운용시험을 통한 KASS 성능 분석

김희성^{1†}, 손민혁¹, 이병석¹, 이백준²

KASS Performance Analysis for Operational Test

Heesung Kim^{1†}, Minhyuk Son¹, ByungSeok Lee¹, Baeckjun Yi² ¹Satellite Navigation R&D Division, Korea Aerospace Research Institute, Daejeon 34133, Korea ²External Relations & Cooperation Office, Korea Aerospace Research Institute, Daejeon 34133, Korea

ABSTRACT

The Korea Augmentation Satellite System (KASS) has been certified by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) and commenced Safety-of-Life (SoL) service at the end of 2023. KASS complies with the APV-I signal-in-space performance requirements defined in the International Civil Aviation Organization (ICAO) Standards and Recommendation Practices (SARPs). The performance of KASS is verified through two steps. In the first step, design conformity from the aspect of performance is verified by both review and analysis of design and simulation. In the second step, operational conformity is tested and assessed by operational testing using real data and a deployed system with operational SWs and configurations. This paper presents a methodology, a procedure and results for the KASS operational testing. Finally, performance degradation events and results by month and region during the operational testing are presented and analyzed.

Keywords: KASS, operational test, performance, analysis 주요어: KASS, 운용시험, 성능, 분석

1. 서론

Satellite Based Augmentation System (SBAS)는 GPS에 대 한 보정정보와 무결성 정보를 정지궤도위성을 사용하여 사 용자에게 제공하기 위한 시스템으로써 국제 민간 항공 기구 (International Civil Aviation Organization, ICAO)에 의해 국제표 준으로 정의된 시스템이다. ICAO는 1991년 제10차 항행회의에서 차세대 Communication, Navigation and Surveillance/Air Traffic Management (CNS/ATM)에 위성항법시스템을 적용하는 것을 권 고하였으며, 2007년 제36차 ICAO 정기총회에서 체약국에 대한 Performance Based Navigation (PBN) 이행 촉구를 위하여 SBAS 를 도입할 것을 권고하였다 (ICAO 2008, Park et al. 2016).

한국항공우주연구원은 2014년부터 초정밀 GPS 보정시스템인 Korea Augmentation Satellite System (KASS) 개발을 수행하고 있다. KASS는 ICAO Standards and Recommendation Practices

Received May 03, 2024 Revised May 22, 2024 Accepted Jun 04, 2024

(SARPs) Annex 10을 준수하여 개발하였다. KASS는 제주를 포함 한 내륙지역에서 Approach operations with Vertical guidance-I (APV-I) 수준, 그리고 인천 비행정보구역(Flight Information Region, FIR)에서 Non Precision Approach (NPA) 수준의 성능 요 구사항 만족을 개발 목표로 정의하고 있다 (ICAO 2006).

KASS는 지상에 총 7식의 기준국(KASS Reference Station, KRS), 2식의 중앙처리국(KASS Processing Station, KPS), 2식의 통합운영국(KASS Control Station, KCS), 그리고 3식의 위성통신 국(KASS Uplink Station, KUS)이 구축되었으며, 최종적으로 2기 의 정지궤도위성(Geosynchronous Equatorial Orbit, GEO)이 운 영될 예정이다. 2022년 하반기에 KASS 지상시스템(기준국, 중앙 처리국, 통합운영국, 위성통신국)의 설치가 완료되었으며, 1기의 정지궤도위성이 Initial Operation Test (IOT) 완료와 함께 KASS 에 통합되어 있다. 정지궤도위성을 포함한 지상시스템의 통합이 완료된 이후, 2022년 말부터 KASS 시험 신호의 제공이 시작되었

2024 ⁺Corresponding Author E-mail: hskim15@kari.re.kr



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.

| Typical operation | Accuracy horizontal (95%) | Accuracy vertical (95%) | Integrity | Time-to-alert | Continuity | Availability (%) |
|-------------------|---------------------------|-------------------------|-----------------------------------|---------------|------------------------------------|------------------|
| En-route | 3.7 km (2.0 NM) | N/A | $1 - 1e^{-7}/h$ | 5 min | $1 - 1e^{-4}/h$ to $1 - 1e^{-8}/h$ | 0.99 to 0.99999 |
| Terminal | 0.74 km (0.4 NM) | N/A | $1 - 1e^{-7}/h$ | 15 s | 1 - $1e^{-4}/h$ to 1 - $1e^{-8}/h$ | 0.99 to 0.99999 |
| NPA | 220 m (720 ft) | N/A | $1 - 1e^{-7}/h$ | 10 s | 1 - $1e^{-4}/h$ to 1 - $1e^{-8}/h$ | 0.99 to 0.99999 |
| APV-I | 16.0 m (52 ft) | 20 m (66 ft) | 1 - 2e ⁻⁷ per approach | 10 s | 1 - 8e ⁻⁶ in any 15 s | 0.99 to 0.99999 |
| | | | | | | |

Table 1. WAAS continuity requirements compared to ICAO SARPs.

Table 2. KASS Signal-in-Space target performance.

| Typical operation | Accuracy horizontal (95%) | Accuracy vertical (95%) | Integrity | Time-to-alert | Continuity | Availability (%) |
|-------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------|----------------------------------|------------------|
| En-route | 2.0 NM | N/A | 1 - 1e ⁻⁷ /h | 5 min | 1 - 5e ⁻⁴ /h | 99.0 |
| Terminal | 0.4 NM | N/A | 1 - 1e ⁻⁷ /h | 15 s | 1 - 5e ⁻⁴ /h | 99.0 |
| NPA | 220 m | N/A | 1 - 1e ⁻⁷ /h | 10 s | 1 - 5e ⁻⁴ /h | 99.0 |
| APV-I | 16.0 m | 20 m | $1 - 2e^{-7}/150 s$ | 10 s | 1 - 1e ⁻³ in any 15 s | 99.0 |

다. 2022년 12월부터 Message Type (MT) 0을 포함한 KASS 신호 1차 제공을 시작하였으며, 2023년 7월 말부터 MT 0/2를 포함한 KASS 신호 2차 제공을 시작하였다. 최종적으로 성능적합증명을 수여한 뒤, 2023년 12월 28일부터 KASS 항공용 서비스를 제공하 고 있다.

