

# Development of Real-time Mission Monitoring for the Korea Augmentation Satellite System

Daehee Won<sup>1†</sup>, Koontack Kim<sup>2</sup>, Eunsung Lee<sup>1</sup>, Jungja Kim<sup>3</sup>, Youngjae Song<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Satellite Ground Station R&D Division, Korea Aerospace Research Institute, Daejeon 34133, Korea

<sup>2</sup>SBAS System Engineering & Integration Team, Korea Aerospace Research Institute, Daejeon 34133, Korea

<sup>3</sup>KCEI, M&S Research Institution, Seoul 08390, Korea

<sup>4</sup>JIT Solution, SW Division, Daejeon 34016, Korea

## ABSTRACT

Korea Augmentation Satellite System (KASS) is a satellite-based augmentation system (SBAS) that provides approach procedure with vertical guidance-I (APV-I) level corrections and integrity information to Korea territory. KASS is used to monitor navigation performance in real-time, and this paper introduces the design, implementation, and verification process of mission monitoring (MIMO) in KASS. MIMO was developed in compliance with the Minimum Operational Performance Standards of the Radio Technical Commission for Aeronautics for Global Positioning System (GPS)/SBAS airborne equipment. In this study, the MIMO system was verified by comparing and analyzing the outputs of reference tools. Additionally, the definition and derivation method of accuracy, integrity, continuity, and availability subject to MIMO were examined. The internal and external interfaces and functions were then designed and implemented. The GPS data pre-processing was minimized during the implementation to evaluate the navigation performance experienced by general users. Subsequently, tests and verification methods were used to compare the obtained results based on reference tools. The test was performed using the KASS dataset, which included GPS and SBAS observations. The decoding performance of the developed MIMO was identical to that of the reference tools. Additionally, the navigation performance was verified by confirming the similarity in trends. As MIMO is a component of KASS used for real-time monitoring of the navigation performance of SBAS, the KASS operator can identify whether an abnormality exists in the navigation performance in real-time. Moreover, the preliminary identification of the abnormal point during the post-processing of data can improve operational efficiency.

**Keywords:** KASS, performance, monitoring, real-time

## 1. INTRODUCTION

Korea Augmentation Satellite System (KASS)는 국토교통부가 주관하고 한국항공우주연구원에서 개발 중인 Satellite

Based Augmentation System (SBAS)이다. KASS는 국제민간항공기구 (International Civilian Aviation Organization, ICAO)의 Standards and Recommended Practices Annex 10 (ICAO 2006)에 정의된 SBAS 요구사항을 준수하여 개발하며, Approach Procedure with Vertical Guidance I (APV-I) 성능 제공을 목표로 한다. 개발 완료 시 대한민국 및 인천 비행정보구역 (Flight information region)에 SBAS 보정 정보와 무결성 정보를 제공한다 (Kim et al. 2021, Son et al. 2022).

KASS 기준국 (KASS Reference Station, KRS)에서 위성항법 신호를 수신하여 중앙처리국 (KASS Processing Station, KPS)으로 전송하고, 중앙처리국은 보정정보 및 무결성 정보를 계산하여 SBAS 표준 메시지를 생성한다. 생성된 메시지는 위성통신국 (KASS Uplink Station, KUS)에서 SBAS 신호로 변환되어, 최종적

Received Jan 17, 2023 Revised Feb 02, 2023 Accepted Feb 14, 2023

<sup>†</sup>Corresponding Author

E-mail: dhw@kari.re.kr

Tel: +82-42-860-2709 Fax: +82-42-879-4465

Daehee Won <https://orcid.org/0000-0003-3183-1352>

Koontack Kim <https://orcid.org/0000-0001-9013-4763>

Eunsung Lee <https://orcid.org/0000-0003-4565-5863>

Jungja Kim <https://orcid.org/0000-0003-1659-4811>

Youngjae Song <https://orcid.org/0000-0002-4967-962X>

으로 정지궤도위성 (Geostationary Orbit, GEO)을 통해 방송됨으로써 사용자에게 SBAS 서비스를 제공한다. KASS는 통합운영국에서 실시간으로 각 하위시스템의 동작 상태를 감시하고 제어 명령을 전송하여 운영한다. 이후 내부에서 생성된 데이터를 기록하고 수집하여 일 단위, 월 단위의 항법성능을 분석한다. 기존 SBAS와 달리 KASS는 SBAS 서비스의 항법성능을 실시간으로 감시하는 기능을 포함한다. 정지궤도위성에서 방송하는 SBAS 신호를 기준국에서 수신하고, 수신된 정보를 통합운영국 내의 임무 성능감시도구 (Mission Monitoring, MIMO)에 제공하여 정확성, 무결성, 연속성, 가용성의 KASS 성능을 실시간으로 감시한다.

항법성능 도출을 위해 필요한 SBAS 보정 과정은 RTCA의 Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Satellite-Based Augmentation System Airborne Equipment (RTCA 2006)을 준수하여 개발되었다. 본 논문은 KASS의 실시간 항법성능 감시 기능을 담당하는 MIMO의 설계, 구현 및 검증에 이르는 개발 사례에 대하여 소개한다.

기존 KASS 성능감시 연구 중 Won & Lee (2021)는 KASS 개발 과정에서 실제 데이터의 부재로 인해 기본적인 SBAS 보정정보 계산에 국한된 Prototype을 개발하였다. 유럽 내의 임의의 지역을 대상으로 유럽 SBAS인 European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS)의 데이터를 사용하여 보정정보를 계산하였다. Receiver Independent Exchange Format (RINEX)와 EGNOS Message Server (EMS)를 입력 데이터 형식으로 사용하였으며, KASS 개발의 직접적인 적용에 제약이 존재하였다.

Choi et al. (2016)은 KASS 시스템의 운용성능을 평가하기 위한 운용시험평가 도구 개발 연구를 수행하였으며, SBAS 데이터를 일정 기간 단위로 수집 후 데이터 후처리하여 성능을 분석하는 방법을 제시하였다. Authie et al. (2017)은 KASS 중앙처리국의 메시지 생성 성능을 검증하고, 중앙처리국 알고리즘이 기준 성능을 만족하는지 확인하는 연구를 수행하였다. Choi et al. (2018)은 Minimum variance estimator와 Kriging 알고리즘을 사용하여 사용자의 무결성 정보 생성에 대하여 연구하였다. 앞서 언급한 선행 연구는 실시간 동작을 고려하지 않았으며, 항법성능 감시가 아닌 보정정보 생성 및 적용에 중점을 두고 있다. 이로 인해, 실시간 MIMO 개발에 활용하는 것이 제한되었다.

MIMO 개발을 위해서는 KASS 데이터 형식에 부합하는 입력 구조를 가지며, 동시에 실시간으로 SBAS 항법 성능을 도출하고 감시하여 분석 결과를 표출할 수 있는 시스템이 필요하다. 항법성능 분석의 기능적 측면 이외에도, 실제 운용을 위한 이벤트 생성 및 관리 기능이 보완되어야 한다.

본 연구에서는 기존의 MIMO prototype (Won & Lee 2021)을 확장 및 보완하여 실시간 동작 SW를 개발하였다. 먼저 KASS 운용환경에 부합하도록 KASS 기준국 데이터를 입력값으로 사용하였으며, 실시간 항법성능 계산 및 감시가 가능하도록 구성하였다. 이를 통해 한반도 및 그 주변의 가상 격자점을 기준으로 연속성 및 가용성 지도를 생성하였다. 또한 기준국 7개소의 데이터를 동시에 처리하여 위치오차 (Position Error, PE), 보호수준 (Protection Level, PL) 등의 성능지표를 계산하고, 기준국 별로 정확성, 무결성, 연속성, 가용성의 확률 정보를 도출하였다. MIMO는 일차적으로 MATLAB으로 개발하여 기능 검증을 완료

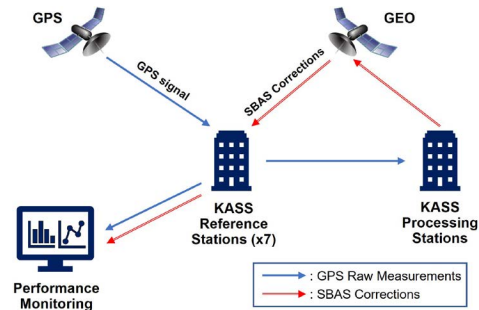


Fig. 1. GPS and SBAS data flow for MIMO input.

한 후 실시간 프로그램으로 구현하였다. 최종적으로 개발된 시스템의 출력을 Reference tool과 비교 및 분석하여 검증하였다.

MIMO는 KASS 시스템의 구성 요소로, SBAS 보정정보의 항법성능을 실시간으로 감시한다. KASS 시스템의 이상 유무를 실시간으로 탐지할 수 있으며, 이상 시점을 식별하여 데이터 후처리 시 운영 효율을 향상시킬 수 있다. 나아가 유사 위성항법 시스템의 항법성능 감시에 활용할 수 있다.

