

김포국제공항의 GBAS 지상시험 및 성능 분석

GBAS Ground Testing and Performance Analysis at Gimpo International Airport

정명숙¹ · 최윤정¹ · 윤영선¹ · 배중원¹ · 전향식¹ · 이영재^{2*}

¹한국항공우주연구원 교통항법연구센터

²건국대학교 항공우주정보시스템공학과

Myeong-Sook Jeong¹ · Yunjung Choi¹ · Youngsun Yun¹ · Joongwon Bae¹ · Hyang-Sig Jun¹ · Young Jae Lee^{2*}

¹CNS/ATM and Satellite Navigation Research Center, Korea Aerospace Research Institute, Daejeon 305-806, Korea

²Department of Aerospace Information System Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

[요 약]

위성항법지역보강시스템(GBAS)은 항공기 정밀접근을 지원하는 차세대 항행안전무선시설로, 최근 GBAS 설치 및 서비스를 제공하는 공항들이 전 세계적으로 증가하고 있다. 한국도 2013년 김포국제공항에 국내 최초로 미국 Honeywell사의 GBAS 지상장비인 SLS-4000을 설치하였으며, 지상시험을 통해 설치된 장비의 기능 및 성능을 점검하였다. 본 논문에서는 GBAS 지상시험에 대한 국내 GBAS CAT-I 시험평가 기준 및 방법을 소개하고, 김포국제공항에서 진행된 GBAS 시험평가 방법에 대해 기술하였다. 또한 GBAS 지상시험의 12개 시험항목 중 주요 5개 시험항목에 대한 상세한 시험평가 방법 및 분석 결과를 기술하였다.

[Abstract]

Ground based augmentation system (GBAS) is a next generation radio navigation aids to support precision approach of aircraft. Recently, airports installing GBAS and providing GBAS service are increasing all over the world. For the first time in Korea, SLS-4000 which is the GBAS ground equipment of Honeywell had been installed at Gimpo International Airport in 2013, and evaluated its functionality and performance of through the ground testing. This paper introduces a ground test and evaluation criteria on the CAT-I GBAS system, and describes testing methods for GBAS ground testing of Gimpo International Airport. In addition, detail testing methods and analysis results on major five of 12 ground test items are described.

Key word : Ground base augmentation system, Ground testing, Pseudorange correction, Protection level.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2015.19.1.22>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 15 January 2015; Revised 26 January 2015
Accepted (Publication) 10 February 2015 (28 February 2015)

*Corresponding Author; Young Jae Lee

Tel: +82-2-450-3358

E-mail: younglee@konkuk.ac.kr

I. 서론

위성항법지역보강시스템 (GBAS; ground based augmentation system)은 위성항법을 기반으로 공항근처 약 20 NM 반경 이내에 위치한 항공기에 활주로 착륙을 유도하는 정밀접근서비스(precision approach service)와 정밀위치서비스 (DCPS; differential correction positioning service)를 제공해주는 시스템으로, 기존 계기착륙시스템 (ILS; instrument landing system)을 대체할 수 있는 차세대 항행안전시설이다.

항공기의 활주로 접근구간에서 GBAS는 ILS가 제공하는 직선접근(straight-in approach) 이외에 곡선접근(curved approach), 가변활공각접근(variable glide slope approach), 활주روی설시단접근(runway displaced threshold approach) 등 보다 다양한 활주로 접근 절차를 제공할 수 있어 항공 교통량을 보다 효율적으로 처리할 수 있다. 또한 경제적인 측면에 있어서도 ILS는 아날로그 방식으로 지향성 전파의 변조도차(DDM; difference in depth of modulation)를 이용하여 항공기 접근서비스 제공하고 있기 때문에 각 활주로 항공기 진입방향 별로 ILS 지상장비를 설치해야 하는 반면에, GBAS는 무지향성 VDB 안테나를 통해 디지털방식으로 접근서비스를 제공하고 있기 때문에 각 공항당 1식의 GBAS 지상장비만 설치하여 여러 활주루에 대한 접근 서비스를 제공할 수 있다. 따라서 장비 설치비용 및 유지보수 비용 측면에 있어서도 GBAS가 ILS 보다 훨씬 경제적이다.