KASS의 성능적합증명에서 성능 검증은 두 단계로 수행하며, KASS 설계 적합성 검토와 실측 시험을 통한 운용 적합성 검토 단 계로 나뉜다. KASS 설계 적합성 검토 단계에서는 시뮬레이션을 통한 알고리즘 및 시스템의 항법성능 분석을 수행하며, 운용 적 합성 검토 단계에서는 최종 구축된 시스템의 실측 데이터를 사용 하여 설계 적합성 단계에서 도출된 성능이 실제 운용 환경에서 적절하게 재현되는지 여부를 운용시험을 수행하여 확인한다.

운용 적합성 검토를 위해 미국 Wide Area Augmentation System (WAAS)는 약 6개월, 유럽 European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS)는 약 1년, 그리고 일본 MTSAT Satellite Augmentation System (MSAS)는 약 3개월 정도 의 기간 동안 운용시험을 수행하였다. KASS의 경우, 시스템의 운 용 적합성을 검토하기 위해 약 6개월간의 운용시험을 수행하였 다 (EUROCONTROL 1999, ICG 2007, ION 2019).

본 연구에서는 6개월간 수행된 KASS 운용시험 방법론 및 결 과를 제시한다. 2장에서는 KASS 개발과정에서 도출된 목표 성능 에 대해 설명한다. 3장에서는 KASS 운용시험 기간 산정 방안에 대해 제시하며, 4장에서는 성능분석 방법 및 절차를 기술한다. 최 종적으로 도출된 KASS 4대 성능 측면의 시험 분석 결과와 함께 시험기간 동안 발생한 이벤트에 대한 성능 영향성과 운용 시 고 려사항에 대해 기술한다.

2. KASS 성능 요구사항

ICAO (2006)에 정의된 공간 신호(Signal-in-Space) 성능 요 구사항은 Table 1과 같다. ICAO (2006)에서는 공간 신호 성능을 다음과 같이 정의한다. 정확성은 추정된 위치와 실제 위치 사이 의 95% 누적 위치 오차를 의미하며, 수직과 수평 정확성으로 나 뉜다. 무결성은 SBAS 시스템으로부터 제공된 정보의 신뢰도와 함께, 의도된 운용 형태에 따라 정의된 경보시간 이내에 유효한 경보를 줄 수 있는 능력을 의미한다. 연속성은 서비스의 중단 없 이 주어진 비행운용 시간 동안 SBAS 서비스 활용이 가능한 확 률을 의미하며, 예측 및 통보된 서비스 중단은 연속성 성능에 포 함되지 않는다. 가용성은 정확성, 연속성, 무결성이 모두 확보된 상황에서 SBAS 서비스 사용이 가능한 시간의 비율을 의미한다 (ICAO 2006).

각 국가별 SBAS는 운영하는 SBAS 시스템의 목표 성능을 정 의하며, Table 2는 KASS의 목표 성능을 보여준다. Table 2에서 확 인할 수 있듯이 KASS는 정확성, 무결성(경보시간), 가용성 측면 에서 ICAO (2006)의 공간 신호 성능 요구사항을 만족하도록 설 계되어 있다. 연속성 목표 성능의 경우 ICAO (2006)에 규정된 연 속성 요구사항보다 낮은 성능으로 설정되어 있다. ICAO (2006) 는 SBAS 시스템이 연속성 요구사항을 만족하지 못하더라도 별 도의 운용 절차에 따라 SBAS 서비스 제공이 가능하다는 것을 명 시하고 있으며, KASS는 이를 준용하여 목표 성능을 설정하였다.

3. KASS 운용시험 기간 산정

ICAO(2006)에 제시된 SBAS 성능 요구사항(Signal-in-Space Performance Requirements) 중 무결성과 연속성은 매 우 낮은 확률을 가지며, 적정기간을 산정하기 위해서는 적정 표 본의 개수 및 표본 사이의 시/공간 상관성을 고려하여야 한다 (EUROCONTROL 1999). EUROCONTROL (1999)에 따르면, 10-7/150 s의 무결성 위해(integrity risk) 확률을 시험으로 검증하기 위해서는 신뢰도 95%를 가정하였을 때, 최소 180년 이상의 표본 을 사용하여야 한다는 결론이 나온다. 또한, 실측 시험을 통한 이 상현상(anomaly) 재현이 어려울 뿐만 아니라 서비스 영역 전체 에서의 시험 결과 생성에 난점이 있기 때문에 성능 요구사항에 대한 검증은 설계자료의 적절성 검토 및 시뮬레이션을 통한 분석 기법을 활용하여 수행한다. 따라서, KASS 운용시험은 일정 기간 동안 시스템 성능이 분석방법을 사용하여 검증된 성능과 얼마나 일치하는지를 확인함과 동시에 ICAO (2006)에 정의된 성능 요구 사항을 위해하는 사건 또는 이상현상이 발생하는지 확인하기 위 해 수행한다.

KASS의 성능에 영향을 주는 주요한 요소는 GPS 위성의 배치/ 가용성, 기준국의 배치/가용성 및 환경, 전리층 환경이 있다. 주요 요소 중 전리층 환경의 경우에 시간대나 계절, 태양의 활동에 따 르는 전리층 지연의 크기 및 변화량이 크게 달라진다 (Kang et al. 2018). 고려하여 산정한다. Kang et al. (2018)과 Kim & Kim (2023)에 따르면, 전리층 환경 의 변화는 밤보다 낮 시간대에 커지며, 여름/겨울 보다 봄/가을에 커지며, 태양활동 극대기로 갈수록 커진다. 따라서, 운용시험 기 간은 춘분점(3~4월) 또는 추분점(10~11월)을 포함함과 동시에 전 리층 활동의 변화에 따르는 KASS 성능 변화를 확인하고 통합된 성능 분석결과의 적합성을 확보하기위해 6개월 이상의 기간으로 선정한다. 2023년 춘분점 기간에는 KASS 신호 1차 제공기간에 포함되며, 해당기간 동안 KASS 통합 검증시험이 수행됨에 따라 연속적인 데이터 확보 및 성능분석이 어렵기 때문에 추분점을 포 함하고 연속적인 데이터 확보가 가능한 기간을 운용시험 기간으 로 선정한다. 최종적으로 선정된 기간은 2023년 5월 23일부터 12 월 15일이며, 이는 사전에 예정된 신호 중단 기간 및 성능 분석 기 간의 여분을 고려하여 선정한다.