본 논문은 KASS의 실시간 MIMO의 설계 및 시험 검증을 포함하는 개발 과정에 대하여 소개한다. 2장에서는 MIMO에서 분석하는 정확성, 무결성, 연속성, 가용성의 항법성능 지표 정의 및 도출 방법을 제시하고, 3장에서 MIMO 요구사항을 설명하고 내/외부 인터페이스, 기능 설계 및 구현에 대하여 기술한다. 이후 4장에서 시험 및 검증 방법을 제시하고, 기준 도구와 비교/분석을 통한 시험 및 검증 결과를 보였다. 마지막으로 5장에서 본 논문의 결과를 요약 및 정리하였다.

## 2. MIMO PERFORMANCE INDEX

Global Positioning System (GPS) 위성의 신호를 각 기준국에서 관측하고, 이를 중앙처리국에 전달하여 SBAS 보정정보를 계산한다. 이후 SBAS 보정정보는 GEO 위성을 통해 사용자에게 방송되며, 방송된 신호를 기준국에서 수신한다. 최종적으로 기준국에서 수신된 GPS 원시 신호 및 SBAS 보정정보가 MIMO로 입력되어 정확성, 무결성, 연속성, 가용성의 성능 지표를 계산한다. Fig. 1은 KASS MIMO의 데이터 흐름을 나타낸다. 본 장에서는 MIMO에서 계산하고 감시하는 4가지 성능 지표의 정의 및 측정 방법에 대하여 살펴본다.

정확성은 측정 또는 추정된 변수에 대하여 참(true) 값과의 차이를 나타낸다. 참값에 대한 오차는 백분율(%)로 신뢰 범위를 표현한다. MIMO에서 정확성은 일반적인 ‘표준편차(1-σ) x 변환계수’ 방법 대신, 실제 데이터를 오차순으로 나열하여 신뢰범위를 정의하였다. 예를 들어 100개의 샘플에 대해 95% 정확성 확률 범위를 찾는 경우, 데이터를 오차 크기 순서대로 나열하고 이중 95번째 값을 찾아 확률 범위로 정의했다. 위치 오차의 평균이 ‘0’이 아니고 데이터가 정규분포를 따르지 않는 경우가 존재하여 통계치가 왜곡될 수 있기에 제시한 방법을 사용하였다.

무결성은 항법정보의 정확성에 대해 신뢰할 수 있는 수준을

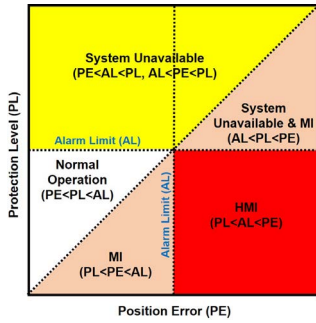


Fig. 2. Example of Stanford diagram.

Table 1. SBAS performance for each service level.

Performance parameters	APV-I	NPA	OS
Service area	Korea mainland & Jeju airport	Incheon FIR	Incheon FIR Korea mainland & Jeju airport
Accuracy	16 m (H) 20 m (V)	220 m (H) N/A	220 m (H) N/A 16 m (H) 20 m (V)
Alarm limit	40 m (H) 50 m (V)	0.3NM (H) N/A	N/A N/A

나타낸다. 항공분야에서는 PE의 불확실성을 고려한 PL을 추정하고 경보 임계치 (Alarm Limit, AL) 초과 여부를 검사하여 무결성 정보를 계산한다. 무결성을 직관적으로 이해할 수 있도록 표현하는 방법으로 Fig. 2의 Stanford diagram이 대표적이다. Stanford diagram은 2차원 그래프로, 가로축은 PE를 나타내고 세로축은 PL을 의미한다. 수집된 샘플에 대하여 PE, PL에 상응하는 값을 그래프 상에 나타내어 AL의 초과 여부를 판단한다. PE, PL, AL의 비교를 통해 각 영역을 나누며, 각 영역을 정상운용 (Normal operation), 시스템 비가용 (System unavailable), 허위정보 (Misleading Information, MI), 심각한 허위정보 (Hazardously Misleading Information, HMI)를 정의한다 (Hofmann-Wellenhof et al. 2008, ESA 2022a).

연속성은 시스템이 의도하지 않은 중단없이 계획된 서비스를 정상적으로 수행할 수 있는 성능을 나타낸다. 연속성 측정을 위해서는 2가지 중요한 조건이 존재한다: 1) 시스템은 초기에 정상 상태로 동작하고 있어야 하며, 2) 계획된 운용 기간 내에서 중단 없이 정상 동작 가능해야 한다 (ICAO 2006, RTCA 2006). APV-I 서비스의 연속성은 유효한 Precision Approach (PA) 임무 시간에 대한 PL이 AL 이하(PL < AL)로 유지되는 시간의 비율로 계산된다. 이때, 연속성 계산은 임무시간 15초를 기반으로 계산되므로, 1회의 Continuity risk 발생 시 15초 구간이 불 연속하다고 간주한다. 이를 고려하여, 연속성 확률은 식 (1)과 같이 계산한다 (Tabti et al. 2021, Coordinates 2022).

$$Continuity = 1 - \frac{Continuity\ risks \times 15}{\#Total\ valid\ samples} \quad (1)$$

가용성은 PL이 AL 이하로 유지(PL < AL)되는 비율을 나타내며, 식 (2)와 같이 전체 시간 대비 가용한 시간의 비율로 계산한다 (Tabti et al. 2021, Coordinates 2022).

$$Availability = \frac{\#Available\ Samples}{\#Total\ Samples} = 1 - \frac{\#Unavailable\ Samples}{\#Total\ Samples} \quad (2)$$

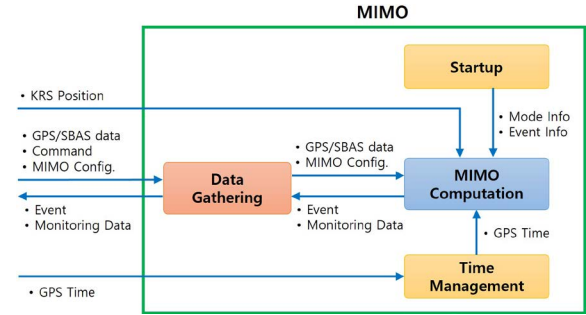


Fig. 3. MIMO interface diagram.

MIMO는 앞서 정의된 4가지 성능지표를 실시간으로 계산하고, 성능 기준과 비교하여 임무성능을 감시한다. SBAS 성능 기준은 항공기 접근 단계별로 그 값을 달리한다. ICAO (2006)는 SBAS 접근단계 별 성능 기준을 Table 1과 같이 정의한다. 항공기 접근단계 별로 SBAS 성능기준을 구분하며, MIMO는 Table 1에 제시된 기준에 부합하는지 감시한다 (RTCA 2006, Won & Lee 2021).

### 3. DESIGN AND IMPLEMENTATION

이번 장에서는 MIMO 요구사항을 살펴보고 내/외부 인터페이스 정의 및 세부적인 설계/구현에 대하여 기술한다.

#### 3.1 MIMO 요구사항 정의

MIMO 개발을 위해서는 일반적인 시스템 공통 요구사항과 더불어 MIMO 전용 요구사항을 준수해야 한다. 다음은 주요 MIMO 요구사항이다 (Germa 2017, Comelli 2019, Won & Lee 2021).

- KASS 기준국에서 수신된 GPS 및 SBAS 데이터를 사용하여 항법성능 지표를 계산해야 한다.
- KASS의 임무성능은 Table 1에 제시된 AL을 기준으로 서비스 별 성능 만족 여부를 감시해야 한다.
- 계산은 실시간으로 동작하며, 매 15분 주기로 결과를 출력해야 한다.
- MIMO 동작에 필요한 변수는 운영자가 설정 가능해야 한다.
- 시스템 동작과 관련하여 이벤트를 생성하고 운영자에게 제 공해야 한다.

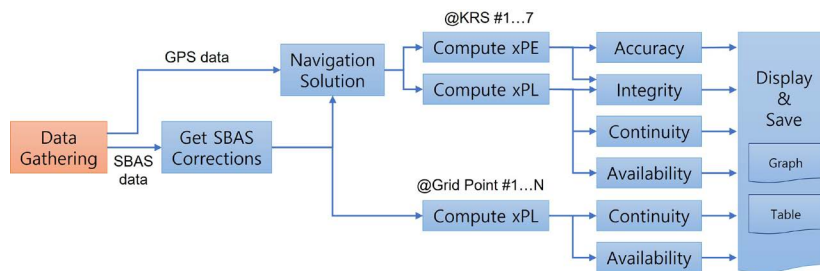
이외에도 다수의 요구사항이 존재하나, 임무성능 감시와 직접적인 관련이 없으므로 설명에서 제외한다. 정의된 요구사항은 설계에서 검증에 이르는 개발 과정동안 추적성이 보장되도록 관리되었다.

