

Trend and Analysis of Protection Level Calculation Methods for Centimeter-Level Augmentation System in Maritime

Jaeyoung Song, TaeHyeong Jeon, Gimin Kim, Sang Hyun Park, Sul Gee 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.

Trend and Analysis of Protection Level Calculation Methods for Centimeter-Level Augmentation System in Maritime

Jaeyoung Song, TaeHyeong Jeon, Gimin Kim, Sang Hyun Park, Sul Gee Park[†]

Maritime PNT Research Office, KRISO, Daejeon 34103, Korea

ABSTRACT

The International Maritime Organization (IMO) states that the recommended horizontal accuracy for coastal and offshore areas is 10 m, the Alert Limit (AL) is 25 m, the time to alert is 10 seconds, and the integrity risk (IR) is 10^{-5} per three hours. For operations requiring high accuracy, such as tugs and pushers, icebreakers, and automated docking, the IMO dictates that a high level of positioning accuracy of less than one meter and a protection level of 0.25 meters (for automated docking) to 2.5 meters should be achieved. In this paper, we analyze a method of calculating the user-side protection level of the centimeter-level precision Global Navigation Satellite System (GNSS) that is being studied to provide augmentation information for the precision Positioning, Navigation and Timing (PNT) service. In addition, we analyze standardized integrity forms based on RTCM SC-134 to propose an integrity information form and generate a centimeter-level precise PNT service plan.

Keywords: GNSS, integrity, protection level

1. 서론

위성항법시스템 (Global Navigation Satellite System, GNSS)을 이용한 Safety-of-Life 서비스 중 항공 분야에서 제공하는 정보의 정확성을 높일 수 있는 신뢰의 척도이며, 사전 정의된 위험 수준을 위반시 사용자에게 적시에 경고를 제공하는 기능을 포함하는 무결성이 처음 개발되어 도입되었다. (RTCA 2006, Zhu et al. 2018). 최근 항공 분야뿐만 아니라 육상의 철도, 자율주행차 (Peyret et al. 2015)와 해상의 자율운항선박이나 자동접안 분야 등 무인화가 진행됨에 따라 고정밀 보강서비스 연구가 활발히 진행되고 있으며, Safety-of-Life 서비스의 중요도가 증가하고 있다 (Zalewski 2020). 특히, 해양분야에서는 자율운항선박 및 자동접안등에 활용하기 위하여 국제해사기구 (International Maritime Organization, IMO)에서는 서비스 범위와 운영범위에 따라 보강

서비스의 정확도, 가용성, 연속성과 함께 무결성 정보의 요구성을 명시하고 있다. (IMO 2001).

가장 대표적인 정밀 보강서비스 시스템으로는 중파를 이용한 Differential GNSS(DGNSS)과 Geo-stationary 위성을 이용한 Satellite Based Augmentation System (SBAS)가 대표적이다. DGNSS는 국제해사기구에서 요구하는 정확도와 무결성 요구성을 만족하도록 보정정보를 제공한다. SBAS는 국제민간항공기구 (International Civil Aviation Organization)에서 국제표준으로 개발된 항법 시스템으로써 (RTCA 2006), 의사거리 기반의 보정정보와 무결성 정보를 제공한다. 현재 운영 및 개발 중인 SBAS로는 미국의 WAAS, 일본 MSAS, 인도 GAGAN, 유럽 EGNOS, 러시아 SDCM 등이 있으며, 그 이외 지역에서도 중국의 BDSBAS, 아프리카 A-SBAS, 호주-뉴질랜드 SPAN이 개발 준비중에 있다. WAAS는 높은 정확도와 무결성 정보를 제공하기 위해 L1/L5로 이중 주파수를 사용하는 연구가 진행중에 있다 (Simon et al. 2012).

해상의 자율운항선박이나 자동접안 등의 분야에서는 현재 제공하는 보강정보시스템의 미터급 정확도는 국제해사기구에서 요구하는 정확도 0.1m를 만족하기 어렵다. 따라서, RTK, PPP, PPP-RTK와 같이 센티미터 수준의 정밀 측위 기술을 이용해야 한다. 근거리 기준국과의 이중 차분을 통해 공통 오차를 제거하는 RTK 기법과 전세계 Continuously Operating Reference Stations (CORS) 망에서 추정된 위성궤도와 시계오차를 이용하

Received May 09, 2023 Revised Jun 12, 2023 Accepted Jul 27, 2023

[†]Corresponding Author

E-mail: sgpark@kriso.re.kr

Tel: +82-42-866-3685 Fax: +82-42-866-3689

Jaeyoung Song <https://orcid.org/0000-0002-3015-4567>

TaeHyeong Jeon <https://orcid.org/0000-0003-2599-1739>

Gimin Kim <https://orcid.org/0000-0002-7576-9565>

Sang Hyun Park <https://orcid.org/0000-0003-0113-891X>

Sul Gee Park <https://orcid.org/0000-0002-8620-8413>

는 PPP 기법이 있다. 하지만 RTK는 기선거리가 20 km 이내에서 성능을 만족하며, 기준국과의 기선거리가 멀어질수록 성능이 저하되는 단점이 있다. 반면에 PPP는 기준국과 기선거리의 의존하지 않지만 센티미터급 정확도로 수렴하는데 20~30분이 소요되는 단점이 존재한다. 이를 상호 보완하여 20km 보다 넓은 커버리지에서 오차 요소별로 서비스하여 짧은 수렴시간으로 센티미터급 정확도를 제공하는 PPP-RTK 기법은 현재 독일의 Geo++사의 GNSMART와 일본의 CLAS가 개발하여 방송하고 있다. 독일의 Geo++사의 GNSMART는 수십 초 내에 정적 측위 3 cm 수준의 위치 정확도를 제공하는 것으로 알려져 있다 (Wübbena et al. 2001). 일본의 CLAS는 QZSS 위성을 통하여 보정정보를 제공하고, 정적 측위의 경우 6 cm (95%)의 수평 방향 정확도를 제공한다 (Hirokawa et al. 2016). 그러나 GNSMART는 무결성 정보를 제공하지 않고, CLAS는 오차 요소별 무결성 정보와 도출 방식을 제공하지만 이에 대한 요구성능은 명시 되어있지 않다 (Cabinet Office 2022).