운용시험 기간은 전리층 환경의 시간대와 계절에 따르는 변화를

4. KASS 운용시험 성능 분석 절차

KASS의 4대 성능은 정확성, 무결성, 연속성, 그리고 가용성으 로 나뉜다. 본 장에서는 각 성능 지표 및 분석 방법에 대해 정의하 며, 분석을 위한 데이터 선정, 분석 도구 선정 및 분석 절차에 대 해 설명한다.

4.1 KASS 성능 지표 및 분석 방법 정의

GNSS 기반 항행 시스템의 정확성은 추정된 95% 누적 위치오 차로 정의한다 (ICAO 2006). ICAO (2006)에서 정확성은 수직과 수평 성분으로 구분하며, 6개월간 추정된 95% 누적 수직 및 수평 위치오차가 각 운용형태별 수직 및 수평 정확성 요구사항 이내로 들어오는지 확인한다.

GNSS 기반 항행 시스템의 무결성은 시스템으로부터 제공된 정보의 신뢰성이 확보되었는지, 추정된 사용자의 위치오차가 경 보한계(Alert Limit, AL)를 넘어서는지, 그리고 제공된 정보의 신 뢰성이 저해되거나 사용자의 위치오차가 경보한계를 넘어섰을 경우에 시기적절한 경보를 사용자에게 제공해줄 수 있는지 여 부로 정의한다 (ICAO 2006). SBAS 시스템은 보정정보와 함께, 무결성 정보를 제공한다. 알려진 위치에 있는 사용자는 보정정 보와 무결성 정보를 사용하여 자신의 위치와 위치오차(Position Error, PE)를 추정하며, 무결성 정보를 사용하여 위치 보호수준 (Protection Level, PL)을 계산한다. 시스템으로부터 제공된 정보 의 신뢰성은 PL이 PE보다 크게 설정되어야 한다는 의미를 가진 다. 따라서, 무결성이 저해되었다는 것은 다음과 같은 조건이 모 두 충족되었을 경우를 의미한다.

조건 1) PE > AL > PL

Availability of Sliding Window

| | · | | | | | | _ | | | | _ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|
| (| D | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |

Fig. 1. Composition of sliding window.

조건 2) 조건 1 발생 이후, 경보시간(time-to-alert) 동안 조건 1 이 발생

무결성 성능 분석을 위해 Stanford chart를 사용하거나 Safety Index를 사용할 수 있다. Stanford chart를 사용할 경우, 위의 조 건 1 발생 여부를 쉽게 발견할 수 있지만, 조건 2에 대한 발생 여 부를 확인할 수 없으며, 본 연구에서는 Safety Index를 사용하여 무결성 성능을 분석한다. 분석은 다음과 같은 방법과 절차에 따 라 수행한다.

- 절차 1) 매 시점별 Safety Index(=PE/PL) 계산
- 절차 2) Safety Index가 1 이상일 경우, 무결성 사건 (Misleading Information, MI) 개수 증가 및 절차 3 수행
- 절차 3) PE > AL > PL 을 만족할 경우, 절차 4 수행
- 절차 4) 규정된 경보시간 동안 절차 3이 유지될 경우, 무결성 위해 사건 (Hazardous MI, HMI) 개수 증가

GNSS 기반 항행 시스템의 연속성은 운용 형태별로 규정된 운 용 기간동안 사용자가 의도된 운용을 할 수 있게 해주는 시스템 의 능력으로 정의한다 (ICAO 2006). 사용자가 의도된 운용을 하 기 위해서는 PL이 AL보다 낮아야 하며, PL이 AL보다 높게 계산 되거나 PL을 계산하기에 충분한 정보를 제공하지 않을 경우를 중 단(outage)으로 정의한다.

연속성은 운용 형태별로 규정된 운용 기간동안 중단이 발생하 지 않는 경우를 의미하며, 운용 기간동안 중단이 발생할 경우, 연 속성 사건(Continuity Event)이 발생한 것으로 간주한다. Table 1 에서 En-route부터 NPA까지의 운용기간은 1시간이며, APV-I의 운용기간은 15초에 해당한다.

연속성 분석을 위해 Sliding window (Gao et al. 2022) 기법이 활용된다. Fig. 1은 운용 형태가 APV-I일 경우, Sliding Window의 구성을 보여준다. Sliding Window는 APV-I의 운용기간인 15개의 시점에 Sliding Window의 가용여부를 판단하기 위한 한 개의 시 점을 포함하여 총 15개의 시점으로 구성된다. Sliding Window의 인덱스가 '0'인 시점에서 시스템은 가용하여야 하며(PL<AL), 가 용하지 않은 Sliding Window는 연속성 계산에서 제외된다. 인덱 스가 1~15인 시점에서 중단이 하나라도 발생할 경우, 연속성 사건 이 발생한 것으로 간주한다.

Sliding Window 기법을 사용한 연속성 성능은 Eq. (1)과 같이 표현이 가능하다.

$$C = 1 - C_{risk}$$

$$C_{risk} = \frac{N_{Event,C}}{N_{Total,C}}$$
(1)

여기서, C는 연속성 확률, C_{risk} 는 연속성 위해 확률, $N_{Event,C}$ 는 연 속성 사건의 개수, 그리고 $N_{Total,C}$ 은 시험기간 동안 식별된 가용한

 Table 3. Required data for analyzing the performance index.

| Type of Data | Accuracy | Integrity | Continuity | Availability |
|----------------------------|----------|-----------|------------|--------------|
| GPS Ephemeris data | 0 | 0 | - | - |
| GPS observation data | 0 | 0 | - | - |
| GPS almanac | - | - | 0 | 0 |
| KASS message | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Reference station position | 0 | 0 | - | - |

Sliding Window의 총 개수를 의미한다.