#### 3.2 Interface Design

MIMO 계산에 필요한 데이터를 외부에서 입력 받고, 계산 결과 및 내부 상태 정보를 외부로 전달한다. 이외에도 내부 모듈 간

**Table 2.** Contents of MIMO data.

Data	Contents
GPS data	GPS ephemeris data GPS raw measurement from 7 KRSs
SBAS data	SBAS messages for xPL and xPE computation · KASS mode (test/non-SoL/SoL): MT0, 0/2 or MT2 · PRN mask and IGP mask: MT1 and MT18 · SBAS corrections for satellites and IGP: MT2-5, MT24, MT25 and MT26 · Integrity data (UDRE and GIVE): MT2-5, MT6 and MT26 · Degradation parameters: MT7, MT10 and MT27/28 · SBAS GEO information: MT9 and MT17
Command	Commands to control the MIMO operation
MIMO config.	Alarm limits and Accuracy limits of SBAS service level Grid configuration GPS mask angle SBAS service area
Event	Raised events according to pre-defined event definition
Monitoring data	MIMO status and mode information



**Fig. 4.** MIMO computation function design.

의 입/출력이 정의되어야 한다. Fig. 3은 MIMO의 내/외부 인터페이스를 나타낸다.

우선 외부 인터페이스를 살펴보면, 입력 데이터는 기준국 좌표, GPS/SBAS 데이터, MIMO 설정, 시각정보이다. 기준국 좌표는 정확성 계산에 사용되는 기준 값이며, KASS 시스템 외부에서 정밀 측정된 좌표를 입력 받는다. GPS/SBAS 데이터는 7개 기준국에서 수신한 값으로 MIMO의 계산에 사용된다. MIMO 설정은 AL, 계산/출력 주기, Mask angle, 전리층 격자점 정보 등의 값을 포함한다. 이외에도 GPS 시각 정보를 외부로부터 입력 받아, MIMO 연산에 활용한다. 출력 데이터는 MIMO 계산 결과와 계산 과정에서 생성된 이벤트 정보이다. 출력 데이터는 KASS Monitoring & Control 부분으로 전달되어 관리되고 저장된다. 내부적으로는 데이터 수집 (Data gathering), MIMO 연산 (MIMO computation), 시각관리 (Time management), MIMO 시작 (Startup) 모듈 간의 인터페이스로 정의한다.

### 3.3 Functional Design

앞서 정의한 인터페이스를 기준으로 각 세부 기능 (Startup, Data gathering, MIMO computation, Time management)에 대하여 설계한다. 우선 MIMO 동작에 보조적인 기능을 수행하는 MIMO 시작과 시각관리에 대하여 살펴본다. MIMO 시작부는 MIMO SW의 시작을 명령하는 부분으로, 연결된 장비와 기능들 간의 상태를 확인하여 모드 및 이벤트 정보를 생성하여 초기 정보로 제공한다. 시각관리부는 KASS 통합운영국 내부의 GPS 수

신기로부터 수신한 GPS 시각정보를 수집하여 주기적으로 시각 동기화를 수행한다.

데이터 수집부는 KASS 기준국 7개소에서 수집한 GPS 및 SBAS 데이터를 수신하여, 인터페이스 통제 문서 (Interface Control Document, ICD)에 따라 디코딩하는 기능을 담당한다. 또한 MIMO 내부에서 계산된 결과 및 관련 상태정보를 외부로 전달한다. Table 2는 데이터 수집부에서 처리하는 자료의 세부 내용을 나타낸다.

MIMO 연산은 성능 지표를 도출하는 핵심 기능으로 SBAS 보정정보를 계산하여 기준국 위치와 격자점 기준으로 각각의 항법 성능을 계산한다. Fig. 4는 데이터 수집 이후 수행하는 MIMO 연산 기능의 세부 구성이다. 기준국 성능 계산 부분은 7개소에서 수신한 GPS 데이터에 SBAS 보정정보를 적용하여 각 기준국 위치마다 PE 및 PL을 계산한다. 이후 PE 및 PL을 각각의 AL과 비교하여 정확성, 무결성, 연속성, 가용성을 도출한다. 격자점 성능 계산의 경우, KASS 서비스 범위를 대상으로 가상 격자점을 생성하고, 해당 위치에서 PL을 계산하여 연속성과 가용성을 계산한다. 가상 격자점에서는 GPS 측정값이 없으므로, PE 계산이 불가하여 정확성 및 무결성 정보를 계산하지 않는다.

GPS 및 SBAS 데이터를 1초 주기로 처리하여 PE와 PL을 계산하며, 매 15분마다 성능지표를 출력하도록 구현하였다. 출력 결과는 직전 24시간의 데이터를 사용하여 2장에서 정의한 통계치를 생성하였다. 이를 위해, 15분과 24시간 용량의 데이터 순환 버퍼 (Circular buffer)를 도입하였다. 1초 단위 계산 값을 15분 순환 버퍼에 업데이트하고, 이후 매 15분마다 24시간 순환 버퍼를 업데이트

트하였다. 최종적으로는 매 15분 주기로 24시간 순환 버퍼의 PE와 PL을 분석하여 통계치를 산출하였다.

MIMO 연산부분의 구현을 위해서는 데이터 전처리, SBAS 보정정보 계산, 보정정보의 적용, 성능지표 계산 등에 이르는 과정에 대한 세부 알고리즘이 정의되어야 한다.

### 3.4 MIMO Algorithm

GPS 데이터 전처리 후에 SBAS 보정정보를 적용하여 PE 및 PL을 계산한다. RTCA (2006)에서 정의된 디코딩 및 보정정보 계산 방법에 따라 Fast correction, Long-term correction, 전리층 오차, 대류층 오차를 계산하고 이와 관련된 공분산을 계산해야 한다. 이번 장에서는 데이터 수집 이후 전처리에서 성능지표 도출에 이르는 과정의 세부 알고리즘을 제시한다. 보다 상세하게는 GPS 데이터 전처리, SBAS 보정정보 계산, 보정정보 적용 및 성능지표 도출의 과정에 대하여 기술한다.

RTCA (2006) 문서를 참고하면, 본 논문에서 기술하지 않은 자세한 계산 방법을 확인할 수 있다.

#### 3.4.1 GPS 데이터 전처리

데이터 수집부에서 GPS 데이터를 수신한 후, 전처리를 수행한다. 위성항법 사용자는 항법성능 향상을 위해 수신된 신호에 다양한 전처리 기법을 적용할 수 있다. 전처리를 위해서는 별도의 신호처리 기능이 필요하며, 경우에 따라 추가적인 하드웨어가 필요한 경우도 발생한다. 전처리는 시스템 추가 자원이 필요하므로, 모든 사용자에게 동일한 전처리 기능을 강제하거나 동일 성능을 기대할 수 없다.

KASS MIMO는 RTCA (2006)에서 권고하는 스무딩만 적용하였다 (Won & Lee 2021). 식 (3)과 (4)는 적용된 스무딩 방법을 나타내며, 특정 시간 간격(100초)을 기준으로 반송파 변화율에 가중치를 두어 의사거리의 잡음 수준을 완화시켰다.

$$P_{proj} = P_{n-1} + \frac{\lambda}{2\pi}(\phi_n - \phi_{n-1}) \quad (3)$$

$$P_n = \alpha Q_n + (1 - \alpha)P_{proj} \quad (4)$$

여기서,  $P_{proj}$ 는 스무딩된 의사거리,  $P_n$ ,  $P_{n-1}$ 은 현재와 직전의 스무딩된 의사거리,  $\lambda$ 는 L1 wavelength,  $\phi_n$ 는 반송파를 나타낸다. 그리고  $\alpha$ 는 스무딩 함수의 가중치를 나타내며, SBAS의 스무딩 시상수 100초를 고려하여 1/100로 설정하였다.

#### 3.4.2 SBAS 보정정보 적용

본 절에서는 SBAS 보정정보인 Fast correction, Long-term correction, 전리층 오차 적용 방법과 대류층 오차 계산 방법에 대하여 설명한다. 우선 Fast correction은 의사거리 보정값이며, SBAS message type 2~5 및 24번을 디코딩하여, 식 (5), (6)과 같이 각 GPS 위성의 의사거리 보정치 (Pseudo Range Correction, PRC)와 의사거리 변화율 (Range Rate Correction, RRC)로 계산한다.