이와 같이, 현재 센티미터급 보정정보 시스템이 활발해짐에 따라 최근 해상무선기술위원회 (Radio Technical Commission for Maritime Services, RTCM)에서는 정밀 측위를 기반으로 하는 무결성 위원회인 RTCM SC-134가 구성되었다. 기존 보강시스템에서는 의사거리 측정치를 이용한 무결성 정보를 생성하였으나, 센티미터급 정확도에 맞는 보호수준을 도출하기 위해서는 의사거리뿐만 아닌 방송과 정보도 함께 사용하여 무결성 정보를 생성해야 한다. 또한, 보호수준을 계산하기 위해 사용자의 위치 영역의 표준편차를 계산해야 하며, 이는 칼만필터의 공분산 행렬을 사용하거나 PPP-RTK 기법이나 SBAS에서 제공하는 오차 요소의 표준편차를 바탕으로 계산되어야 한다. 본 논문은 센티미터급 보강시스템의 보강정보를 제공하기 위한 선행 연구로서 기존의 사용자 측면 보호수준 도출 기법을 소개하고 의사거리 및 방송과 기반의 보호수준 도출 동향을 분석하였다. 또한, RTCM SC-134에서 제공하는 Draft proposal를 기반으로 표준화된 무결성 형태를 분석하여 국내에서 개발 중인 센티미터급 PNT 서비스의 무결성 형태와 생성 방안에 대해 모색하였다.

2. 사용자 측면 보호수준 도출 기법

보호수준은 위치오차가 사전 지정된 위험수준을 초과하는 확률이 무결성 위험보다 작거나 같도록 통계적으로 유계된 값이다. 신뢰성을 확보할 수 있는 보호수준을 도출하기 위한 기본적인 가정은 모든 측정값이 독립적이고 평균이 0인 정규 분포를 이루는 것과 H_0 가설 (null hypothesis) 혹은 H_1 가설 (alternative hypothesis)을 만족하는 것이다.

사용자 수신기로부터 측정치를 수신하는 동안 거리 측정값에 대한 어떠한 결함도 없음을 나타내는 H_0 가설을 전제 조건으로 한다면, 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$XPL_{H_0} = K_{md} \sqrt{\sum_{i=1}^N S_{i,X}^2 \sigma_i^2} \quad (1)$$

여기서, σ_i 는 모든 오차 요소가 합해진 형태인 거리 영역에 대한

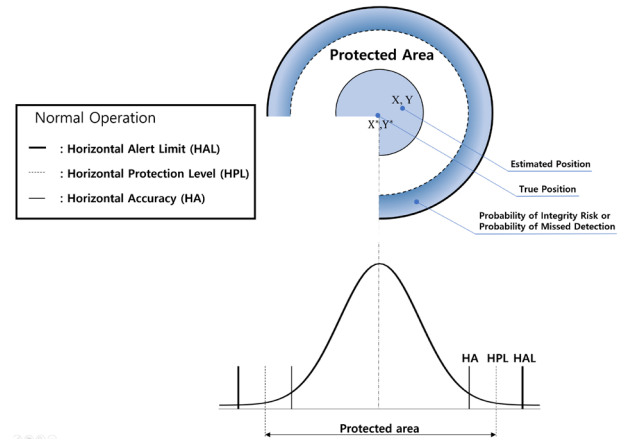


Fig. 1. The basic principle of the integrity states in horizontal area.

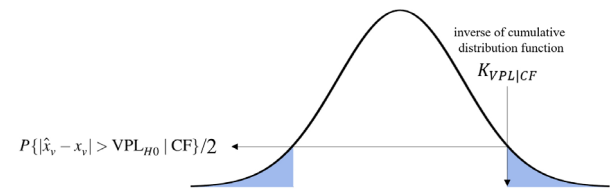


Fig. 2. The graphical interpretation of integrity risk and K factor.

오차 표준편차를 의미하고, $S_{i,X}^2$ 는 위치 영역으로 변환시키는 위성 관측행렬을 의미한다. K_{md} 는 지정된 무결성 위험으로 계산되는 상수를 의미하며, N 은 총 위성 개수를 의미한다.

사용자 수신기가 측정된 거리 측정값에 대해 하나 혹은 그 이상의 결함이 생겼음을 나타내는 H_1 가설은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. B_X 는 특정 결함 요소가 일으키는 편향을 나타낸다. Fig. 1은 수평 방향의 보호수준, 위험수준, 정확도에 대해 나타낸 그림이다.

$$XPL_{H_1} = |B_X| + K_{md} \sqrt{\sum_{i=1}^N S_{i,X}^2 \sigma_i^2} \quad (2)$$

여기서 K_{md} 는 사전 설정된 무결성 위험을 확률 분포 함수를 통해 Fig. 2와 같이 계산할 수 있으며, $\hat{x}$ 는 추정된 위치, x 는 실제 위치를 의미한다. 식 (1, 2)에서 거리 영역의 표준편차 σ_i 는 SBAS와 같은 보강시스템을 활용하여 제공받거나, 사용자가 자체적으로 위성 항법 신호를 통해 위치 불확실성을 계산할 수 있다.