이러한 장점들을 바탕으로 GBAS는 1990년대부터 미국과 유럽을 중심으로 장비 개발에 대한 본격적인 연구가 시작되었으며, 2009년 9월 미국 Honeywell사의 SLS-4000 모델이 미연방항공청 (FAA; federal aviation administration)으로부터 세계 최초 및 유일하게 Category I (CAT-I)급 제품인증을 획득한 이후, 세계 여러 나라는 각국 공항에 SLS-4000 모델을 시범적으로 도입 및 설치하여 자국에서의 적합성 및 운용성 연구를 진행해 오고 있다. 이러한 결과로, 2012년 2월부터 독일 Bremen 공항이 세계 최초로 GBAS CAT-I 상용 서비스를 시작하였으며, 이후로도 2012년 9월 미국 Newark 공항, 2013년 3월 Houston 공항, 2014년 5월 스페인 Malaga 공항 및 호주 Sydney 공항이 각각 상용서비스를 시작하였다. 이러한 세계적 추세에 맞추어 한국도 GBAS 운용기술 확보 및 절차 수립 차원에서 2013년 국내 최초로 김포국제공항에 GBAS 지상장비인 SLS-4000을 설치하였으며, 지상 및 비행시험을 통해 설치된 GBAS 지상장비에 대한 기능 및 성능을 검증하였다.

본 논문에서는 국제 기술규격 및 해외 시험평가 사례를 바탕으로 국내 GBAS CAT-I 지상시험 평가기준 및 방법을 제시하고, 김포국제공항에서 진행된 GBAS 지상시험 평가방법 및 결과에 대해 기술하였다. 국내 규정에 의거 GBAS 지상시험은 총 12항목에 대한 평가를 진행하였으며, 본 논문에서는 이들 항목 중 주요 5개 항목에 대한 시험평가 방법 및 결과에 대해 상세 기술하였다.

II. GBAS 및 SLS-4000 설치 개요

GBAS는 크게 지상시스템과 항공기 탑재시스템으로 구성되며, 지상시스템을 구성하는 주요 GBAS 지상장비는 4개의 기준국 수신기(RR; reference receiver)와 1개의 VDB(VHF data broadcast) 안테나 그리고 주처리장치(main processor)를 포함한 쉘터(shelter)로 구성된다. 기준국 수신기는 GPS (global positioning system) 위성정보를 수집하고, 수집된 GPS 정보는 쉘터 내 주처리장치를 통해 GBAS 보정정보를 생성하는데 이용되며, 생성된 GBAS 보정정보는 무결성(integrity) 정보 및 항공기의 활주로 접근유도를 위한 최종접근구간 (FAS; final approach segment) 정보와 함께 VDB 안테나를 통해 항공기로 전송된다. 항공기 탑재시스템은 GLS (GNSS landing system) 기능이 포함된 다중모드수신기 (MMR; multi-mode receiver)가 GPS 위성으로부터 GPS 신호와 지상 VDB 안테나로부터 VDB 신호를 수신하여 활주로 착륙을 위한 착륙유도정보를 생성하고, 생성된 정보는 계기를 통해 조종사에게 시현되며, 자동착륙 (autoland) 장비와도 연동되도록 구성되어 있다[1].

그림 1과 같이 김포국제공항에 설치된 SLS-4000은 국내 항행안전무선시설 설치 기준 및 Honeywell사의 SLS-4000 설치 기준에 의거하여 활주로 32 녹지대 부근에 설치되었으며, 이때 4개의 기준국 수신기는 약 200 m 간격으로 평행사변형 형태로 배치되었다. 기준국 수신기는 GNSS 수신기, 저잡음 증폭기 (low noise amplifier), 수신기 전류공급장치, 낙뢰방지장치, RS422 트랜스시버로 구성되어 있으며, GNSS 수신기는 48채널, GPS L1(1575.42 MHz) 단일 위성신호를 수신할 수 있다. 기준국 수신기 안테나는 기존 원형 접시모양의 dipole 방식 안테나와 달리 원통 막대모양으로 다중경로오차를 최소화하도록 특수 설계되었으며, 높이는 약 2 m이다[2].