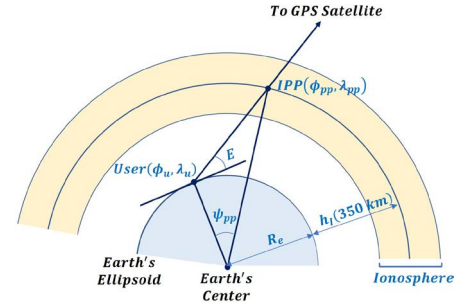


Fig. 5. Ionospheric pierce point geometry (RTCA 2006).

$$PR_{corrected}(t) = PR_{measured}(t) + PRC(t_{of}) + RRC(t_{of}) \times (t - t_{of}) \quad (5)$$

$$RRC(t_{of}) = \frac{PRC_{current} - RRC_{previous}}{\Delta t} \quad (6)$$

여기서,  $PR_{corrected}$ 는 보정된 의사거리,  $PR_{measured}$ 는 측정된 의사거리, PRC는 의사거리 보정치,  $t$ 는 계산시점의 시간,  $t_{of}$ 는 보정정보 기준 시간,  $\Delta t$ 는 직전 보정정보와의 시간 간격을 나타낸다.

Long-term correction은 위성 시각과 위성 위치의 보정값이며 Message type 24, 25번에 관련 변수가 방송된다. 위성 시각은 식 (7)과 같이 clock offset ( $\delta a_{f0}$ )과 clock drift( $\delta a_{f1}$ )로 보정하며, 위성 위치 보정값은 식 (8)을 통해 위치 보정( $\delta x, \delta y, \delta z$ )과 변화율 보정( $\delta \dot{x}, \delta \dot{y}, \delta \dot{z}$ )으로 계산한다.

$$\delta \Delta t_{sv}(t) = \delta a_{f0} + \delta a_{f1}(t - t_0) \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \delta x_k \\ \delta y_k \\ \delta z_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta \dot{x} \\ \delta \dot{y} \\ \delta \dot{z} \end{bmatrix} (t - t_0) \quad (8)$$

대류층 오차는 RTCA (2006)에서 정의한 모델에 기반하여 Mapping function으로 계산한다. 식 (9)와 같이 사용자 위치에서 천정방향의 건조 지연( $d_{hyd}$ )과 습윤 지연( $d_{wet}$ )의 합에 위성 양각( $E$ )을 반영하여 정의한다. 기압, 온도, 수증기압력, 온도변화율, 수증기압력 변화율에 대하여 연중 평균과 계절별 변화를 고려하여 계산한다. 해당 평균과 계절별 변화율은 위도 15도 간격으로 정의되어 있으며, 사용자 위치를 기준으로 보간(interpolate)하여 대류층 오차를 계산한다.

$$Tropospheric\ correction = -(d_{hyd} + d_{wet}) \cdot m(EI) \quad (9)$$

전리층 오차는 Message type 18번에서 제공하는 격자점 정보와 Message type 26번의 전리층 오차 정보로 계산한다. 격자는 5도 간격으로 구성하며(고위도 지역의 간격은 10도 이상), 총 1808개의 격자점에 대한 전리층 보정 계수를 11개 밴드(band)에 나누어 방송한다. 전리층의 전자 밀도가 가장 높은 고도를 350 km로 가정하고, 식 (10), (11)로 사용자( $\phi_u, \psi_u$ )와 위성 위치를 기준으로 Ionospheric pierce point (IPP)를 결정한다. 이후 IPP ( $\lambda_{pp}, \phi_{pp}$ ) 주변의 방송되는 격자점 정보를 보간하여 IPP의 수직방향 오차( $\tau_{vpp}$ )를 계산하고, 이후 식 (12), (13)에서 시선벡터 방향으로 투영( $-F_{pp} \cdot \tau_{vpp}$ )하여 전리층 오차를 계산한다. 여기서 A, E는 각각 사용자 기준의 위성 방위각과 양각이며,  $R_e$ 는 지구 타원체 반경 (6378.1363 km),  $h_i$ 는 전리층 최대 전자 밀도 고도(350 km)를 나타낸다. Fig. 5는 전리층 오차 계산에 필요한 사용자 위치와 IPP의

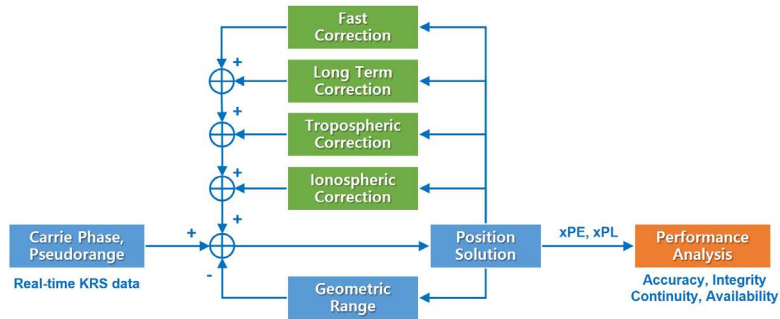


Fig. 6. SBAS correction process.

Table 3. Timeout interval of APV-I.

Data	Message type	Timeout (seconds)
PRN mask	1	600
UDREI	2-6, 24	12
Fast corrections	2-5, 24	12-120
Long-term corrections	24, 25	240
Fast correction degradation	7	240
Degradation parameters	10	240
Ionospheric mask	18	1,200
Ionospheric corrections	26	600
Service level	27	86,400

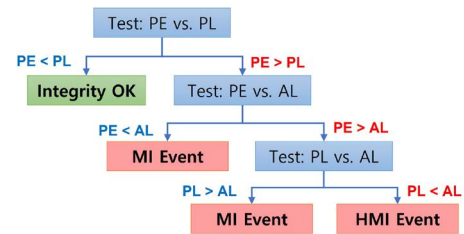


Fig. 7. Integrity check logic.

기하학적 관계를 보여준다.

$$\phi_{pp} = \sin^{-1}(\sin\phi_u \cos\psi_{pp} + \cos\phi_u \sin\psi_{pp} \cos A) \quad (10)$$

$$\lambda_{pp} = \lambda_u + \sin^{-1}\left(\frac{\sin\psi_{pp} \cos A}{\cos\phi_{pp}}\right) \quad (11)$$

$$\text{Ionospheric correction} = -F_{pp} \cdot \tau_{vpp} \quad (12)$$

$$F_{pp} = \left[1 - \left(\frac{R_e \cos E}{R_e + h_I}\right)\right]^{-\frac{1}{2}} \quad (13)$$

3.4.3 SBAS 보정정보 및 성능지표 도출

SBAS 메시지를 디코딩하여, 보정 정보 계산을 위한 계수를 추출한다. 이후 앞서 설명한 수식에 의해 의사거리 보정치, 위성궤도 및 시계 보정치, 대류층 오차, 전리층 오차를 계산한다. 각각의 성분을 모두 합하여 SBAS 보정정보를 도출하고 GPS 측정값을 보정한다. 다음으로 보정된 GPS 측정값으로 사용자 위치를 결정한다. Fig. 6은 SBAS 보정정보 적용 및 항법해 도출 과정을 나타낸다. 이때, 각각의 SBAS 메시지는 수신 후 일정 시간 범위 내에 서만 유효하며, Table 3에 정의된 Timeout 시간을 기준으로 그 유효성을 검사하여 적용한다.

SBAS 보정정보가 얻어지면, PE와 PL을 계산하여 정확성, 무결성, 연속성, 가용성의 성능지표를 도출한다. 우선 PE는 가중 최소자승법 (Weighted least squares)로 결정된 위치해와 기준 좌표를 비교하여 계산한다. PL은 식 (14), (15)에 의해 각각 수평(HPL), 수직(VPL) 방향으로 계산하며  $K_H, K_V$ 의 환산계수와 가중치가 고려된 공분산( $d_{major}$ )의 곱 형태로 나타낸다.

$$HPL = K_H \cdot d_{major} \quad (14)$$

$$VPL = K_V \cdot d_{major} \quad (15)$$

PE와 PL이 계산되면 Fig. 7의 무결성 검사 과정을 거친다. PE, PL을 AL과 비교하여, MI와 HMI를 판단한다. 이후 Fig. 2의 Stanford diagram을 적용하여 무결성 정보를 시각화 한다. 또한 PE와 PL의 비율(PE/PL)로 Safety index를 도출한다.

연속성과 가용성은 계산된 PL을 AL과 비교하여 도출한다. 기준국 성능 분석의 경우, 개별 기준국 위치에 계산하고 수치로 표현한다. 격자점 성능 분석의 경우, 각각의 격자점에서 PL, AL 검사 결과를 취합하여 지도 위에 도식화하여 표출한다.