2.1 의사거리 기반 보호수준 도출 기법

미국 항공 무선 기술 위원회 (Radio Technical Commission for Aeronautics, RTCA)에서 제공하는 SBAS 기반 사용자 측면의 수평 및 수직 보호수준을 도출 방정식은 식 (3, 4)와 같다 (RTCA 2006).

$$HPL = K_H \cdot \sigma_H, \quad VPL = K_V \cdot \sigma_V \quad (3)$$

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{\sigma_{east}^2 + \sigma_{north}^2}{2} + \sqrt{\frac{\sigma_{east}^2 - \sigma_{north}^2}{2} + \sigma_{EN}^2}} \quad (4)$$

여기서 σ_H 과 σ_V 는 위치영역에 대한 수평/수직 오차 표준편차를 의미하고, K_H 와 K_V 는 지정된 무결성 위험으로 계산되는 수평과 수직 방향에 대한 상수를 의미한다. 여기서, σ_{east}^2 , σ_{north}^2 , σ_{EN}^2 , σ_V^2 는 식 (5)에서 P인 공분산 행렬에서 도출한다. 수직과 수평 보호수준은 각각 σ_{east}^2 , σ_{north}^2 와 σ_V^2 를 고려하여 오차를 타원의 확률로 계산한다.

$$P = \begin{bmatrix} \sigma_{east}^2 & \sigma_{EN} & \sigma_{EU} & \sigma_{ET} \\ \sigma_{EN} & \sigma_{north}^2 & \sigma_{NU} & \sigma_{NT} \\ \sigma_{EU} & \sigma_{NU} & \sigma_U^2 & \sigma_{UT} \\ \sigma_{ET} & \sigma_{NT} & \sigma_{UT} & \sigma_t^2 \end{bmatrix} = (G^T W G)^{-1} \quad (5)$$

여기서, 관측 행렬인 G는 식 (6)과 같이 도출하고, 가중치 행렬인 W는 식 (7)과 같이 분산에 대한 대각행렬을 나타낸다.

$$G_i^T = \begin{bmatrix} -\cos(El_i) \cdot \sin(Az_i) \\ -\cos(El_i) \cdot \cos(Az_i) \\ -\sin(El_i) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$W^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_n^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서, El_i 과 Az_i 는 고도각과 방위각을 의미하며, σ_i 는 식 (8)과 같이 4가지 요소를 포함하고 있다.

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i,flt}^2 + \sigma_{i,UIRE}^2 + \sigma_{i,air}^2 + \sigma_{i,tropo}^2 \quad (8)$$

여기서 $\sigma_{i,flt}^2$ 는 fast and long-term 오차의 표준편차, $\sigma_{i,UIRE}^2$ 는 slant 방향의 전리층 오차의 표준편차, $\sigma_{i,air}^2$ 는 무전리층 조합의 잡음 및 다중경로 오차의 표준편차, 그리고 $\sigma_{i,tropo}^2$ 는 대류권 오차의 표준편차를 의미한다. 따라서 SBAS 시스템에서 무결성 정보는 특정 메시지 형태로 제공받거나 오차 모델에 기반한 상수로 계산되며, 계산된 σ_i 를 바탕으로 보호수준을 도출할 수 있다.

최근 SBAS는 L1/L5 이중 주파수를 활용하여 전리층 지연 오차를 제거하고, 다중 위성군을 활용하고 있다. 이는 식 (9)와 같은 무결성 정보를 제공하고, 1 m 미만 수준의 수평 위치 정확도는 5 m 이상의 수평 보호수준 (HPL) 수준의 결과를 제공한다 (Wu et al. 2020, Wang et al. 2021).

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i,DFC}^2 + \sigma_{i,air}^2 + \sigma_{i,tropo}^2 \quad (9)$$

여기서 $\sigma_{i,DFC}^2$ 는 이중 주파수의 위성 시계 및 궤도력 오차의 표준편차를 의미한다.

하지만 SBAS는 의사거리 측정치 오차의 분포가 정규분포를 따르지 않으며 편향을 가질 수 있기에 정규분포로 실제 오차에 유계되도록 펄싱 계수를 곱하여 무결성 정보를 방송한다. 이러한 무결성 정보는 과도하게 보수적인 값을 갖게 되며, 센티미터급 위성항법 보강시스템에 해당하는 보호수준을 제공하기에는 어렵다.

이에 평균이 0이 아니고 비대칭이며, 여러개의 local maximum value를 가지는 multimodal 인 모델을 유계할 수 있는 paired overbounding이나 excess mass overbounding와 같은 기법이 연구되었다 (Rife et al. 2004, 2006). 이는 모든 측정값이 독립적이고 평균이 0인 정규 분포를 이루지 않기 때문에, 측정치의 편

향 b와 표준 편차 σ 로 나누어 과도한 inflation을 줄이는 방식으로 보호수준을 도출한다. 또한, b와 σ 값에 따른 Trade-off가 존재하여 효율적으로 b와 σ 를 분리하기 위한 연구가 진행되고 있다 (Blanch et al. 2021).

2.2 반송파 기반 보호수준 도출 기법

의사거리 측정치를 활용하는 것과 다르게 반송파 측정치는 미지정수해의 모호성을 해결해야하는 문제점이 있다. 이러한 반송파 기반의 무결성 위험 요구사항을 충족시키기 위해서는 미지정수해 도출 및 검증, 사이클 슬립 감지 및 복구, 미지정수해를 잘못 도출할 확률과 같은 요소를 함께 고려해야한다 (Kim et al. 2022). 반송파 기반의 Receiver Autonomous Integrity Monitoring (RAIM)에 관한 지난 연구는 미지정수해를 위치 방정식에서 알려지지 않은 변수로 간주하여 계산하거나 이중 차분 관측값의 강한 상관관계 문제를 피할 수 있는 단일 차분 기반 방식을 활용하였다 (Chang et al. 2000, 2001). 하지만 전자는 미지정수해를 고정하지 않고 float 측정치를 사용하므로 미지정수해의 불확실성으로 인해 신뢰할 수 없으며, 후자는 float 기반 미지정수해와 수신기 시간 드리프트에 대한 단일 차분의 취약성으로 인해 신뢰성이 떨어질 수 있다 (Pervan et al. 2003).