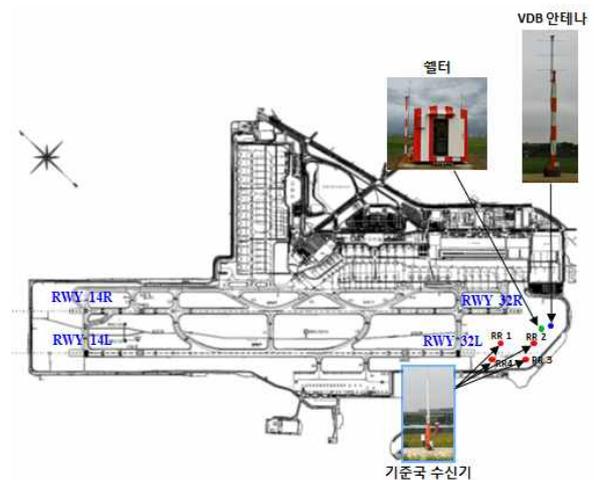


그림 1. 김포국제공항의 SLS-4000 설치 위치
 Fig. 1. Installation position of SLS-4000 in Gimpo international airport.

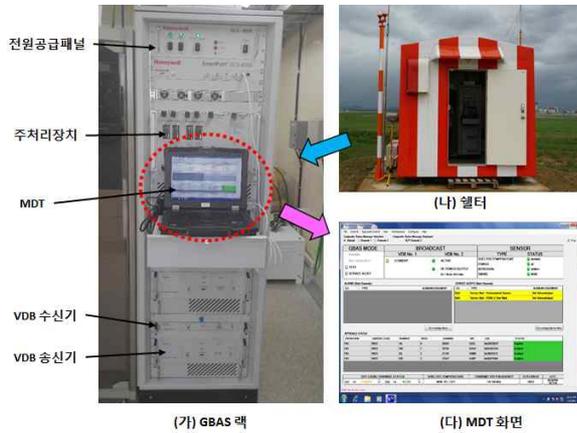


그림 2. SLS-4000 랙 및 MDT
Fig. 2. SLS-4000 rack and MDT.

셸터는 그림 1의 기준국 수신기 RR2로부터 약 200 m 가량 떨어진 곳에 위치하고 있고, VDB 안테나는 셸터로부터 약 10~15 m 가량 떨어져 있으며 지표면으로부터의 안테나 고도는 약 10 m이다. 셸터 내에는 그림 2와 같이 주처리장치, VDB 송/수신기, 전원공급패널 등을 포함하는 랙이 설치되어 있는데, 주처리장치는 GBAS 보정정보, 무결성 정보, FAS 정보 등을 생성하는 역할을 수행하고, VDB 송신기는 주처리장치가 생성한 정보를 코드화하여 VDB 신호를 만드는 역할을 수행한다. VDB 송신기는 코드화된 VDB 신호를 각각 VDB 안테나와 VDB 수신기로 전송하는데, VDB 안테나는 수신된 VDB 신호를 항공기로 방송하는 역할을 수행하고, VDB 수신기는 코드화된 VDB 신호를 다시 디코드화하여 주처리장치로 전송하는 역할을 수행한다. 주처리장치는 VDB 수신기로부터 받은 디코드화된 VDB 신호를 이용하여 VDB 송신기가 생성한 VDB 신호에 대한 데이터 오류 검사를 수행하며, 만약 오류가 발견되었을 경우 즉시 VDB 신호 전송을 중단한다. 한편, SLS-4000은 유지보수 자용 원격관리장치인 MDT (maintenance data terminal)를 통해 장비 유지보수 관리자가 장비의 동작 및 기능을 제어하고, 장비의 서비스 상태를 모니터링 할 수 있도록 지원하고 있으며, 또한 관제사용 상태감시장치인 ATSU (air traffic status unit)를 통해 항공교통관제사에게 GBAS 지상장비 동작 상태에 대한 정상 여부 및 GBAS 서비스 가용 여부를 제공하고 있다.