3.5 Implementation

MIMO prototype은 MATLAB으로 구현하였고, 실시간 MIMO SW는 C#으로 구현하였다. MIMO는 KASS 통합운영국 서버 내에 독립 서버로 구성되었으며, Redhat Linux 기반으로 동작한다. MIMO 동작을 위하여 별도의 Workstation이 존재하며, Windows 10 Pro 운영체제를 사용하였다.

Fig. 8은 구현된 MIMO SW의 화면 구조를 나타낸다. SBAS 서비스 수준 별로 APV-I, Non precision approach (NPA), Open Service (OS)로 1차 분류하고, 이후 정확성, 무결성, 연속성, 가용성 및 통계치 표출 화면으로 구성하였다. SBAS 서비스 수준마다 요구하는 출력이 상이하므로 서비스 별로 일부 화면 구성을 달리 한다.

정확성은 수평 및 수직 방향의 오차와 95% 확률 범위를 그래프 프로 나타낸다. 무결성은 시간에 따른 수평 수직 방향의 PE 및 PL 변화를 AL 기준으로 표출한다. 더불어 Stanford diagram과

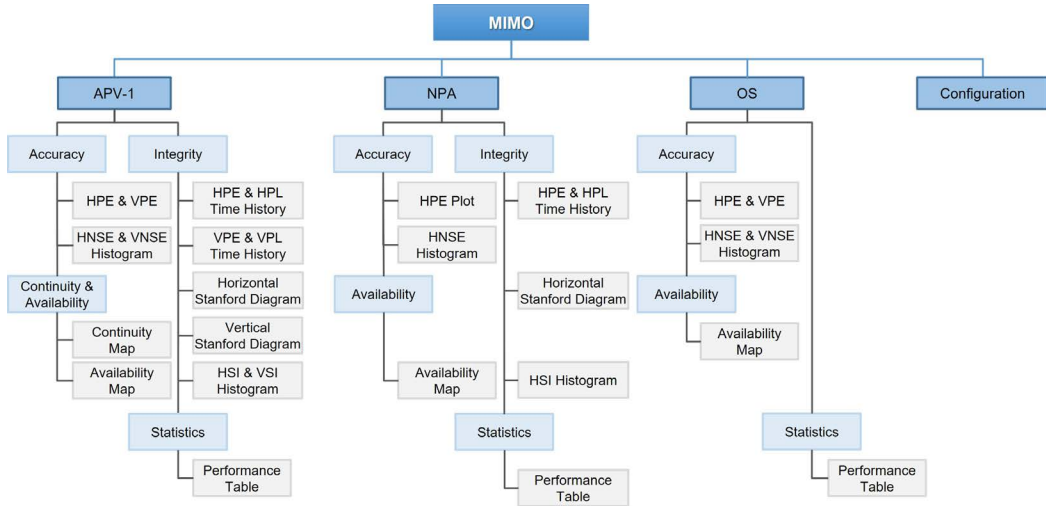


Fig. 8. MIMO GUI tree.

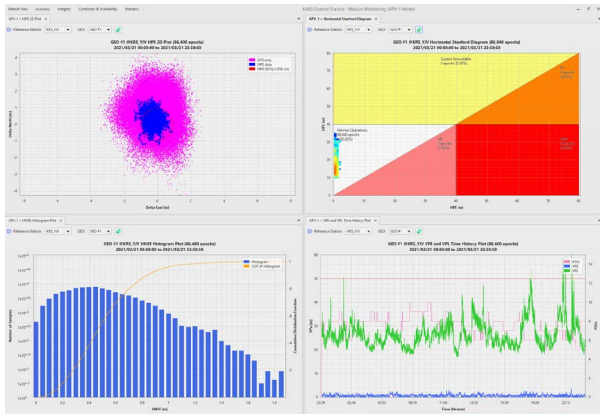


Fig. 9. MIMO main window.

Safety index histogram을 보여준다. 연속성과 가용성은 한반도 및 주변 지역의 24시간 PL 값을 지도위에 색상으로 표현하였다. 통계값은 각 기준국의 정확성 및 무결성, 연속성, 가용성 정보를 계산하여 표로 나타낸다. Fig. 9는 구현된 MIMO SW의 기본화면 구성을 나타내며, 상단의 메뉴를 통해 Fig. 10과 같이 독립적으로 세부 출력화면을 표출할 수 있다. Fig. 10은 수평방향의 출력 화면이며, 수직 방향도 동일하게 구성하였다.

### 4. TEST & VERIFICATION

MIMO 시험은 Prototype 및 실시간 SW를 대상으로 검증을 수행하였다. KASS 기준국에서 수신한 GPS 및 SBAS 데이터를 토대로 SBAS 보정결과를 도출하고 이에 대한 성능지표를 생성하여 Reference tool과 비교하여 검증하였다. 기본적으로 SBAS 보정정보 생성 및 적용이 적절히 수행되었는지를 확인하고, 이후 보정정보 적용 후의 결과를 Reference tool과 비교하여 검증하였다. 최종적으로 Prototype과 실시간 SW의 출력결과가 동일함을

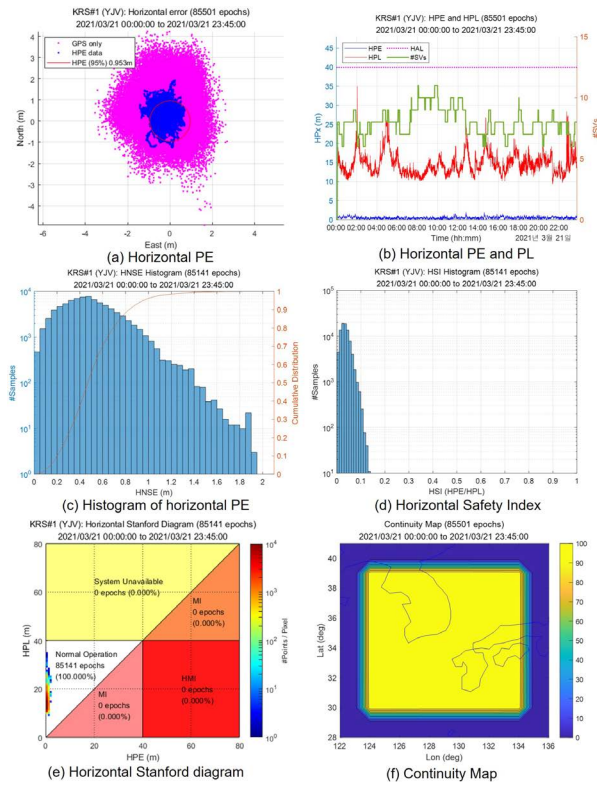


Fig. 10. Examples of MIMO output window: (a) horizontal position error, (b) horizontal position error and protection level, (c) histogram of horizontal position error, (d) horizontal safety index, (e) horizontal protection level, and (f) continuity map.

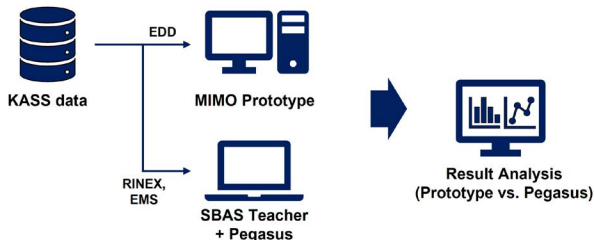
확인하여 검증을 완료하였다.

#### 4.1 Test Environments

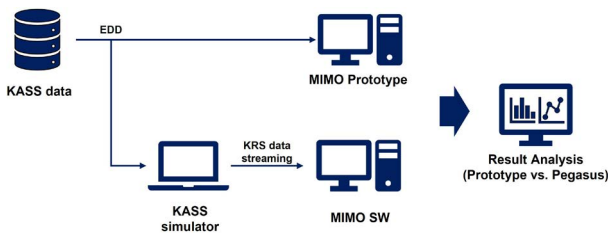
시험에 사용된 데이터는 2021년 3월 21일 KASS 중앙처리국에서 생성한 SBAS 보정정보와 양주 기준국에서 수집한 GPS 관측값이며, 0시부터 24시간 동안에 1 Hz로 저장된 데이터이다. KASS

**Table 4.** Reference tool list for MIMO validation.

Tool name	Version	Usage	Distributor
SBAS teacher	2.1	SBAS message decoding	ESA
PEGASUS	19.07.25	SBAS solutions	EUROCONTOL



**Fig. 11.** Verification flow for MIMO prototype.



**Fig. 12.** Verification flow for real-time MIMO SW.

External industry ICD 형식에 부합하도록 GPS 데이터와 이에 상응하는 SBAS 보정정보를 Header, GPS data, SBAS data, CRC 순으로 저장한 파일(\*.EDD)이다. GPS 데이터는 KASS 고유 포맷으로 신호 측정치 및 궤도력 정보를 포함하며, SBAS 데이터는 가공되지 않은 250 bits의 SBAS raw data이다 (Teske 2022).