GNSS 기반 항행 시스템의 가용성은 시스템이 사용자가 항법 을 수행하기에 유의미한 정보를 제공해줄 수 있는 시간의 비율로 정의한다 (ICAO 2006). 여기서, 유의미한 정보라 함은 사용자가 시스템으로부터 제공된 정보를 사용하여 위치와 PL을 결정할 수 있고, 계산된 PL이 AL보다 작아서 운용 형태별 운용이 가능하다 는 것을 의미한다. 따라서, 가용성은 Eq. (2)와 같이 계산한다.

$$A = (1 - A_{risk}) \times 100(\%)$$
$$A_{risk} = \frac{N_{Outage}}{N_{Total}}$$
(2)

여기서, A는 가용성, A_{risk}는 가용성 위해 확률, N_{Total}은 총 표본의 개수, 그리고 N_{Outage}는 시험기간 동안 발생한 총 중단의 개수를 의 미한다.

4.2 성능 분석 데이터 선정

KASS의 4대 성능 분석을 위해서는 GPS 항법/관측 데이터, GPS Almanac 데이터, KASS 메시지를 포함하는 SBAS 데이터 가 요구되며, 각 성능 지표를 분석하기 위해 요구되는 데이터는 Table 3과 같다.

Table 3에 제시된 바와 같이 SBAS의 정확성 및 무결성 성능 분석을 위해 알려진 위치에 설치된 기준국 데이터를 사용하며, SBAS 기준국 또는 독립적으로 구축된 기준국 데이터의 사용이 가능하다 (NSTB/WAAS T&E Team 2024, ESSP 2024). SBAS 메 시지는 상태 공간(state-space)에서 표현되는 GPS 위성의 궤도 및 시계오차 보정정보와 전리층 격자점(Ionospheric Grid Point, IGP)에서의 전리층 보정정보로 구성된다. 이처럼 SBAS에서 제공 하는 보정정보는 광역 보정정보에 해당하기 때문에 보정정보 생 성에 사용하는 SBAS 기준국 데이터를 성능 분석에 사용한다고 하더라도 보정정보와 기준국 데이터 사이에 존재하는 의존성을 완화할 수 있다. 독립적으로 구축된 기준국 데이터를 사용할 경 우, KASS 기준국에 의해 관측되지 않는 지역에 대한 성능 분석이 가능하며 성능 분석시에 독립성을 확보할 수 있다는 장점을 가진 다. 다만, 사전에 기준국 데이터의 품질 분석이 수행되어야 하며, 기준국 주변 환경 변화 및 상태정보를 확인하기 어렵다는 난점을 가진다.

본 연구에서는 KASS 성능 분석을 위해 KASS 기준국 데이터 를 사용하며, KASS 기준국 데이터를 선정한 이유는 다음과 같다. 먼저, Fig. 2에 도시한 바와 같이, KASS 기준국은 국내 내륙 및 도 서 지역 극단에 설치되어 성능 분석을 위한 데이터의 지리적 분 포를 최대화할 수 있다는 장점을 가진다. 이와 함께, KASS 기준 국은 위성 앙각 5도부터 GPS 데이터 수집하고 있기 때문에 제



Fig. 2. Distribution of KASS reference station and selected stations.

공된 KASS 메시지를 최대한 활용하여 항법해 계산이 가능하다 는 장점을 가진다. KASS 운용시험 성능 분석을 위해 최종적으 로 5개의 기준국을 선정하였으며, Fig. 2에 도시된 바와 같이 양 주(YJV)/양양(YYA)/울릉(DDL)/영도(YGJ)/서귀포(JJT) 기준국이 이에 해당한다.

4.3 성능 분석 도구 선정 및 분석 절차

KASS 성능 분석을 위해 Eurocontrol에서 개발한 PEGASUS 를 사용한다 (EUROCONTROL 2022). PEGASUS는 RTCA MOPS DO-229F (RTCA 2020)를 따르도록 개발되어 있으며, SBAS 데이 터 처리 및 결과 분석을 위한 다양한 소프트웨어 모듈이 개발되어 있다 (Jeong & Kim 2009). 또한, 소프트웨어 매뉴얼, 기술문서 등 과 함께 소프트웨어 변경 이력 및 문제 보고서가 관리 및 제공되 어 소프트웨어의 품질에 대한 신뢰성을 확인 가능하다. 본 연구에 서 사용하는 PEGASUS 모듈 및 사용 목적은 Table 4와 같다.

본 연구에서는 Fig. 3에 도시한 바와 같은 절차에 따라 KASS 성능 분석을 수행한다. KASS 통합운영국은 KASS 기준국으로 부터 수신된 데이터를 일 단위로 저장한다. 일 단위로 저장된 KASS 기준국 데이터를 RINEX (IGS 2019) 형태로 변환한 뒤, 한 달 단위로 RINEX 데이터를 병합한다. 병합한 RINEX 데이터는 PEGASUS Convertor를 사용하여 PEGASUS 자체 포맷으로 변환 하며, PEGASUS GNSS_Solution 및 Xpl_Estimation 모듈을 사용 하여 각 기준국별 위치오차와 보호수준을 계산한다. 한달 단위로 처리된 데이터를 사용하여 일별 및 월간 정확성, 무결성, 연속성,



Fig. 3. Performance analysis procedure for KASS operational test.

| Table 4. PEGASUS module & usag | je. |
|--------------------------------|-----|
|--------------------------------|-----|

| Module | Usage |
|----------------|---|
| Convertor | Convert KASS reference station data (observation, navigation, SBAS) to PEGASUS format |
| GNSS_solution | Generate position error estimates and protection level for calculating the accuracy and integrity |
| Xpl_estimation | Generate protection level for calculating the availability and continuity using KASS message and GPS almanac data |
| M-file runner | Analysis anomalies using daily position and range domain processed data |

Table 5. Events and anomalies during the KASS operational test.