2.2.1 Real-time Kinematic

칼만필터 기반 RTK 기법에서 보호수준을 도출하는 방식은 공분산 행렬 중 위치추정의 표준편차를 사용하거나 테스트 통계투영 방법을 이용하여 위치 오차에 투영하는 방법이 존재한다 (Feng et al. 2009). 공분산 행렬을 사용하는 방식은 측정 오차 공분산의 영향을 받은 칼만 이득 행렬을 사용하여 위치 오차의 불확실성을 계산한다. 이는 이중 차분한 의사거리와 반송파를 사용하여 반송파 미지정수해가 정확히 도출되었을 때, 식 (10, 11)과 같이 fixed된 상태 벡터와 공분산 행렬을 계산하여 도출한다 (Teunissen et al. 2014).

$$\tilde{b} = Q_b(G^T Q_\phi^{-1}(\phi - \Lambda \tilde{a}) + G^T Q_p^{-1}P) \quad (10)$$

$$Q_b = (G^T(Q_\phi^{-1} + Q_p^{-1})G)^{-1} \quad (11)$$

여기서 Q_p 와 Q_ϕ 는 이중 차분된 의사거리와 반송파 측정 오차 분산의 대각 행렬을 의미한다. Λ 는 위성 별 파장의 대각 행렬, $\tilde{a}$ 는 도출된 반송파 미지정수해, ϕ 는 이중 차분된 반송파 측정값, G는 pivot 위성과 각 위성들 간의 시선각 벡터의 차분 행렬을 의미한다. 도출된 사용자 위치 오차 분산 Q_b 의 좌표계는 ENU로 변환한다.

$$Q_{b,ENU} = T^T Q_b T = \begin{pmatrix} \sigma_e^2 & \sigma_{en} & \sigma_{eu} \\ \sigma_{ne} & \sigma_n^2 & \sigma_{nu} \\ \sigma_{ue} & \sigma_{un} & \sigma_u^2 \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$T = T_{ECEF2ENU} = \begin{pmatrix} -\sin(Lon) & \cos(Lon) & 0 \\ -\cos(Lon)\sin(Lat) & -\sin(Lon)\sin(Lat) & \cos(Lat) \\ \cos(Lon)\cos(Lat) & \sin(Lon)\cos(Lat) & \sin(Lat) \end{pmatrix} \quad (13)$$

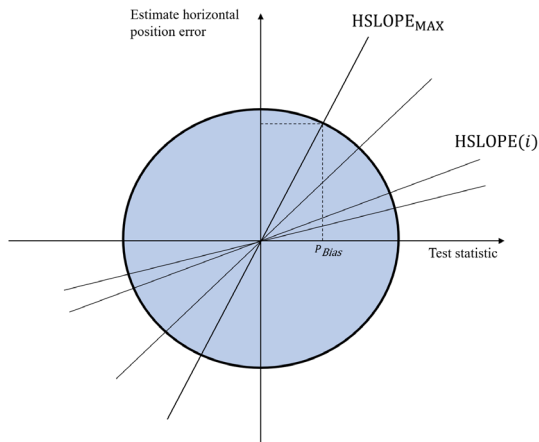


Fig. 3. Characteristic of the slopes on test statistics (Liu et al. 2011).

여기서, $\mathbf{Q}_b$ 는 ECEF 좌표계의 위치에 대한 공분산 행렬을 의미하며 T 는 ECEF 좌표계에서 ENU 좌표계로 변환하는 행렬을 의미한다. Lat 와 Lon 는 해당 지점에서의 위도와 경도를 의미한다. 계산된 ENU 좌표계의 위치 추정 분산을 식 (1)을 바탕으로 보호 수준을 계산할 수 있다.

칼만필터 이득 행렬을 활용하여 테스트 통계 투영 방법인 SLOPE를 사용해서 탐지하기 가장 어려운 위성을 식별하여 보호 수준을 도출하는 방식도 존재한다 (Liu et al. 2011). 이는 칼만필터의 관측 행렬과 이득 행렬에 기초하여 계산될 수 있다. 이 보호 수준 방식은 i 번째 위성신호에 고장이 있다는 가정을 세우고 이에 상응하는 SLOPE(i)을 식 (14, 15)와 같이 계산한다. Fig. 3은 최소한의 탐지 가능한 바이어스인 P_{bias} 를 바탕으로 위성신호 고장에 대한 수평 위치 오차의 민감도를 가시적으로 나타낸다.

$$HSLOPE(i) = \sqrt{(P_{E,i}^2 + P_{N,i}^2)/S_{ii}} \quad (14)$$

$$VSLOPE(i) = P_{U,i}/\sqrt{S_{ii}} \quad (15)$$

여기서 S_{ii} 는 대각 행렬 $S = (I - H_{RTK} * K_{RTK})^T (I - H_{RTK} * K_{RTK})$ 를 나타내고, I 는 단위 행렬, H_{RTK} 는 출력 행렬, P 는 칼만 필터의 공분산 행렬, 그리고 K_{RTK} 는 칼만필터 이득 행렬을 나타낸다. SLOPE인 $HSLOPE_{MAX}/VSLOPE_{MAX}$ 의 최댓값은 테스트 통계를 위치 오차에 투영하는데 사용된다. 여기서 테스트 통계치는 $\sqrt{\zeta^T (I - H_{RTK} K_{RTK})^T (I - H_{RTK} K_{RTK}) \zeta}$ 를 나타내며, ζ 는 측정치 오차 행렬을 의미한다. 보호수준은 최대 SLOPE 값과 P_{Bias} 를 곱하여 도출하며 P_{Bias} 는 감지할 수 있는 최소한의 bias를 의미한다.