### 4.2 Verification Method

MIMO 검증은 Prototype 검증과 실시간 MIMO SW 검증으로 구성되며, 각각의 검증에 대한 방법을 설명한다. MIMO prototype의 SBAS 보정정보 도출이 적절히 구현되었는지에 대한 검증이 필요하며, 이를 위해 동일 시험 데이터에 대한 Reference tool의 출력과 비교하여 검증을 수행하였다. Reference tool은 SBAS teacher (ESA 2022b)와 PEGASUS (Eurocontrol 2003, 2011, 2018, 2022)를 선정하였다. SBAS teacher는 Binary 형태의 SBAS message가 적절히 디코딩하였는지 검증하기 위해 사용하였고, PEGASUS는 SBAS 보정정보 적용 시 출력되는 PE 및 PL의 적절성 검증을 위해 사용하였다. Reference tool의 세부 형상은 Table 4와 같다.

Fig. 11은 MIMO prototype과 Reference tool 간의 검증 흐름을 나타낸다. 입력 데이터를 살펴보면, MIMO prototype은 KASS EDD 파일을 직접 디코딩하여 처리한다. 반면 PEGASUS의 입력은 사전에 정의된 일부 파일 형식으로 제한되며, KASS EDD 파일은 지원하지 않는다. 따라서 PEGASUS에서 지원하는 파일 형식 중에 하나인 RINEX (IGS 2022)와 EMS (Ventura et al. 2004)로 변환하여 사용하였다.

**Table 5.** Validation results of SBAS message decoding.

Message type	Contents	Validation results
1	PRN mask	Pass
2	Fast corrections	Pass
3	Fast corrections	Pass
4	Fast corrections	Pass
6	Integrity information	Pass
7	Fast correction degradation factor	Pass
10	Degradation parameters	Pass
18	Ionosphere grid points mask	Pass
25	Long-term satellite error corrections	Pass
26	Ionosphere delay corrections	Pass
27	SBAS service area	Pass

**Table 6.** Position errors of MIMO prototype and PEGASUS (unit: meter).

Error type	MIMO	PEGASUS	Difference	
Horizontal error	Mean	0.501	0.517	0.016 (3.08%)
	STD	0.251	0.273	0.021 (7.84%)
	HPE (95%)	0.953	0.998	0.045 (4.51%)
Vertical error	Mean	0.615	0.623	0.008 (1.27%)
	STD	0.463	0.485	0.021 (4.48%)
	VPE (95%)	1.511	1.575	0.064 (4.06%)

KASS EDD 입력에 대하여 MIMO prototype과 ‘SBAS teacher’ 간의 디코딩 결과를 비교하여 동일 값임을 확인하였다. 디코딩 검증 후 SBAS 성능 지표 도출 결과를 PEGASUS와 비교하여 검증하였다.

본 논문에서 성능지표 분석은 APV-I 서비스로 제한하였다. APV-I과 OS는 동일한 정확성 성능지표를 가지며, SBAS 보정정보의 신뢰 여부만 다르다. MIMO 구현 관점에서 성능지표 계산과정이 동일하므로, OS를 위한 별도 검증 결과 제시는 불필요하다고 판단하였다.

NPA 경우, 사용되는 GPS 데이터 및 적용되는 보정정보가 APV-I과 동일하다. 임계치와 완료된 SBAS message의 Timeout 기준만 달라하므로 동일 또는 유사한 수준의 결과를 나타낸다. 반복적인 결과 제시는 불필요하다고 판단되어 검증 결과는 APV-I에 대해서만 기술한다.

Fig. 12는 실시간 MIMO 검증 과정을 나타낸다. MIMO prototype이 Reference tool로 검증이 완료되었다는 전제하에, Prototype과 실시간 MIMO SW의 출력 결과를 비교하여 검증한다. 실시간 MIMO SW는 Prototype과 달리 KASS 기준국의 실시간 데이터를 입력으로 사용한다. 이를 위해 KASS EDD 파일을 Streaming data로 재생하는 시뮬레이터를 추가하였다. 실시간 MIMO SW는 Prototype을 기반으로 구현되었으므로, 동일 출력 결과를 나타내야 한다. 이를 검증하기 위해서 정확성, 무결성, 연속성, 가용성의 출력 그래프 및 통계치 출력 결과를 비교하여 동일함을 입증하였다.

### 4.3 Verification Results

MIMO prototype에서 디코딩된 SBAS 메시지와 ‘SBAS teacher’의 디코딩 결과를 1:1로 비교하였다. SBAS message 디코딩 검증 결과, 모든 메시지에 대하여 MIMO prototype은 Reference tool과 동일한 디코딩 결과를 나타냈다. 이를 통해 MIMO prototype의 SBAS message 디코딩 기능이 정상적으로



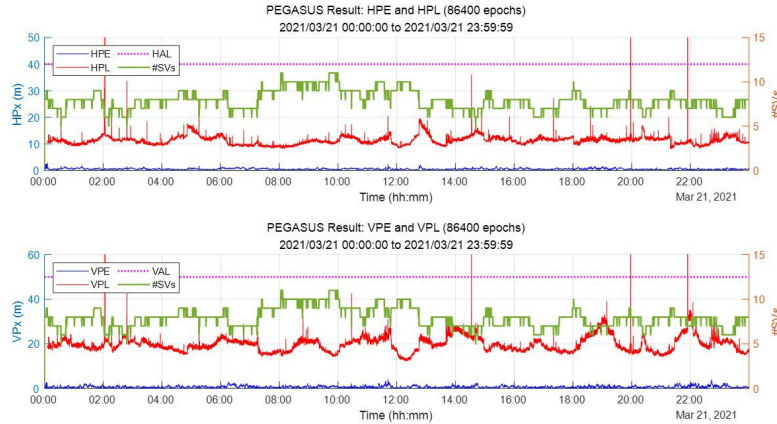


Fig. 13. Protection level from PEGASUS.

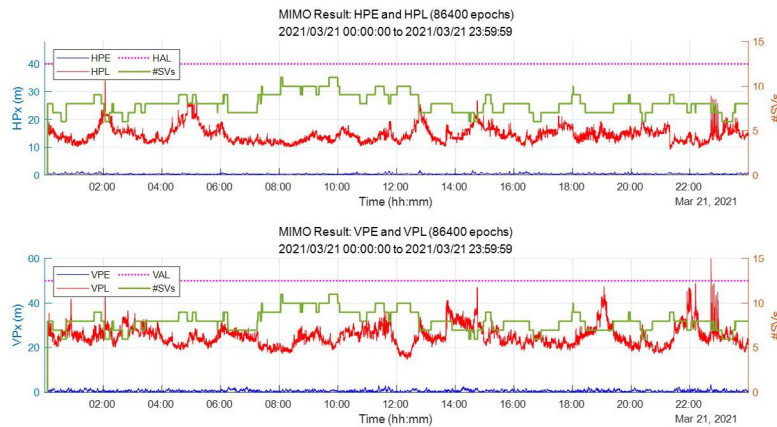


Fig. 14. Protection level from MIMO prototype.

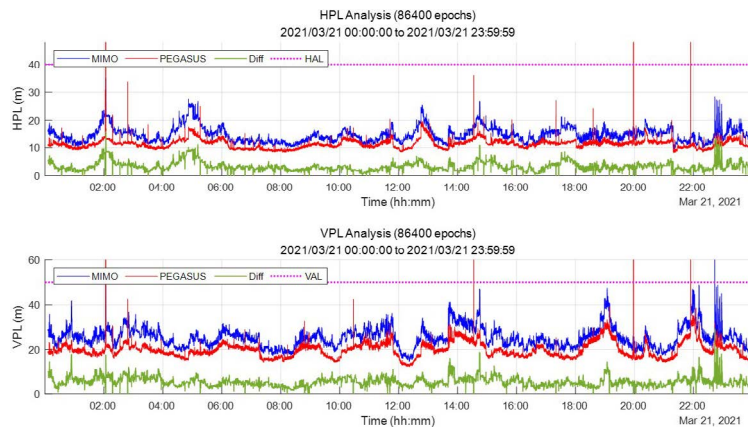


Fig. 15. HPL and HAL in MIMO prototype and PEGASUS.

동작함을 입증하였다. 검증된 SBAS message type은 Table 5에 정리하였으며, 세부 내용은 단순 수치 비교 이므로 기술하지 않고 결과만 나타냈다.

정확성은 MIMO prototype과 PEGASUS에서 도출된 수평/수직 방향의 PE를 비교하여 검증하였다. Table 6은 MIMO prototype과 PEGASUS의 PE에 대한 확률분석 결과를 나타낸다. 수평방향 표준편차는 PEGASUS 대비 7.84% 차이를 보였으며, 이

를 제외하고 모든 값은 5% 이내의 범위에서 위치 결과를 나타냈다.

