2017). MV 추정 기법은 a priori 정 보라고 하는 사전에 정의된 위성 오차의 통계적 공분산 값을 이 용하여 추정치와 추정 공분산의 크기를 제한함으로써 기준국 배 치가 좋지 않더라도 추정 성능을 유지할 수 있는 방법이다. 본 연



Fig. 2. Satellite orbit estimation under good and bad geometry.

구에서는 위성 궤도/시계 보정정보 생성을 위해 한반도 좁은 영 역 WAD-RNSS에 적합하다고 판단되는 MV 추정 기법을 적용하 였다. 추정 식과 추정 공분산은 Eqs. (2)와 (3)으로 표현된다.

$$\hat{x}_{MV} = (\Lambda^{-1} + H^T W^{-1} H)^{-1} H^T W^{-1} \bar{z}$$
⁽²⁾

$$\hat{P}_{MV} = (\Lambda^{-1} + H^T W^{-1} H)^{-1} \tag{3}$$

여기서 \hat{x}_{MV} 는 추정된 state 벡터로서 위성 궤도 및 시계 오차, 기 준국 시계 오차를 포함하고 있다. \hat{p}_{MV} 는 추정 공분산 행렬, H는 관측 행렬, W는 측정치 벡터 코의 잡음 공분산 행렬을 의미한다. Λ는 a priori 정보의 공분산 행렬이다. MV 추정 기법을 활용한 위 성 궤도/시계 보정정보 생성 알고리즘은 Kim (2007)과 Choi et. al. (2017)에서 상세하게 확인이 가능하다.

2.3 Ionospheric Correction Generation Algorithm

SBAS는 다수의 기준국으로부터 수집한 전리층 통과점 (Ionospheric Pierce Point, IPP)의 수직 전리층 지연 측정치들을 활용하여 미리 정의된 전리층 격자점 (Ionospheric Grid Point, IGP)의 수직 전리층 지연을 추정하고 이를 전리층 보정정보로 제 공한다. 대표적인 전리층 보정정보 생성 알고리즘으로 Inverse Distance Weighting (IDW) (Chao 1997), Planar Fit (Walter et al. 2001), Kriging (Blanch 2003), TRiangular INterpolation (TRIN) (Alleau et al. 2013) 등이 있다. 이 중에서 Kriging은 단순히 IGP 와 IPP 간 거리에 따른 가중치 만을 주던 기존 방법 대비 전리층 데이터의 공간적 상관 특성에 따른 공분산인 Variogram을 고려 하여 특정 지점의 전리층 지연을 최적으로 추정 가능한 기법으로 미국의 WAAS에서 적용 중인 알고리즘이다. Kriging 알고리즘은 국내 다양한 연구를 통해 한반도 좁은 영역에서도 전리층 모델링 에 활용 가능함이 확인된 바 있으며 (Choi et al. 2017, Han 2018), 본 연구에서도 WAD-RNSS의 전리층 보정정보 생성 알고리즘으 로 적용하였다. Kriging 알고리즘은 식 (4~7)과 같다.

Kriging 추정 알고리즘

$$\hat{I}_{V,IGP} = \bar{w}^T \bar{I}_{V,IPP} \tag{4}$$

Kriging 가중치

$$\overline{w} = [W - WG(G^TWG)^{-1}G^TW]\overline{c} + WG(G^TWG)^{-1}\overline{s} \quad (5)$$



Fig. 3. Conceptual figure of ionospheric correction generation.

$$W \triangleq (C+M)^{-1} \tag{6}$$

Kriging 추정 공분산

$$\sigma^{2}(\hat{I}_{V,IGP}) = \overline{w}^{T}C\overline{w} - 2\overline{w}^{T}\overline{c} + c_{0} + \overline{w}^{T}M\overline{w}$$
(7)

여기서 $\hat{I}_{V,IGP}$ 는 IGP의 수직 전리층 지연 추정값, $\sigma^2(\hat{I}_{V,IGP})$ 는 추 정 공분산을 의미한다. $\bar{I}_{V,IPP}$ 는 IGP 주변 IPP의 수직 전리층 지연 측정치 벡터를 의미한다. Kriging 가중치 \overline{w} 는 IGP와 IPP간 거리 에 따라 결정되며, G, \overline{s} 는 2차원 평면 모델링에 대한 구속조건과 관련된 항이고, C, \overline{c}, c_0 는 Variogram에 의해 결정되는 값이다. M은 IPP 측정치의 잡음 공분산이다. 각 Notation에 대한 정의와 상 세 알고리즘은 Spark et al. (2011)에서 확인할 수 있다.