| | Title | Anomaly description | Time and duration | Corrective action |
|---|-------------------|--|--|---|
| 1 | All UDREI NM | Event: User Differential Range Error Indices (UDREIs) for all the SVs are set and broadcast as Nor Monitored (NM) or Do not Use (DU). Root cause: The cycle slip is occurred for one channel between a GPS SV and a KRS. After that, the cycle slip flag lasts during SV visibility period and it can inflate the UDREIs for all SVs. Impact: Continuity | 1. 6/9 (25 min.) 2. 8/24 (2 hours) 3. 10/6 (3 hours) 4. 10/11 (3 hours) | The root cause and solution for anomaly is already derived and the effect on the integrity performance can be negligible. After the operational test, the algo- rithm for KPS will be updated. |
| 2 | KRS Retrofit | Planned Hard Disk Drive (HDD) replacement for all KRSs. | 6/29~7/7 (9 days) | Replace the KRS HDD and re- initialize two KPSs |
| 3 | KUS switch failed | Event: Switch between master and backup is required since L5 interference threshold exceeds a threshold defined in the KUS. However, it is continuously failed and KASS signal is interrupted. Root cause: KUS antenna cable is broken. Impact: Availability | 1. 8/8 (12 hours) 2. 8/30 (12 hours) 3. 8/31 (3 hours) 4. 9/1 (3 hours) | 1. The L5 interference threshold is adjusted within design margin. 2. Replace the KUS antenna cable. |
| 4 | GIVE Toggling | Event: Grid Ionospheric Vertical Error Index (GIVEI) of Ionospheric Grid Point (IGP)s located at the center of KASS service area are set and broadcast as DU for a long time. Root cause: An anomaly is occurred from rubidium clock installed in KRS. It causes difference between IFB estimates from two different estimator. Finally, GIVEI is inflated unintentionally. Impact: Availability, Continuity | 1. 9/9~12 (4 days) 2. 9/20~30 (11 days) 3. 11/2~14 (13 days) | Replace the anomalous rubidium clock. |

가용성을 계산하고, 성능 위해 사건이 발생 여부 및 원인 분석을 수행한다. 최종적으로 한달 단위로 처리된 위치 오차 및 보호수준 을 병합하여 운용시험 기간 동안의 성능 분석 결과를 도출한다.

4.4 성능 분석 시 고려사항

KASS 운용시험의 주요 목적은 시스템의 실제 성능이 분석방 법으로부터 도출된 성능과 얼마나 일치하는지를 확인하여 운용 적합성을 판단하는데 있다. 시험 수행 중에 이상현상(anomaly)이 발생할 경우, 이상현상에 대한 원인 및 영향성을 분석하고 해결 방안을 도출한 뒤에 시스템을 교정(수정 또는 교체)하는 절차를 진행한다. 따라서, 이상현상에 대한 분석이 완료된 경우, 이상현 상에 의해 시스템 성능이 영향을 받은 기간은 성능 분석 결과에 서 제외한다.

KASS 운용시험을 진행하는 기간 동안 KASS 시스템에서 발생 한 주요 사건 및 이상현상은 Table 5와 같으며, 1건의 계획된 신호 중단 사건과 3건의 이상현상이 발생함을 확인할 수 있다.

5. KASS 운용시험 성능 분석 결과

성능 분석은 4장에서 제시된 5개의 KASS 기준국 데이터,

| Table 6. KASS opera | tional test | results: AP | V-I. |
|---------------------|-------------|-------------|------|
|---------------------|-------------|-------------|------|

| | Accuracy (m) | | Integrity (# o | of MI/HMI) | Availability(07) | Continuity rick(/15c) |
|---------|--------------|----------|----------------|------------|------------------|-----------------------|
| | Horizontal | Vertical | Horizontal | Vertical | Availability(%) | Continuity fisk(/158) |
| Target | 16.0 | 20.0 | 0 | 0 | 99.0 | 1.0e ⁻³ |
| YJV | 1.09 | 2.37 | 0 | 0 | 99.54 | 1.26e ⁻³ |
| YDN | 1.21 | 2.33 | 0 | 0 | 99.42 | $1.43e^{-3}$ |
| JJT | 1.48 | 2.77 | 0 | 0 | 99.10 | $1.52e^{-3}$ |
| DDL | 1.50 | 2.67 | 0 | 0 | 99.56 | $1.28e^{-3}$ |
| YYA | 0.93 | 2.19 | 0 | 0 | 99.57 | 1.23e ⁻³ |
| Average | 1.24 | 2.47 | 0 | 0 | 99.438 | 1.34e ⁻³ |

Table 7. KASS operational test results: NPA.

| | Accuracy (m) | Integrity (# of MI/HMI) | Avoilability (07) | Continuity risk (/h) | |
|---------|--------------|-------------------------|-------------------|----------------------|--|
| | Horizontal | Horizontal | Availability (%) | | |
| Target | 220.0 | 0 | 99.0 | 5.0e ⁻⁴ | |
| YJV | 1.8 | 0 | 99.97 | 7.49e ⁻³ | |
| YDN | 2.4 | 0 | 99.94 | 1.22e ⁻² | |
| JJT | 2.1 | 0 | 99.77 | 1.46e ⁻² | |
| DDL | 2.0 | 0 | 99.97 | 7.36e ⁻³ | |
| YYA | 1.7 | 0 | 99.98 | 6.70e ⁻³ | |
| Average | 2.0 | 0 | 99.93 | $9.67e^{-3}$ | |



Fig. 4. Monthly average accuracy.

KASS 메시지, GPS Almanac 데이터를 사용하여 수행하며, 성능 분석 결과에서 4.4절에 제시된 이상현상 발생 기간은 제외한다.

Tables 6과 7은 각각 KASS 운용시험 기간 동안 도출된 KASS APV-I 성능과 NPA 성능을 보여준다. NPA 성능이 Terminal 이나 En-route보다 보수적인 성능 요구사항을 가지기 때문에 Terminal과 En-route에 대한 성능 분석 결과는 본 연구에서 제시 하지 않는다. Tables 6과 7에 제시된 바와 같이 APV-I 및 NPA 모두 정확도, 무결성, 가용성 성능은 목표 성능을 만족한다. 연속성의 경우, 시 험에 사용된 기준국에서 모두 목표 성능을 만족시키지 못하는 것 을 확인할 수 있다. Tables 6과 7을 보면, 울릉(DDL)을 포함한 내 륙 지역의 성능은 거의 유사하며, 기준국 중 최 남단에 위치한 서 귀포(JJT)의 정확성, 가용성, 연속성 수치가 가장 좋지 않은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 APV-I에 대한 기준국별 월간 평균 수직 및 수평 정확 성을 보여준다. Fig. 4로부터 APV-I 수직/수평 정확성은 각각 3.5 m와 2.5 m 이내로 산출되었으며, 10월과 11월에 서귀포(JJT)/울릉 (DDL) 지역이 다른 지역보다 큰 오차가 산출되었음을 확인할 수 있다. 이는 10월과 11월에 전리층 활동이 활발해짐과 동시에 서비 스 영역 외곽으로 갈수록 보정정보의 성능이 열화됨에 따르는 것 으로 분석이 가능하다 (Kim & Kim 2019).