MIMO prototype은 최소한의 전처리 기법을 적용하였으므로 PEGASUS와 PE에 있어서 동일한 수치를 보이지 않는다. 수평/수직 방향의 오차의 크기와 표준편차를 비교하였을 때, 최대 7.84% 이내의 차이를 보였다. 전처리가 상이한 점을 고려하였을 때, 유의미한 범위에서 유사성을 보인 것으로 판단된다.

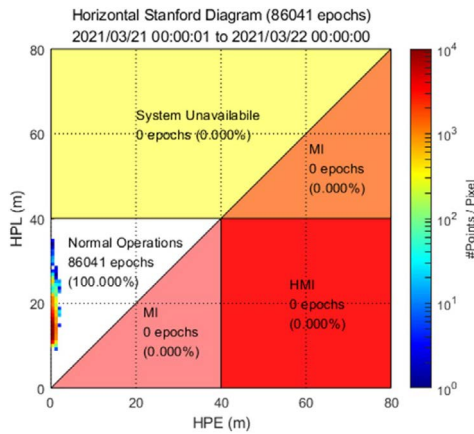


Fig. 16. Horizontal Stanford diagram by MIMO prototype outputs.

Table 7. Correlation checks for PLs between MIMO prototype and PEGASUS.

Type	Correlation coefficient		
	Pearson	Kendall	Spearman's Rho
HPL	0.8620	0.6876	0.8750
VPL	0.9026	0.7239	0.8975

다음으로 무결성 검증 결과이다. 적용된 전처리 기법이 상이하므로 가용 위성이 다르며, 위성 기하학적 배치가 변화하므로 PL도 영향을 받는다. 따라서, 비교 결과는 동일한 수치를 나타낼 수 없다. Figs. 13과 14는 24시간 동안의 PE, PL을 변화를 나타낸다. 각 그래프에는 가용 위성(녹색선)도 함께 표현되었다.

Fig. 15는 MIMO와 PEGASUS의 수평 및 수직 방향의 PL을 비교한 결과이다. 수평방향 PL의 진폭을 살펴보면, 두가지 경우 유사하게 10~20 m 수준으로 나타났으며 평균적으로 3.2 m의 차이를 보였다. 수직 방향에 있어서도 유사한 경향을 보였으며 평균 5.3 m의 차이가 나타났다. 가용위성을 살펴보면, PEGASUS의 경우 상대적으로 빈번하게 가용위성 수가 변화하였다. 가용위성의 변화로 인해, 일시적인 피크가 빈번하게 발생하였으나, 대부분 AL 이하로 발생하였다. AL을 초과하는 피크는 PEGASUS에서 더 많이 발생하였으며, 이는 가용 위성 변화하여 일시적으로 계산 알고리즘 내에 위성 기하학적 배치 불량이 발생한 것으로 추측된다. MIMO의 경우, 동일 시점에 PL이 AL을 초과하지 않았다. 위협적인 심각한 상황에서 'PL>AL'인 경보를 발생하지 않는다면 문제일 수 있으나, 해당 시점의 PE와 PL 모두 APV-I 서비스의 AL을 초과하지 않고 큰 변화 없이 안정적이므로 정상 동작으로 판단된다.

MIMO prototype에 대하여 도출된 PE, PL을 Fig. 16의 Stanford diagram으로 출력하였다. 수치분석 결과에 System unavailable, MI, HMI 상황이 모두 '0'건이며, Stanford diagram에서 동일하게 발생하지 않았다. 각각의 출력 데이터의 수치적 분석으로 확인된 값과 Stanford diagram이 동일한 결과를 나타냄을 확인하였다. 이를 통해 Stanford diagram 출력이 이상이 없음을 확인하였다.

Table 7은 도출된 PL에 대하여 상호 상관성을 분석한 결과이다. MATLAB에 기본적으로 내장된 'corr' 함수를 통해 도출되었으며, 옵션으로 선택 가능한 3가지 'Pearson', 'Kendall',

Table 8. Continuity & availability analysis for MIMO prototype and PEGASUS.

Items	Continuity		Availability	
	#Cont. risk	Probability	#Unavailable	Probability
MIMO prototype	3	0.999479	15	0.999826
PEGASUS	4	0.999306	25	0.999711

Table 9. Position errors of MIMO prototype and MIMO SW (unit: meter).

Error type		MIMO prototype	MIMO SW	Difference
Horizontal error	Mean	0.501	0.501	0.000
	STD	0.251	0.251	0.000
	HPE (95%)	0.953	0.953	0.000
Vertical error	Mean	0.615	0.615	0.000
	STD	0.463	0.463	0.000
	HPE (95%)	1.511	1.511	0.000

Table 10. Continuity & availability analysis for MIMO prototype and MIMO SW.

	Continuity		Availability	
	#Cont. risk	Probability	#Unavailable	Probability
MIMO prototype	3	0.999479	15	0.999826
MIMO SW	3	0.999479	15	0.999826

'Spearman's Rho' 기법을 적용하였다 (MATLAB 2022). 계산된 상관계수는 '-1~1'의 범위를 가지며, 상관도가 높을수록 양의 1에 근접한 값을 나타낸다. 상관성 계산 시 피크부분은 특이점으로 판단하여 계산에서 제외하였다. 표의 결과가 보여주듯이, 수평/수직 방향의 PL은 모두 양의 상관성을 나타냈으며, 0.6876~0.9026의 범위를 보였다. 일반적으로 가장 많이 사용하는 'Pearson' 상관계수를 기준으로 0.8620 이상의 높은 상관성을 보였다. 상관도가 가장 낮은 'Kendall' 역시 0.7 수준의 상관성을 보였다. PL 비교한 결과, MIMO prototype은 전처리 방식의 차이로 인해 PEGASUS와 동일한 수치 결과를 보이지는 않으나 상관도 검사 결과 유사한 경향성을 확인하였다. 수직방향의 무결성 검증도 동일한 방법으로 수행하였으며, 유사한 경향을 확인하였다.

연속성 및 가용성은 PL을 AL과 비교하여 계산되었다. Table 8은 MIMO prototype과 PEGASUS의 연속성 및 가용성을 계산한 결과이다. PL 계산 결과가 상이하므로 상호 직접적인 비교는 불가하며, Continuity risk 발생 횟수와 비 가용한 시간을 분석하여 계산된 값이 적절한 지를 검증하였다.

MIMO prototype의 경우, Continuity risk가 3건 발생하였으며, 이를 연속성 계산에 적용하면  $(1 - \frac{3 \times 15}{86400}) = 0.999479$ 이다. 또한 비 가용한 (Unavailable) 데이터가 15건으로,  $(1 - \frac{15}{86400}) = 0.999826$ 의 가용성을 나타낸다. PEGASUS는 Continuity risk 4건, Unavailable 25건이 발생하였으며, 연속성은 0.999306, 가용성은 0.999711을 나타낸다. 해당 수치는 실제 출력과 동일함을 확인하였다.

마지막으로 MIMO prototype과 실시간 MIMO SW 비교 검증한 결과이다. 두가지 경우에 위치 오차를 비교하였으며 1 mm 이하의 차이를 보였다. 이러한 차이는 구현에 사용된 MATLAB과 C# 프로그래밍 언어의 표준 라이브러리 구현 차이에 의한 오차로 추측되며, 동일한 결과로 볼 수 있다. Table 9는 MIMO prototype과 실시간 MIMO SW의 PE에 대한 확률분석 결과이며,

모든 값은 동일 수치를 보였다. Table 10은 연속성과 가용성 결과이며, Continuity risk와 Unavailability는 각각 3건과 15건으로 동일 결과를 보였다.

#### 4.4 Discussion

MIMO 검증은 Prototype 검증과 실시간 MIMO SW 검증의 2 단계로 진행하였다. Prototype 검증은 Reference tool을 기준으로 SBAS 메시지의 디코딩 결과 및 항법 성능을 비교 검증하였다. SBAS message 디코딩 결과가 동일하고, SBAS 성능 출력 결과의 유사성을 확인하였다. Reference tool과 MIMO prototype에 적용된 전처리 기법이 다르므로 동일한 수치를 나타내지 않았으나, PL의 크기와 경향이 유사함을 확인하여 검증하였다. 실시간 MIMO SW 검증은 검증 완료된 Prototype의 결과를 실시간 MIMO SW의 출력과 비교를 통해 검증하여 동일 성능임을 확인하였다.

MIMO와 Reference tool 결과를 비교하는 과정에서 수평/수직 방향의 PL 값이 서로 차이를 보였다. Reference tool 내부의 소프트웨어 구현 내용을 확인할 수 없어 분석이 제한되었다. 실험 환경 시험 및 운영을 통해 MIMO 추가 검증이 필요하다.