IGP의 전리층 지연 추정 시 전리층 모델링의 왜곡을 막기 위해 Fig. 3과 같이 IGP 주변 지정된 반경 이내에 있는 IPP 측정치 중 IGP와 가까운 순서대로 검색하여 선별적으로 활용한다 (Pandya et al. 2007). 미국 WAAS의 경우 GPS 위성 수도 많고, 기준국도 미국 전역에 다수 분포하므로 반경 2,100 km 이내 최소 10개의 IPP만 있으면 IGP의 전리층 보정정보를 추정한다. 하지만 한반도 지역 WAD-RNSS의 경우 지역 항법위성 수가 7개의 불과 하고 기준국 수도 많지 않기 때문에 IPP 측정치의 수가 작을 뿐 아니라 분포 자체도 매우 좁다. 따라서 WAAS의 IPP 검색 알고리즘 파라 미터를 그대로 적용 시 전리층 보정정보 가용 영역 자체가 매우 좁다는 한계가 있다 (Kim et al. 2017). 이를 해결하기 위해 본 연 구에서는 5개의 IPP만 있어도 IGP의 전리층 지연을 추정할 수 있 도록 WAAS IPP 검색 알고리즘의 파라미터 중 최소 IPP 수를 5개 로 변경하여 사용하였다.

3. PERFORMANCE ANALYSIS OF WAD-RNSS SYSTEM

3.1 Simulation Configurations

본 연구에서는 한반도 지역 위성항법시스템과 광역 보정항법



Fig. 4. Ground track of RNSS orbit constellation (Choi et al. 2018).

 Table 1. RNSS signal error modeling methods.

RNSS error sources	Error modeling method
Satellite orbit error	1st order Markov process
Satellite clock error	1st order Markov process
Ionospheric delay	IONEX data (2014-09-01, Kp index 2.7)
	+ Obliquity factor
Tropospheric delay	WAAS troposphere model (with mapping function)
Receiver clock offset	2nd order Markov process
Receiver noise	Gaussian random (function of elevation angle)

의 성능을 시뮬레이션 기반으로 분석하기 위해 Choi et al. (2018) 이 제안한 다양한 한반도 지역 위성 궤도 설계(안) 중 3기의 정지 궤도 위성, 4기의 경사궤도 위성으로 구성된 총 7기의 Fig. 4와 같 은 항법위성 궤도 파라미터를 사용하여 모의하였다.

본 연구에서는 단순히 Dilution of Precision (DOP)에 User Equivalent Range Error (UERE)를 곱하여 나온 항법 성능이 아 닌 지역 위성항법시스템 항법 신호 측정치의 각 오차 요소를 실 제 환경과 유사하게 Table 1과 같이 모델링하여 시뮬레이션 하였 다. 특히 항법 성능에 가장 큰 영향을 미치는 전리층 지연은 Kp Index 2.7의 정상 환경에서 정밀 IONosphere EXchange (IONEX) 데이터를 활용하여 모델링하였다. 전리층 지연과 대류층 지연 은 각각 위성의 앙각에 대한 함수인 obliquity factor와 mapping function을 고려하였으며, 수신기 잡음도 다중경로오차를 포함하 여 위성 앙각에 대한 함수로 모델링 하였다.

2025년 1월 1일 (UTC), 24시간, 60초 간격 데이터를 모의하여 성능 분석을 수행하였으며, 기준국은 한반도 광역 배치되었다고 가정하였다. 사용자는 한반도 주변 위도 25°~50°, 경도 110°~140° 범위 내 2.5° 간격으로 분포한다고 가정하였다. Mask angle은 기 준국과 사용자 모두 5°이다.