Fig. 5는 APV-I에 대한 기준국별 월간 수직 및 수평 최대 Safety Index를 보여준다. Fig. 5는 각 기준국 별로 매 시점(1초간 격) 측정된 PL과 PE를 사용하여 계산된 Safety Index의 월별 최 대값을 도시하고 있으며, KASS 시스템에서 생성된 무결성 정보 가 보정 정보를 충분히 보증(bound)하고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 APV-I에 대한 기준국별 월간 최대 및 평균 연속성 위 해 확률을 보여준다. Fig. 6a는 월별로 산출된 연속성 위해 확률의 최대값을 도시하며, 5월과 12월에 최소값을 가지며, 8월과 9월에 최대값을 가지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6b는 월별 평균 연속 성 위해 확률을 도시하며, Fig. 6a와 유사한 경향을 보인다. 평균 연속성 위해 확률은 10월 이후부터 낮아지는 경향을 확인하였으 나 남쪽에 위치한 영도(YDN)와 서귀포(JJT)의 10월달 최대 연속 성 위해 확률이 다른 지역보다 높게 나타나는 현상을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 APV-I에 대한 기준국별 월간 최저 및 평균 가용성을 보여준다. Fig. 8a는 월별로 산출된 가용성의 최저값을 도시하며, 남쪽에 위치한 영도(YDN)와 서귀포(JJT)의 가용성이 급격하게 낮아지는 현상을 확인할 수 있다. Fig. 8b는 월별 평균 가용성을



Fig. 5. Monthly maximum safety index.



Fig. 6. Monthly continuity risk.

도시하며, 서귀포(JJT)를 제외한 모든 기준국에서 APV-I 목표 성 능인 99% 이상이 도출됨을 확인할 수 있다. 서귀포(JJT) 기준국 에서의 평균 가용성은 9월과 10월에 가장 낮은 수치가 도출됨을 확인할 수 있다.



Fig. 7. Monthly availability.



Fig. 8. Monthly average V/HDOP.

SBAS의 가용성과 연속성은 4장에서 설명한 바와 같이 SBAS 메시지로부터 산출된 보호수준에 의해 결정된다. 보호수준은 위 성 무결성 정보(UDRE)와 전리층 무결성 정보(GIVE), 그리고 위 성의 배치에 의해 결정된다 (RTCA 2013). 위성 무결성 정보는 위 성의 궤도나 시계 보정 정보에 대한 신뢰도를 의미하기 때문에 시간대나 계절에 대한 상관성이 크지 않으며, 단기적인 변화를 가지기 때문에 월별 연속성 및 가용성 변화 경향 분석에 적절하 지 않다. 따라서, 본 연구에서는 월별 연속성 및 가용성 변화를 분 석하기 위해 위성의 배치와 전리층 무결성 정보의 변화 양상을 사용한다.

Table 8은 2023년 5월 23일부터 12월 15일까지 발행된 NANU 정보를 보여준다 (CelesTrak 2023). Table 8을 보면, 7월 10일 (JDAY:191)부터 GPS PRN 1번 위성에 대한 중단이 시작되었으며,

| | | Outa | ige start | Outag | | |
|------|--------|--------|-----------|-----------------|---------|--------|
| Mon. | SV PRN | DAY | Time | DAY | Time | Dur. |
| | | (JDAY) | (HH:MM) | (JDAY) | (HH:MM) | |
| | 31 | 153 | 13:32 | 153 | 20:24 | 6.9 h |
| 6 | 2 | 159 | 19:34 | 160 | 2:12 | 6.6 h |
| | 11 | 181 | 5:28 | 181 | 11:34 | 6.1 h |
| | 17 | 187 | 21:17 | 188 | 3:39 | 6.4 h |
| | 30 | 195 | 1:45 | 195 | 13:45 | 12 h |
| 7 | 1 | 191 | 10:20 | 222 | 22:00 | 31 d |
| 1 | 28 | 191 | 11:10 | 191 | 16:49 | 5.7 h |
| | 28 | 191 | 23:00 | 195 | 1:07 | 3 d |
| | 30 | 195 | 1:48 | 195 | 6:59 | 5.2 h |
| | 1 | 222 | 22:00 | Decommissioning | | |
| 8 | 15 | 234 | 16:11 | 235 | 14:46 | 22.6 h |
| 0 | 32 | 237 | 2:34 | 237 | 7:40 | 5 h |
| | 28 | 222 | 23:52 | 241 | 23:04 | 19 d |
| | 12 | 244 | 1:37 | 244 | 7:26 | 5.8 h |
| 9 | 2 | 250 | 20:23 | 251 | 2:25 | 6 h |
| | 9 | 257 | 23:52 | 258 | 5:04 | 5.2 h |
| 10 | 21 | 286 | 6:46 | 286 | 11:47 | 5 h |
| 10 | 22 | 292 | 15:59 | 292 | 21:25 | 5.4 h |
| | 15 | 306 | 21:24 | 307 | 3:16 | 5.9 h |
| 11 | 2 | 332 | 10:52 | 332 | 16:19 | 5.5 h |
| | 28 | 334 | 13:19 | 334 | 19:47 | 6.5 h |
| 10 | 8 | 341 | 20:10 | 342 | 2:18 | 6.1 h |
| 12 | 26 | 348 | 17:23 | 348 | 21:54 | 4.5 h |

Table 8. Monthly GPS outage information (CelesTrak 2023).

8월 10일(JDAY:222)에 공식적으로 Decommissioning을 선언한 것을 확인할 수 있다. 이와 함께, GPS PRN 28번 위성은 7월에 3 일 이상의 기간동안 중단이 발생하였으며, 8월에 19일 이상의 중 단이 발생하였다. 특히, 8월 22~23일에 GPS PRN 15번 위성의 중 단이 중복하여 발생함에 따라, 해당 일자의 일간 APV-I 가용성 이 95%까지 낮아짐과 동시에 일간 APV-I 연속성 위해 확률이 8e-3/15s까지 상승한 것을 확인하였다.