$$HPL = HSLOPE_{MAX} P_{Bias} \quad (16)$$

$$VPL = VSLOPE_{MAX} P_{Bias} \quad (17)$$

하지만 칼만필터는 측정치 잡음을 uncorrelated white noise으로 가정하지만 실제 측정치는 잡음이 포함되어 있기에 칼만필터의 상태 변수를 사용하여 보호수준을 도출하면 지연 오차 잔차의 표준편차가 실제보다 훨씬 작게 계산될 수 있다. 이는 도출된 위치 오차가 보호수준을 넘는 무결성 훼손인 misleading information

과 hazardously misleading information이 발생하는 원인이 된다. 이는 측정 시간에 대한 오차 요소들이 correlated 되어있기 때문이며, 측정치의 시간 correlation을 고려한 선형화된 colored 칼만 필터를 도입하여 보호수준을 도출하는 연구 또한 진행되고 있다 (Pervan et al. 2003, Gao et al. 2021). 또는 INS와 같은 센서를 부착하여 추가적인 측정치 정보와 함께 보호수준을 도출하는 연구도 활발히 진행되고 있다 (Ochieng et al. 2010).

2.2.2 Precise point positioning

PPP는 기준국에서 생성되는 보정정보가 아닌, 구축된 CORS 망에서 계산하여 제공되는 위성 시각 오차나 궤도 보정정보만을 활용하여 정밀위치를 계산하는 방식이다. 이는 RTK와 달리 기준국과의 기선거리에 제약을 받지 않고 높은 정확도를 가지지만 오랜 수렴시간이 필요하다. 이러한 PPP 기법 방식 중에서 international GNSS service에서 제공하는 정밀 위성궤도 보정정보를 받아 위성 궤도 오차를 보정하며 칼만필터를 사용하여 이외의 오차를 측정하여 단일 수신기에서 정밀한 절대 위치좌표를 구하는 방식이 존재한다. 이는 사용자 수신기에 따라 전리층 지연 오차를 제거할 수 있으며 반송파에 포함된 미지정수를 float으로 구하는 특성이 있다.

칼만필터 기반 PPP 알고리즘은 상태변수인 공분산 행렬 속 위치 추정 표준편차를 사용하지만, 보호수준 도출을 위해 칼만필터 공분산 행렬에서 고려하지 않는 위성 시계, 위성 궤도와 같은 편향을 고려하도록 조정해야 한다 (Jokinen et al. 2013). 칼만필터 기반 PPP 알고리즘에서 보호수준은 사용자 위치의 오차 분산 Q 를 식 (12, 13)에 대입하여 σ_H 와 σ_V 를 계산한다. 모델링되지 않은 위성 궤도, 위치 변위, 대류권 지연과 같은 비 가우시안 오류로 인해 발생하는 nominalBias가 있다고 가정하며, 이는 경험적인 측정값으로 5 cm로 나타낸다 (Gunning et al. 2018). 수평과 수직 방향의 보호수준 산출은 식 (21, 22)와 같이 계산한다. H_{PPP} 는 출력 행렬, R_{PPP} 는 측정치 공분산 행렬을 나타낸다.

$$G = (H_{PPP}^T R_{PPP}^{-1} H_{PPP})^{-1} H_{PPP}^T R_{PPP}^{-1} \quad (18)$$

$$ah = \sum_{i=1}^n \left(\sqrt{G_{1,i}^2 + G_{2,i}^2} \right) \quad (19)$$

$$av = \sum_{i=1}^n |G_{3,i}| \quad (20)$$

$$HPL = k_H \sigma_H + \text{nominalBias} * ah \quad (21)$$

$$VPL = k_V \sigma_V + \text{nominalBias} * av \quad (22)$$

2.2.3 Precise point positioning real-time Kinematic

PPP-RTK는 기존 PPP 방식의 위성 궤도 오차에 전리층 지연, 대류권 지연 및 위성 하드웨어 편향 측정값도 제공하여 단일 수신기가 반송파 미지정수해를 도출할 수 있는 방식을 사용한다. PPP-RTK 보정정보 생성을 위해 지상시스템은 위성간 단일 차분된 측정치를 통해 보정정보를 생성하는 방식과 (Bisnath & Collins 2012, Zhang & Li 2013), undifferenced and uncombined 형태로 측정값 모델을 구성하는 방식등이 있다. (Odijk et al.

2016). PPP-RTK의 보호수준 도출은 사용자 위치 오차 분산-공분산 행렬과 다중경로 및 잡음의 모델을 통해 보호수준을 도출하고 분석하는 연구가 진행되고 있다 (Wang et al. 2022).

보호수준 산출 방식은 수평 방향 Probability of Misleading Information (PMI)와 사용자 위치 오차 분산-공분산 행렬, 그리고 시간에 따라 전파의 편향을 바탕으로 계산되었다. 이는 도출된 보호수준의 크기나 수렴 시간은 사용자 다중 경로 환경, 전리층 활동, 네트워크 규모, PMI 등 다양한 요인에 의해 영향을 미치는 것으로 나타났다. 40 km 이내의 기준국 네트워크, horizontal PMI가 2×10^{-6} , 다중경로 오차가 존재하지 않는 조건 안에서 L1, L5 다중주파수와 GPS, Galileo, BDS 다중위성군을 활용하였을 때, HPL은 약 1.5 m로 수렴하는 것을 확인하였다 (Wang et al. 2022).