3.2 Performance Analysis of WAD-RNSS Corrections

Fig. 5는 2장에서 서술한 WAD-RNSS 보정정보 생성 기법에 따라 시뮬레이션으로 생성한 보정정보의 성능을 사용자 거리 영 역에서 분석한 것이다. 본 연구에서 WAD-RNSS 사용자는 SBAS 사용자와 동일하게 DO-229D (RTCA 2006) 문서에 따라 보정 정보를 적용하였다. Fig. 5a는 위성 궤도 및 시계 보정정보의 성



Fig. 5. Accuracy of WAD-RNSS corrections; (a) satellite orbit and clock correction, (b) ionospheric correction.

능을 의미한다. 녹색선은 보정정보를 적용하지 않은 방송궤도력 자체의 오차를 나타내고, 파란선은 위성 궤도 및 시계 보정정보 를 적용한 후의 오차를 나타낸다. 모든 사용자 위치에 대해 RMS 4.20 m 수준의 지역 위성항법 방송 궤도력 오차는 WAD-RNSS 의 위성 궤도 및 시계 보정정보 적용 후 RMS 0.13 m로 오차가 97% 감소하였다. Fig. 5b는 전리층 보정정보의 성능을 나타낸 그 림이다. 녹색선은 대표적인 전리층 모델인 Klobuchar 모델을 적 용 후 잔여 오차를 나타내고, 파란선은 전리층 보정정보를 적용 한 후의 오차를 의미한다. 마찬가지로 모든 사용자 위치에 대해 Klobuchar 모델 적용 시 RMS 3.48 m의 잔여 오차가 WAD-RNSS 의 전리층 보정정보 적용 후 RMS 0.67 m로 오차가 81% 감소하였 다. 이러한 분석 결과를 통해 2장에서 소개한 광역 보정정보 생성 기법이 한반도 지역 위성항법에 적용이 적합함을 알 수 있다.

3.3 Performance Analysis of WAD-RNSS User Position Accuracy

Fig. 6은 한반도 지역 위성항법시스템 단독 항법과 광역 보정 항법 기술을 적용하였을 때 사용자의 Dilution of Precision (DOP) 과 수평/수직 위치 오차를 24시간 RMS 통계의 등고선 지도로 도 시한 것이다. 단독 항법 사용자는 Weighted Least Square (WLS)



Fig. 6. RMS contour map of user position accuracy; (a) HDOP, (b) VDOP, (c) HPE of RNSS users, (d) VPE of RNSS users, (e) HPE of WAD-RNSS users, (f) VPE of WAD-RNSS users.





Fig. 7. Histogram of user position accuracy; (a) HPE, (b) VPE.

기법으로 항법해를 계산했으며, WAD-RNSS 보정항법 사용자는 DO-229D (RTCA 2006) 문서에 따라 보정정보를 적용 후 WLS 기법으로 항법해를 계산하였다.

Figs. 6a,b는 각각 Horizontal DOP (HDOP)과 Vertical DOP (VDOP)을 나타낸다. 지역 위성항법시스템의 HDOP은 북쪽으 로 갈수록 나빠지며 한반도 중심에서 약 1.85이다. Figs. 6c,d는 지 역 위성항법시스템 단독 항법 시 사용자의 Horizontal Position Error (HPE)와 Vertical Position Error (VPE)을 의미한다. RNSS 단독 항법의 경우 항법 신호에 존재하는 잔여 오차요소들로 인해 HPE의 RMS 오차는 11.6 m이고, VPE의 RMS 오차는 9.7 m로 모두 10 m 수준이다. 지역 위성항법시스템 단독 항법 시 HPE는 HDOP 과 유사하게 북쪽으로 갈수록 성능이 저하되며, VPE는 HPE와 반 대로 남쪽으로 갈수록 성능이 저하됨을 알 수 있다. Figs. 6e,f는 지역 위성항법시스템의 정확도 성능 향상을 위해 광역 보정정보