Fig. 8은 시험기간 동안 위성 앙각을 15도로 설정하고 산출된 한반도 지역의 월별 평균 수직/수평 Dilution of Precision (DOP) 를 도시한다. KASS 기준국은 위성 앙각 5도부터 신호를 수신하 지만, KASS 중앙처리국에 의해 첫 위성 보정/무결성 메시지가 생 성되는 위성 앙각은 평균적으로 13~15도 사이에 해당한다. Fig. 8 로부터 수직/수평 DOP가 7월과 8월에 가장 높아지는 것을 확인 할 수 있으며, 7월과 8월의 연속성 및 가용성 하락은 GPS 위성의 다중 중단으로 인하여 발생한 것으로 판단이 가능하다.

Fig. 9는 KASS 7개 기준국에서 하루동안 관측된 GPS 위성과 기준국 사이의 Ionospheric Pierce Point (IPP) 궤적(위성 앙각 : 5 도 이상)과 KASS IGP를 보여준다. Fig. 9의 중심부에 위치한 12개 의 IGP(위도: 30~40도, 경도: 120~135도)는 한반도 지역에서 관측 되는 대부분의 IPP를 포함하기 때문에 KASS의 성능과 관련된 주 요한 지점이 된다.

Fig. 10은 6월부터 11월까지 측정된 각 주요 IGP에 대한 가용성 을 보여준다. 5월과 12월의 KASS 연속성과 가용성은 목표 성능을 만족하기 때문에 해당 월에 대한 IGP 가용성은 본 연구에서는 제 시하지 않는다. KASS는 각 IGP에 대해 Grid Ionospheric Vertical Delay (GIVD)와 GIVEI를 방송하며, GIVEI는 0~15 사이의 값을 가진다 (RTCA 2013). GIVEI 값이 커질수록 GIVD의 불확실성이 커짐을 의미하며, GIVEI가 15일 경우, GIVD 값에 따라 NM과 DU 로 나뉘게 된다. 본 연구에서 IGP 가용성은 전체 관측시간 동안



Fig. 9. IPP trajectory & important KASS IGPs.

각 IGP에서 GIVEI가 15 미만인 시간의 비율로 정의한다.

Fig. 11은 동일한 시간대와 동일한 위성에 대해 서로 다른 3개 의 기준국에서 관측된 IPP의 경로를 보여준다. 각각의 IPP에서 의 User Ionospheric Vertical Delay (UIVD)와 User Ionospheric Vertical Error (UIVE)는 인접한 4개 또는 3개의 IGP에 대한 GIVD와 GIVE를 사용하여 계산되며 (RTCA 2013), 본 연구에서 는 4개의 IGP가 구성하는 내부의 영역을 IGP 영역이라 정의한다. Fig. 11을 보면, 동일 시간대에 3개의 IPP 궤적이 서로 다른 3개의 IGP 영역에 위치하고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 10을 통해 9월과 10월의 IGP 가용성이 가장 낮아지는 것을 확인할 수 있으며, 위도 30도에 위치한 IGP 가용성의 열화가 가 장 심하다는 것을 확인할 수 있다. 이는 Figs. 6과 7에서 9월과 10 월의 연속성과 가용성 성능의 열화가 남쪽 지역에 위치한 영도 (YDN)와 서귀포(JJT) 기준국에서 더 심해지는 원인이 된다.

6. 결론

본 연구에서는 KASS 운용시험 방법의 도출 과정 및 결과를 제 시하였으며, 운용시험에서 산출된 시험 결과를 분석하였다. 운용 시험 기간 산정을 통하여 총 207일간의 운용시험이 수행되었으 며, 사건 및 이상현상이 발생한 기간을 제외한 170일간의 데이터 를 성능 분석에 사용하였다.

KASS 운용시험 기간 동안 도출된 APV-I 수직/수평 정확성은 각각 2.47 m와 1.24 m이며, 목표 성능을 만족하는 것을 확인하였 다. 운용시험 기간 동안 무결성 위해 사건인 MI나 HMI가 한 건도 발생하지 않았으며, 무결성의 지표인 Safety index도 평균 0.2로 도출된 것을 확인하였다. APV-I 가용성은 평균 99.44%이며, 목표 성능인 99%를 만족하는 하는 것을 확인하였다. APV-I 연속성 위 해 확률은 평균 1.34 e-3/15s이며, 목표 성능인 1.0 e-3/15s보다 큰 값이 도출되었다. NPA 성능 역시, APV-I 성능과 유사하게 연속 성을 제외한 모든 성능 지표가 목표 성능을 만족하는 결과가 도 출되었다.



Fig. 10. Monthly IGP availability for the important KASS IGPs.



Fig. 11. IPP trajectories observed by 3 different KRSs.

본 연구에서는 월별 APV-I 성능 변화와 함께, 성능에 영향을 주는 원인을 분석하였다. 월별 성능 변화를 분석해본 결과, 정확 성과 무결성의 경우 10월에 서귀포(JJT)에서 성능저하가 발견되 었다. 연속성 위해 확률은 8월과 9월에 높아져 연속성이 저하되 는 것을 확인하였으며, 가용성 역시 7월부터 9월에 가장 낮은 값 이 도출되었다. 분석 결과, 7월과 8월은 잦은 GPS 위성의 고장 (outage)에 의해 성능이 저하되는 것을 확인하였으며, 9월과 10월 에는 IGP의 가용성이 낮아짐에 따라 성능 저하가 발생함을 확인 하였다. 특히, 9월과 10월은 남쪽에 위치한 IGP의 비가용으로 인 하여 서비스 영역의 남쪽에 위치한 서귀포(JJT)와 영도(YDN)에 서 연속성과 가용성이 모두 저하되는 것을 관측하였다.