CLAS에서 제공하는 오차 요소 별 무결성 정보는 보호수준 도출에 활용할 수 있으며, 식 (23)은 각 오차 요소를 거리 영역의 총 표준편차로 계산하는 식이다 (Cabinet Office 2022).

$$\sigma_i = \sqrt{(\sigma_{i, \text{user}})^2 + (\sigma_{i, \text{sis}}/10)^2 + \left(\frac{40.3 \times 10^{16}}{\text{freq}^2} \sigma_{i, \text{iono}} \times 100\right)^2 + \left((\sigma_{i, \text{trop}}/10)/\sin E_i\right)^2} \quad (23)$$

여기서, $\sigma_{i, \text{user}}$ 는 다중 경로와 같은 지역 오류, $\sigma_{i, \text{sis}}$ 는 CSSR GNSS user range accuracy 메시지가 제공하는 위성의 궤도, 시계, 신호 바이어스 등과 같은 signal in space를 의미하며, $\sigma_{i, \text{iono}}$ 는 CSSR STEC correction 메시지가 제공하는 전리층 지연 추정 오차, $\sigma_{i, \text{trop}}$ 는 CSSR gridded correction 메시지가 제공하는 대류권 지연 추정 오차, E_i 는 위성 고도각, 그리고 freq 는 주파수를 의미한다. 일본은 독자적인 격자점을 구성하여 12개의 network ID와 네트워크 별 grid point로 구성하여 보정정보와 무결성 정보에 맞게 제공한다.

PPP-RTK 기반 보호수준 산출 방식은 측정값의 공분산을 사용하는 것이 아닌 SBAS와 동일하게 방송되는 오차 요소의 표준편차를 사용하여 계산하는 방식이다. GEONET를 통해 일본 CLAS 네트워크에 포함된 기준국 측정치와 CLAS CSSR 무결성 정보 기반으로 보호수준을 산출한다면, HPL < 1 m (99.4%), VPL < 3 m (99.6%)의 무결성 정보를 제공하는 것으로 확인하였다 (Kim et al. 2022). 이는 센티미터급 정확도를 제공하는데도 보호수준이 유계되는 것은 각 오차 요소가 유계되어 합쳐지면서 미터 레벨의 결과가 나오는 것으로 예상된다.

3. 센티미터급 보강정보 서비스를 위한 연구 방향

보호수준 산출 관점에서는 센티미터급 보강정보를 제공하기 위해서는 PPP-RTK 기법과 함께 방송파 기반 무결성 정보 생성에 대한 필요성이 대두된다. PPP-RTK 기법에서는 방송파 위상 측정값에 포함된 미지정수해가 옳게 추정되지 않을 경우 위치 추정 오차에 큰 영향을 끼치게 되므로 미지정수해가 올바르게 도출될 확률 또한 보호수준에 반영되어야 하며 (Khanafseh & Pervan 2010), 한국의 협소한 기준국 분포로 인해 전리층 오차의 추정이 어려워 전리층의 무결성 정보를 생성하는 조건도 고려되어야 한다. 이에 PPP-RTK 기반 무결성 정보를 사용하여 센티미터급의 보호수준을 만족하기 어려울 가능성이 있으며, 추가적으로 보호

Table 1. Contents of the satellite-specific message: Extended augmentation health message.

	Data field	DF number	Data type	No. of bits
$\sigma_{ob, \rho}^{aug}$	Overbounding standard deviation of the pseudorange augmentation message error under Fault-Free scenario	DFi036	uint5	5
	Overbounding bias of the long-term pseudorange augmentation message bias error under Fault-Free scenario	DFi037	uint4	4
$\sigma_{ob, \phi}^{aug}$	Overbounding standard deviation of the carrier phase augmentation message error under Fault-Free scenario	DFi038	uint5	5
	Overbounding bias of the long-term carrier phase Augmentation message bias error under Fault-Free scenario	DFi039	uint4	4

수준을 줄이기 위해 solution separation과 colored 칼만필터 기반 RAIM 방식을 사용하는 방법, 혹은 PPP-RTK network의 integrity monitoring을 통해 위성 고장과 같은 무결성 위협을 완화시키는 방법을 고려해야 한다. 하지만, 현재 방송파 기반 무결성 정보 생성에 대한 연구는 진행 중이며, 아직까지 개발된 기법이 뚜렷이 존재하지 않아 추가적인 분석이 필요할 것으로 보인다.

결과적으로 무결성 정보 송출 시, 보수적인 거리 영역의 $\sigma_{\text{overbounding}}$ 송출은 위치 영역의 $\sigma_{\text{overbounding}}$ 을 더욱 크게 유계하도록 야기하며 RTK 결과의 위치 오차보다 보수적으로 보호수준을 야기한다. 보호수준을 정밀하게 산출하기 위해서는 무결성 정보의 크기를 줄이는 것이 우선적인 방법이며, paired overbounding이나 excess mass overbounding와 같이 보정정보 잔차의 표준편차를 b 와 σ 로 분리하여 기존 무결성 보장 기준에 부합하는 보호수준 도출이 가능한 것으로 판단된다.