를 적용한 WAD-RNSS 정확도 분석 결과이다. 보정 항법 시 HPE 와 VPE의 RMS 오차는 각각 2.5 m와 2.6 m로 지역 위성항법시스 템 단독 항법 보다 정확도 성능이 각각 78%, 73%로 대폭 향상됨 을 확인할 수 있다. Table 2는 시뮬레이션 결과 사용자 수평/수직 위치 정확도 통계 값을 요약한 것이며, Fig. 7은 사용자 수평/수직 위치 오차를 히스토그램으로 도시한 것이다. HPE는 Rayleigh 분포 형태를 따르며, VPE는 Gaussian 형태의 오차 분포가 나타 난다.

4. CONCLUSIONS

본 논문에서는 한반도 주변을 서비스하는 지역 위성항법시스 템을 가정하고, 정확도 성능을 향상시키기 위해 한반도 좁은 영 역 내 분포하는 기준국 네트워크 만을 활용하여 기존 전지구 위 성항법시스템에 적용되던 광역 보정항법 기술을 적용해보았다. 한반도 지역에 적합한 위성 궤도 및 시계 보정정보 및 전리층 보 정정보 생성 기법을 제시하였으며, 시뮬레이션 분석 결과 SBAS 와 유사하게 지역 위성항법에도 광역 보정정보 적용이 가능함을 확인하였다. 시뮬레이션을 통해 보정정보를 적용하지 않은 단독 항법 사용자와 보정정보를 적용한 보정항법 사용자의 위치 정확 도 성능을 분석하였다. 그 결과 지역 위성항법시스템 단독 항법 시 HPE와 VPE의 RMS 오차는 각각 11.6 m와 9.7 m이고, 광역 보 정항법 적용 후 HPE와 VPE가 각각 2.5 m와 2.6 m로 정확도가 각 각 78%, 73% 개선됨을 확인하였다. 본 연구 결과로부터 한반도 지역 위성항법시스템에 광역 보정항법 기술을 적용하면 지역 위 성항법 단독 항법보다 향상된 정밀 항법 성능을 기대할 수 있다.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, D. Kim, H. So, and J. Park; methodology, D. Kim and H. So; formal analysis, D. Kim; writing—original draft preparation, D. Kim; writing—review and editing, D. Kim, H. So and J. Park; project administration, J. Park.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Ahn, H., Song, C., Yu, J., & Kim, T. 2020, A study on strategy of securing international resources for establishment of the Korean Positioning System, STEPI Final Report
- Alleau, P., Buscarlet, G., Trilles, S., van Den Bosseche, M.,
 & Bigot, J. 2013, Comparative ionosphere electron content estimation method in SBAS performances,

in Proceedings of the 26th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2013), Nashville, TN, 16-20 Sep 2013, pp.2523-2532.

- Blanch, J. 2003, Using Kriging to bound satellite ranging errors due to the ionosphere, Ph.D. Dissertation, Stanford University, CA, USA.
- Cabinet Office 2019, Quasi-Zenith Satellite System Interface Specification Sub-meter Level Augmentation Service, IS-QZSS-L1S-004.
- Chao, Y. C. 1997, Real time implementation of the wide area augmentation system for the global positioning system with an emphasis on ionospheric modeling, Ph.D. Dissertation, Stanford University, CA, USA.
- Choi, B., Kim, D., Han, D., Kim, J. & Kee, C. 2017, Development of SBAS simulation software for analysis of KASS availability performance, in International Symposium on GNSS 2017, Hong Kong, China, 10-13 Dec 2017.
- Choi, M., Won, D.-H., Ahn, J., Sung, S., Lee, J., et al. 2018, Conceptual satellite orbit design for Korean navigation satellite system, Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci., 61, 12-20. https://doi.org/10.2322/tjsass.61.12
- Han, D. 2018, A study on improving the accuracy of SBAS ionosphere correction by applying double-difference carrier phase measurements, Ph.D. Dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea. http://hdl.handle. net/10371/140579
- Han, D., Kim, D., & Kee, C. 2017, Estimation of ephemeris error using Korean reference station, in Proceedings 2017 IPNT Conference, Jeju, Korea, 01-03 Nov 2017, pp.79-82.
- ICAO 2006, International Standards and Recommended Practices (SARPs), Aeronautical Telecommunications, Annex 10, Vol.1, 6th ed.
- Joo, J. M. & Heo, M. B. 2020, Korean Positioning System development plan, in Proceedings 2020 IPNT Conference, Yeosu, Korea, 11-13 Nov 2020, pp.29-30.
- Kaplan, E. D. & Hegarty, C. J. 2006, Understanding GPS: Principles and Applications, 2nd ed. (Norwood, MA: Artech House)
- Kee, C., Parkinson, B.W., & Axelrad, P. 1991, Wide area differential GPS, Journal of The Institute of Navigation, 38, 123-146. https://doi.org/10.1002/j.2161-4296.1991. tb01720.x
- Kim, D. 2007, A study on correction generation algorithms for wide area differential GNSS, Ph.D. Dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea.
- Kim, D., Han, D., Kee, C., Seo, S., & Park, J. 2017, A study on ionospheric pierce point search algorithm for