본 연구를 통한 분석결과 KASS 시스템의 연속성과 가용성이 전리층 환경과 GPS 위성군의 변화에 민감하다는 것을 확인하였 다. 일반적으로 SBAS 시스템의 정확성과 무결성은 사용자의 안 전과 직접적으로 관련되며, 연속성과 가용성은 사용자의 편의성 과 관련된다. 따라서, 단기적으로는 KASS를 사용하고자 하는 공 항에서 대체 접근 절차를 수립하여야 할 것이며, 적절한 성능 예 측 도구의 개발을 통해 갑작스러운 서비스 중단을 최소화하여야 할 것이다. 이와 함께, 중/장기적으로는 지속적인 시스템 성능 감 시 및 연구개발을 통해 KASS의 성능을 개선할 필요가 있다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 연구는 국토교통부 항공안전기술개발사업 연구비지원 (RS-2021-KA164208)에 의해 수행되었습니다.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, B.Yi and H.Kim; methodology, B.Yi and H.Kim; software, H.Kim; validation, B.S.Lee, M.Son; formal analysis, M.Son, B.Yi and H.Kim; investigation, B.Yi; resources, B.S.Lee; data curation, B.S.Lee; writing original draft preparation, H.Kim; writing—review and editing, H.Kim and B.Lee; visualization, H.Kim; supervision, H.Kim and M.Son; project administration, M.Son; funding acquisition, M.Son.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

CelesTrak 2023, GPS NANU Messages 2023, cited 2023 December 30, available from: https://celestrak.org/ GPS/NANU/2023

- ESSP 2024, Monthly Performance Report April 2024, May 2024, available from: https://egnos.gsc-europa.eu
- EUROCONTROL 1999, EGNOS operational test and validation for civil aviation: programme outline, EEC Technical / Scientific Reports, December 1999, available from: https://www.eurocontrol.int/node/10055
- EUROCONTROL 2022, PEGASUS GNSS_Solution: DESIGN JUSTIFICATION, PEGASUS Team, March 2022, available from: https://www.eurocontrol.int/tool/ pegasus
- Gao, W., Cao, Y., Liu, C., Lu, J., Shao, B., et al. 2022, Construction Progress and Aviation Flight Test of BDSBAS, Remote Sensing, 14, 1218, https://doi. org/10.3390/rs14051218
- ICAO 2006, International Standards and Recommended Practices, Annex 10: Aeronautical Telecommunications, Volume I Radio Navigation Aids 6th ed., July 2006
- ICAO 2008, Performance Based Navigation Manual (3rd edition), Doc 9613
- ICG 2007, MSAS Current Status, Second Meeting of the International Committee on Global Navigation Satellite Systems, Bangalore, India, 5-7 September 2007, available from: https://www.unoosa.org/documents/ pdf/icg/activities/2007/icg2/presentations/04_01.pdf
- IGS 2019, RINEX 2.11, cited 2019 October 29, available from: https://igsorg.zendesk.com/hc/en-us/article_ attachments/115007664947
- ION 2019, ION Newsletter The World of WAAS: Part 1, cited 2019 winter, available from: https://www.ion.org/ newsletter/upload/ION_Newsletter_WorldofWAAS_3_ parts.pdf
- Jeong, M.-S. & Kim, J.-R. 2009, Analysis of MSAS Correction Information and Performance in Korea, Journal of the Korean Society for Aeronautical Space Sciences, 37,372-382. https://doi.org/10.5139/jksas.2009.37.4.372
- Kang, S., Song, J., Kim, O., & Kee, C. 2018, Analysis on Normal Ionospheric Trend and Detection of Ionospheric Disturbance by Earthquake, Journal of Advanced Navigation Technology, 22, 49-56. https:// doi.org/10.12673/JANT.2018.22.2.49
- Kim, J. & Kim, Y. 2023, Long-term Analysis of Availability and Accuracy Variation of GPS Ionospheric Delay Model, Journal of Advanced Navigation Technology, 27, 841-848. https://doi.org/10.12673/JANT.2023.27.6.841
- Kim, M. & Kim, J. 2019, Selection Methods of Multi-Constellation SBAS in WAAS-EGNOS Overlap Region, Journal of Advanced Navigation Technology, 23, 237-244. https://doi.org/10.12673/JANT.2019.23.3.237
- NSTB/WAAS T&E Team 2024, Wide area augmentation

system performance analysis report, Report #88, April 2024, available from: http://www.nstb.tc.faa.gov

- Park, J. I., Lee, E. S., Heo, M., & Nam, G. W. 2016, Study on Technical Standard of Aviation GNSS for SBAS Performance Based Navigation, Journal of Advanced Navigation Technology, 20, 305-313. https://doi. org/10.12673/jant.2016.20.4.305
- RTCA 2013, Minimum Operational Performance Standards (MOPS) for Global Positioning System/Satellite-Based Augmentation System Airborne Equipment (RTCA DO-229D, Change 1), 2013 February, available from: http:// www.rtca.org/product
- RTCA 2020, Minimum Operational Performance Standards (MOPS) for Global Positioning System/Satellite-Based Augmentation System Airborne Equipment (RTCA DO-229F), 2020 June, available from: http://www.rtca.org/ product



Heesung Kim received the B.S. degree, the M.S. degree and the Doctor's degree in School of Electronics, Telecommunication & Computer Engineering, Korea Aerospace University, Korea, in 2007, 2009, and 2014, respectively. He is a senior researcher in Satellite Navigation R&D division in Korea

Aerospace Research Institute. His research interests include Multi-frequency Multi-constellation (MFMC) Network RTK and SBAS.



Minhyuk Son received his B.S., M.S. degrees in Electrical Engineering from Daegu University, South Korea, in 2009, and 2011, respectively. He received B.S. degree from the same university. He joined Korea Aerospace Research Institute in 2011 and is currently involved in Korea Augmentation

Satellite System (KASS) development program. His research interests include SBAS, GNSS, and control engineering.



ByungSeok Lee received the B.S. degree in Electric and Electrical Engineering, the M.S. degree and the Doctor's degree in Electrical and Computer Engineering from University of Seoul, Seoul, Korea, in 2002, 2009, 2015, respectively. He has been conducting research related to a Global Navigation

Satellite System (GNSS) including the Satellite Based Augmentation System (SBAS) in Korea Aerospace Research Institute.



Baeckjun Yi received the B.S. degree and the M.S. degree in School of Mechanical Engineering, A-jou University, Korea, in 1995, and 1998, respectively. He is a senior engineer in Satellite Navigation R&D division in Korea Aerospace Research Institute. His research interests include

certification and product assurance of SBAS.