현재 RTCM에서 GNSS의 무결성 메시지를 정의하기 위해 RTCM SC-134 조직을 구성하였다. 여기서는 무결성 정보에 대한 표준화 방식을 제안하였으며, 현재는 무결성 정보와 메시지 타입에 대한 표준화가 진행 중이다. RTCM SC-134에서 제공하는 draft proposal에 따르면 State Space Representation (SSR)과 Observation State Representations (OSR) 데이터의 신뢰도를 나타내는 무결성 정보는 의사거리와 방송파에 대한 b 와 σ 를 같이 제공하여 보호수준을 도출하는 기법을 활용하고 있다. 이는 무결성 메시지 표준화를 위해 메시지 필드를 의미하며, Table 1과 같이 명시되어 있다. 하지만 이러한 무결성 정보를 제공하는 것에 대한 타당한 방식이나 PPP-RTK 적용에 대한 방법론과 테스트 결과가 존재하지 않기에 차후 개선점을 지켜보아야 한다.

4. 결론

센티미터급 위성항법 보강시스템에 상응하는 센티미터급 무결성 정보를 제공하기 위해서는 방송파 기반의 무결성 정보 생성 알고리즘과 생성 시 보정정보의 오차가 보수적으로 유계되어 보호수준이 크게 계산되지 않도록 해야 한다. 이에 본 논문에서는 기존의 사용자 측면 보호수준 도출 기법을 소개하고 의사거리 및 방송파 기반의 보호수준 도출 동향을 분석하였으며, RTCM SC-134를 바탕으로 현재 표준화되어지는 무결성 정보의 형태와 방식

을 분석하였다.

본 연구를 통한 선행 연구와 국제 표준화 작업 분석에 따라 앞으로 개발될 PPP-RTK 서비스 기반 무결성 정보 생성과 사용자 측면 보호수준 도출 기법을 구체화하여 실제 서비스에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 논문은 해양수산부 재원으로 국가연구개발사업인 “지상기반 센티미터급 해양 정밀 PNT 기술개발”에 의해 수행되었습니다 (1525012253).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, S.G.P and S.H.P; methodology, J.S.; software, J.S., G.K. and T.J.; validation, J.S., G.K., T.J. and J.S.; formal analysis, J.S., G.K. and T.J.; investigation, J.S.; resources, S.G.P, J.S., T.J., and G.K; data curation, J.S., G.K and T.J.; writing— original draft preparation, J.S.; writing—review and editing, S.G.P; supervision, S.H.P; project administration, S.G.P; funding acquisition, S.H.P.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Bisnath, S. & Collins, P. 2012, Recent developments in precise point positioning, *Geomatica*, 66, 103-111. <https://doi.org/10.5623/cig2012-023>
- Blanch, J., Liu, X., & Walter, T. 2021, Gaussian Bounding Improvements and an Analysis of the Bias-sigma Tradeoff for GNSS Integrity, In *Proceedings of the 2021 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*, 25-28 January 2021, pp.703-713. <https://doi.org/10.33012/2021.17861>
- Cabinet Office 2022, Quasi-Zenith Satellite System Interface Specification Centimeter Level Augmentation Service (IS-QZSS-L6-005)
- Chang, X. W., Paige, C. C., & Perepetchai, V. 2001, Integrity methods using carrier phase, In *Proceedings of International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation (KIS 2001)*, Banff, Alberta, Canada, 5-8 June 2001.
- Chang, X. W., Paige, C. C., & Studenny, J. 2000, Two carrier phase based approaches for autonomous fault detection and exclusion, In *Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2000)*, Salt Lake City, UT, 19-22 Sept 2000, pp.1895-1905
- Feng, S., Ochieng, W., Moore, T., Hill, C., & Hide, C. 2009, Carrier phase-based integrity monitoring for high-accuracy positioning, *GPS solutions*, 13, 13-22. <https://doi.org/10.1007/s10291-008-0093-0>
- Gao, Y., Jiang, Y., Gao, Y., & Huang, G. 2021, A linear Kalman filter-based integrity monitoring considering colored measurement noise, *GPS Solutions*, 25, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s10291-021-01086-2>
- Gunning, K., Blanch, J., Walter, T., de Groot, L., & Norman, L. 2018, Design and evaluation of integrity algorithms for PPP in kinematic applications, In *Proceedings of the 31st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2018)*, Miami, Florida, 24-28 September 2018, pp.1910-1939. <https://doi.org/10.33012/2018.15972>
- Hirokawa, R., Sato, Y., Fujita, S., & Miya, M. 2016, Compact SSR messages with integrity information for satellite based PPP-RTK service, In *Proceedings of the 29th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2016)*, Portland, Oregon, 12-16 September 2016, pp.3372-3376. <https://doi.org/10.33012/2016.14794>
- IMO 2001, Revised Maritime Policy and Requirements for a Future Global Navigation Satellite System (GNSS), A.915(22)
- Jokinen, A., Feng, S., Schuster, W., Ochieng, W., Hide, C., et al. 2013, Integrity monitoring of fixed ambiguity Precise Point Positioning (PPP) solutions, *Geo-spatial Information Science*, 16, 141-148. <https://doi.org/10.1080/10095020.2013.817111>
- Kim, E., Song, J., Shin, Y., Kim, S., Son, P. W., et al. 2022, Fault-Free Protection Level Equation for CLAS PPP-RTK and Experimental Evaluations, *Sensors*, 22, 3570. <https://doi.org/10.3390/s22093570>
- Khanafseh, S. & Pervan, B. 2010, New approach for calculating position domain integrity risk for cycle resolution in carrier phase navigation systems, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 46, 296-307. <https://doi.org/10.1109/TAES.2010.5417163>
- Liu, J., Tang, T., Gai, B., Wang, J., & Chen, D. 2011, Integrity assurance of GNSS-based train integrated positioning system, *Science China Technological Sciences*, 54, 1779-1792. <https://doi.org/10.1007/s11431-011-4395-z>
- Miya, M., Fujita, S., Sato, Y., Ota, K., Hirokawa, R., et al. 2016, Centimeter Level Augmentation Service (CLAS) in Japanese quasi-zenith satellite system, its user interface,