performance improving the SBAS ionospheric delay correction in the Korean region, in International Symposium on GNSS 2017, Hong Kong, China, 10-13 Dec 2017.

- Kim, D., So, H., & Park, J. 2020, Accuracy analysis of wide-area differential positioning based on regional navigation satellite system, in Proceedings 2020 IPNT Conference, Yeosu, Korea, 11-13 Nov 2020, pp.123-126.
- Pandya, N., Gran, M., & Paredes, E. 2007, WAAS performance improvement with a new undersampled ionospheric gradient threat model metric, in Proceedings of the 2007 National Technical Meeting of The Institute of Navigation, San Diego, CA, 22-24 Jan 2007, pp.291-304.
- RTCA 2006, Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System / Wide Area Augmentation System Airborne Equipment, RTCA DO-229D.
- Sparks, L., Blanch, J., & Pandya, N. 2011, Estimating ionospheric delay using Kriging: 1. methodology, Radio Science, 46. https://doi.org/10.1029/2011RS004667
- Walter, T., Hansen, A., Blanch, J., Enge, P., Mannucci, T., et al. 2001, Robust Detection of Ionospheric Irregularities, Journal of The Institute of Navigation, 48, 89-100. https://doi.org/10.1002/j.2161-4296.2001.tb00231.x
- Yun, S. E., Lee, E. S., Won, D. H., Hong, W. K., Kim, H. S., et al. 2020, A study on KASS control station implementation and verification, in Proceedings 2020 IPNT Conference, Yeosu, Korea, 11-13 Nov 2020, pp.21-24.



Donguk Kim is a senior researcher of Agency for Defense Development (ADD) in the Republic of Korea. He received the bachelor's degree in 2013 and the Ph.D. degree in 2020 from the mechanical and aerospace engineering of Seoul National University (SNU). He worked in the field of

centimeter-level GNSS augmentation systems and technology in SNU GNSS laboratory. He has been working for the ADD since Dec. 2019. His research interests include Satellite-Based Augmentation System (SBAS), Real-Time Kinematic (RTK), anti-jamming/anti-spoofing algorithm.



Hyoungmin So is a senior researcher of Agency for Defense Development (ADD) in Korea, Republic of. He received the B.S. degree in mechanical engineering at Korea University. He received the M.S. and Ph.D. degree in aerospace engineering at Seoul National University (SNU). He worked in the

field of GNSS and pseudolite receiver development including

SDR and vector tracking loop algorithm in SNU GNSS laboratory. Since 2011, he's been working for ADD. His research interests are GNSS receiver, anti-jamming/spoofing algorithm, and WADGPS technologies.



Junpyo Park received B.S. and M.S. degree in mechanical engineering at Pusan National Univ. and Ph.D. degree in aerospace engineering at Chung-nam National Univ. He is a principal researcher in the Agency for Defense Development, Korea. His research interests include integrity monitoring of

GNSS signal, pseudolites, and GNSS-related engineering problems.