검증 시험에 사용된 SBAS 보정 정보는 시험 목적으로 생성된 데이터로 실제적인 KASS 성능을 나타내는 것이 아님에 유의해야 한다.

## 5. CONCLUSIONS

KASS는 대한민국 지역에 APV-I급의 보정 정보와 무결성 정보를 제공하는 SBAS이다. KASS는 실시간으로 항법성능을 감시하는 기능이 있으며, 본 논문은 KASS의 MIMO의 설계, 구현 및 검증에 과정에 대하여 소개하였다.

MIMO는 RTCA의 Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Satellite-Based Augmentation System Airborne Equipment를 준수하여 개발되었으며, Reference tool 출력과 비교 및 분석하여 검증을 수행하였다. 우선, MIMO 감시 대상인 정확성, 무결성, 연속성, 가용성의 정의 및 도출 방법을 제시하고, 내/외부 인터페이스 및 기능 설계 및 구현 내용을 제시하였다. 구현 시, GPS 데이터의 전처리를 최소화하여 일반 사용자가 체감하는 항법성능을 계산하도록 구현하였다. 이후 Reference tool과 출력 데이터를 비교/분석하여 기능을 검증하였다. 개발된 MIMO는 Reference tool과 비교하여 동일한 디코딩 성능을 보였으며, 항법성능의 경우 유사 경향성을 확인하여 검증을 완료하였다.

MIMO는 KASS 시스템의 구성 요소로, SBAS 보정정보의 항법성능을 실시간으로 감시한다. 개발된 MIMO로 KASS 운영자가 항법성능의 이상 유무를 실시간으로 식별할 수 있으며, 자료 후처리 과정에서는 이상 시점의 사전 식별로 인해 운영 효율의 향상을 기대할 수 있다. 본 연구에서 다루는 성능지표는 위성항법 분야에서 보편적으로 사용하는 값이므로, MIMO의 활용 범위는 KASS에만 국한되지 않으며 향후 국내에 개발되는 위성항법 관

련 시스템에 확장하여 적용이 가능하다.

## ACKNOWLEDGMENTS

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원 항공안전기술 개발사업 연구비지원 (21ATRP-A087579-08)에 의해 수행되었습니다.

## AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, D.Won and E.Lee; methodology, D.Won and K.Kim; software, J.Kim and Y.Song; validation, K.Kim and J.Kim; formal analysis, D.Won and J.Kim; investigation, D.Won and Y.Song; resources, D.Won, E.Lee and K.Kim; data curation, D.Won, K.Kim, J.Kim and Y.Song; writing—original draft preparation, D.Won, K.Kim, E.Lee; writing—review and editing, D.Won, K.Kim and E.Lee; visualization, D.Won; supervision, D.Won and E.Lee; project administration, E.Lee; funding acquisition, E.Lee.

## CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

## REFERENCES

- Authie, T., Dall’Orso, M., Trilles, S., Choi, H., Kim, H., et al. 2017, Performances Monitoring and Analysis for KASS, International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2017), Portland, Oregon, Sep. 25-29, 2017, pp.958-978. <https://doi.org/10.33012/2017.15405>
- Choi, B.-K., Han, D.-H., Kim, D.-U., Kim, J.-B., & Kee, C.-D. 2018, Development of MATLAB GUI Based Software for Analysis of KASS Availability Performance, Journal of Advanced Navigation Technology, 22, 384-390. <https://doi.org/10.12673/JANT.2018.22.5.384>
- Choi, H. H., Choi, K. S., Kang, H. W., Han, J. A., & Lee, E. 2016, Design of Tool Architecture for KASS Operational Test, 2016 KGS Conference, Nov 2-4 2016, Phoenix, Jeju, Korea, pp.545-549. <http://ipnt.or.kr/2016proc/126>
- Comelli, G. 2019, KCS Subsystem Requirements Document, Thales Alenia Space, KASS-TASF-RQ/0005- 0007598657.
- Coordinates, Performance measurement of EGNOS Integrity and Continuity [Internet], cited 2022 August 22, available from: <https://mycoordinates.org/performance-measurement-of-egnos-integrity-and-continuity>

- ESA, Navipedia-Integrity [Internet], cited 2022a October 17, available from: <https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Integrity>
- ESA, SBAS TeACHER [Internet], cited 2022b August 22, available from: <http://www.egnos-pro.esa.int/sbasteacher/index.html>
- Eurocontrol 2003, PEGASUS Technical Notes on SBAS, Eurocontrol GNSS Tools Team, PEG-TN-SBAS.
- Eurocontrol 2011, PEGASUS Software User Manual, Eurocontrol GNSS Tools Team, PEG-SUM-01.
- Eurocontrol 2018, PEGASUS Interface Control Document, Eurocontrol PEGASUS Team, PEG-ICD-02
- Eurocontrol, PEGASUS [Internet], cited 2022 August 22, available from: <https://www.eurocontrol.int/tool/pegasus>
- Germa, C. 2017, Mission Monitoring Algorithms Definition Document, Thales Alenia Space, KASS-TASF-TN/0005-0008538265.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. 2008, GNSS-global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more (New York: Springer Wien). [https://doi.org/10.1007/978-3-211-73017-1\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-211-73017-1_3)
- ICAO 2006, International Standards and Recommended Practices - Annex 10: Aeronautical Telecommunications - Volume I Radio Navigation Aids: Vol. Annex 10 (6th edition), International Civil Aviation Organization.
- IGS, RINEX - International GNSS Service, cited 2022 August 22, available from: <https://www.igs.org/wg/rinex/#documents-formats>
- Kim, K., Won, D. H., Park, Y., & Lee, E. 2021, A Study on the Verification Method for KASS Control Station, *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*, 10, 221-228. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2021.10.3.221>
- MATLAB, Linear or rank correlation - MATLAB corr., cited 2022 August 22, available from: <https://www.mathworks.com/help/stats/corr.html>
- RTCA 2006, Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Satellite-Based Augmentation System Airborne Equipment (RTCA DO-229D): Vol. Change 1, RTCA. [www.rtca.org](http://www.rtca.org)
- Son, M., Yun, Y., & Lee, B. 2022, Development Status of Operation Concept and Procedures for KASS, *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*, 11, 51-58. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2022.11.1.51>
- Tabti, I., Kahlouche, S., & Benadda, B. 2021, Performance of the EGNOS system in Algeria for single and dual frequency, *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, 8. Retrieved from <https://commons.erau.edu/ijaaa/vol8/iss3/8>
- Teske, J. 2022, KASS Industry external ICD, Thales Alenia Space, KASS-TASF-ID/0005-0008696384.

Ventura, J., Michel, P., Gauthier, L., Horgen, H., Montefusco, C., et al. 2004, EGNOS Message Server (EMS) User Interface Document, ESA. [http://www.egnos-pro.esa.int/ems/EMS\\_UID\\_2\\_0.pdf](http://www.egnos-pro.esa.int/ems/EMS_UID_2_0.pdf)

Won, D. H. & Lee, E. 2021, Prototype Development with MATLAB for KASS Mission Monitoring Tool, 2021 IPNT Conference, Nov 3-5 2021, Gangneung, Korea, pp.303-306. <http://ipnt.or.kr/2021proc/17>



**Daehee Won** is a senior researcher at Korea Aerospace Research Institute (KARI) and has been working on development of KASS Control Station since 2016. He received Ph.D. degree in Aerospace Engineering from Konkuk University (Rep. of Korea) for the research on navigation sensor integration and its performance analysis. He was a postdoctoral researcher at University of Colorado at Boulder for the development of navigation algorithm for low earth orbit satellite. His research interests include GNSS augmentation and multi sensor integration.



**Koontack Kim** received the B.S. and M.S. degree in Geoinformatic Engineering from Inha University (Rep. of Korea) in 2010 and 2013, respectively. He is currently a senior researcher in the SBAS System Engineering & Integration Team at Korea Aerospace Research Institute (KARI). His research interests include GNSS/SBAS, positioning and navigation systems.



**Eunsung Lee** received his Ph.D. degrees in Aerospace Engineering from Konkuk University, Korea in 2005. He is a principal researcher at the Korea Aerospace Research Institute and has been in charge of the development of KASS ground segments as well as SBAS satellite payload since 2014. His research areas include GNSS augmentation systems, fault detection of GNSS systems and orbit determination of satellites.



**Jungja Kim** is a chief researcher at Korea Cyber Engineering Innovation (KCEI) for 22 years and has been working on development and project management at the Modeling and Simulation Research Institute. She received B.S degree in Electronic Computational Engineering (Computer Engineering)

from Kwandong University, Korea. She has been working on development of KASS Control Station since 2019.



**Youngjae Song** is a senior researcher at JIT Solution and received the B.S degree in Computer Engineering from Dong-A University. He has been working on the software development of automated test and operational monitoring system for satellites since 2006.