- detailed design, and plan, Proceedings of the 29th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2016), Portland, Oregon, 12-16 September 2016, pp.2864-2869. <https://doi.org/10.33012/2016.14644>
- Ochieng, W. Y., Feng, S., Moore, T., Hill, C., & Hide, C. 2010, User Level Integrity Monitoring and Quality Control for High Accuracy Positioning Using GPS/INS Measurements, Positioning (POS) Journal Information, 14, 2573-2583
- Odijk, D., Zhang, B., Khodabandeh, A., Odolinski, R., & Teunissen, P. J. 2016, On the estimability of parameters in undifferenced, uncombined GNSS network and PPP-RTK user models by means of S-system theory, Journal of Geodesy, 90, 15-44. <https://doi.org/10.1007/s00190-015-0854-9>
- Pervan, B., Chan, F. C., Gebre-egziabher, D., Pullen, S., Enge, P., et al. 2003, Performance analysis of carrier-phase DGPS navigation for shipboard landing of aircraft, Navigation, 50, 181-191. <https://doi.org/10.1002/j.2161-4296.2003.tb00328.x>
- Peyret, F., Gillieron, P. Y., Ruotsalainen, L., & Engdahl, J. 2015, Better use of global navigation satellite systems for safer and greener transport, IFSTTAR, Bron, France, SaPPART White Paper COST TU1302. https://www.researchgate.net/publication/305724028_Better_use_of_Global_Satellite_Systems_for_Safer_and_Greener_Transport
- Rife, J., Pullen, S., Enge, P., & Pervan, B. 2006, Paired overbounding for nonideal LAAS and WAAS error distributions, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 42, 1386-1395. <https://doi.org/10.1109/TAES.2006.314579>
- Rife, J., Pullen, S., Pervan, B., & Enge, P. 2004, Paired overbounding and application to GPS augmentation, In PLANS 2004. Position Location and Navigation Symposium, Monterey, CA, 26-29 April 2004, pp.439-446
- RTCA 2006, Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System / Wide Area Augmentation System Airborne Equipment, RTCA DO-229D
- Simon, J., Ostolaza, J., Moran, J., Fernandez, M., Caro, J., et al. 2012, On the Performance of Dual-frequency Multi-constellation SBAS: Real Data Results with Operational State-of-the-art SBAS Prototype, In Proceedings of the 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2012), Nashville, TN, 17-21 September 2012, pp.1298-1309. <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=10343>
- Teunissen, P. J. G., Odolinski, R., & Odijk, D. 2014, Instantaneous BeiDou+GPS RTK positioning with high cut-off elevation angles, Journal of geodesy, 88, 335-350. <https://doi.org/10.1007/s00190-013-0686-4>
- Wang, K., El-Mowafy, A., Qin, W., & Yang, X. 2022, Integrity monitoring of PPP-RTK positioning; Part I: GNSS-based IM procedure, Remote Sensing, 14, 44. <https://doi.org/10.3390/rs14010044>
- Wang, K., El-Mowafy, A., Rizos, C., & Wang, J. 2021, SBAS DFMC service for road transport: positioning and integrity monitoring with a new weighting model, Journal of Geodesy, 95, article id.29. <https://doi.org/10.1007/s00190-021-01474-z>
- Wu, J., Wang, K., & El-Mowafy, A. 2020, Preliminary performance analysis of a prototype DFMC SBAS service over Australia and Asia-Pacific, Advances in Space Research, 66, 1329-1341. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.05.026>
- Wübbena, G., Bagge, A., & Schmitz, M. 2001, Network-based techniques for RTK applications, in GPS Symposium, GPS JIN, Tokyo, Japan, 14-16 Nov 2001.
- Zalewski, P. 2020, Integrity concept for maritime autonomous surface ships' position sensors, Sensors, 20, 2075. <https://doi.org/10.3390/s20072075>
- Zhang, X. & Li, P. 2013, Assessment of correct fixing rate for precise point positioning ambiguity resolution on a global scale, Journal of Geodesy, 87, 579-589. <https://doi.org/10.1007/s00190-013-0632-5>
- Zhu, N., Marais, J., Bétaille, D., & Berbineau, M. 2018, GNSS position integrity in urban environments: A review of literature, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 19, 2762-2778. <https://doi.org/10.1109/TITS.2017.2766768>



Jaeyoung Song is a researcher in maritime PNT research office. He received B.S. and M.S. degrees from Hongik University Republic of Korea. His current research focus on RTK, integrity monitoring.



TaeHyeong Jeon is researcher of maritime PNT research office. He received B.S. and M.S. degrees from Hankyong National University, Republic of Korea. His current research interests include PPP-RTK and GNSS/IMU fusion.



Gimin Kim is a researcher in maritime PNT research office. He received his B.S. and M.S. in Astronomy from Yonsei University in 2018 and 2020, respectively. His current research interests cover PPP-RTK, regional PPP, network RTK, ionosphere scintillation, satellite orbit determination and crustal deformation.



Sang Hyun Park is the head, maritime PNT research office and principal researcher the maritime PNT research centre at the Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO). He received the B.S., M.S., and Ph.D. degrees from Chungnam National University, Republic of Korea. He had worked as a senior research engineer at Automotive Electronic R&D Center for Hyundai-Kia Motors. He has been involved in lots of radio navigation-related research projects such as a vessel berthing system using GPS, DGNSS reference stations and integrity monitors, eLoran system, etc. His current research interests focus on resilient PNT systems for e-Navigation.



Sul Gee Park is the general management team leader, maritime PNT research office and senior engineer of the maritime PNT research centre at Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering. She received B.S. and M.S. degrees from Chungnam National University Republic of Korea. Her current research focus on PPP-RTK, eLoran system and integrity monitoring.