III. 시험 방법

3-1 지상시험 평가 기준

국내 항행안전무선시설은 국토교통부에서 고시하는 항행안전무선시설의 설치 및 기술기준에 의거하여 장비를 설치하고, 지상시험을 통해 기능 및 성능을 검증하도록 하고 있다. 국내의 경우 본 연구를 수행하기에 앞서 GBAS 지상장비를 국내 공항

표 1. GBAS 지상시험 항목 및 요구조건

Table 1. GBAS ground testing items and requirements.

시험 항목	평가 기준	관련 문서 및 장절		
		Annex 10	Doc 8071	ED 114
위치영역 정확도 시험	< 16 m 수평, < 4 m 수직	-	4.3.12	-
의사거리영역 정확도 시험	GAD curve 이내	App.B 3.6.7.1.1	4.2.9 to 4.2.11.2	5.4
연속성 시험	- VDB 송신 중단 없음 - PL < AL - MT1 block ≥ 4	App.B 3.6.7.1.3	4.2.13 to 4.2.17	5.3.2
대류층 지연 및 잔차 불확실성 시험	송수신 정보 일치	-	4.2.20	-
전리층 잔차 불확실성 시험	송수신 정보 일치	-	4.2.21	-
기준국수신기 안테나 위상중심 위치 정확도 시험	< 8 cm	App.B 3.6.7.2.3.3	4.2.22	5.16.4
VDB 데이터 내용 확인 시험	송수신 정보 일치	App.B 3.6.4	4.2.23	-
신호간섭	GPS 신호세기 < interference mask	App. B 3.7	4.2.24	5.16.6
주파수 및 주파수 안정성 시험	±0.0002% 이내	App.B 3.6.2.1	4.2.26	-
활주로 표면 신호통달범위 시험	-99 dBW/m ² ~ -35 dBW/m ²	App.B 3.7.3.5.3.1.1	4.2.31 to 4.2.33	-
인접채널 시험	if VDB 출력 < 150 Watt, relative power < -40 dBc else if VDB 출력 ≥ 150 Watt, maximum power < 12 dBm	App.B 3.7.3.5.4.4	4.2.29 to 4.2.30	5.6.2.1.7
VDB 송신 전력 모니터링 시험	3 dB	App.B 3.6.7.3.1.3	4.2.34 to 4.2.36	-

에 설치 한 경험이 전무하기 때문에 GBAS 지상시험에 대한 평가 항목 및 평가 방법에 대한 기준이 수립되어 있지 않았다. 이에 ICAO Doc 8071 Vol.2, ICAO Annex 10 Vol.1, EUROCAE ED-114 와 같은 국제기술표준문서와 해외 GBAS 지상시험 평가 사례를 바탕으로 표 1과 같이 국내 GBAS 지상시험 평가 항목 및 평가 기준을 수립하였으며, 김포국제공항에 설치된 GBAS 지상장비에 대해 표 1의 총 12개 시험항목에 대해 시험 평가를 진행하였다 [3]-[6].

3-2 시험 장비

표 1의 GBAS 지상시험 중 일부 시험 항목은 셸터 내 또는 고정된 위치에서 시험을 진행하지만, 활주로 표면 신호통달범위 시험 및 VDB 데이터 시험 등은 공항 내 활주로, 유도로, 순환도로 등을 이동하여 시험을 수행하여야 한다. 따라서 그림 3과 같이 장비 이동이 편리한 GBAS 탑재시험평가장비를 자체 개발하고 이를 차량에 탑재하여 시험을 수행하였다.



그림 3. GBAS 탑재시험평가장비
Fig. 3. GBAS onboard test equipment.

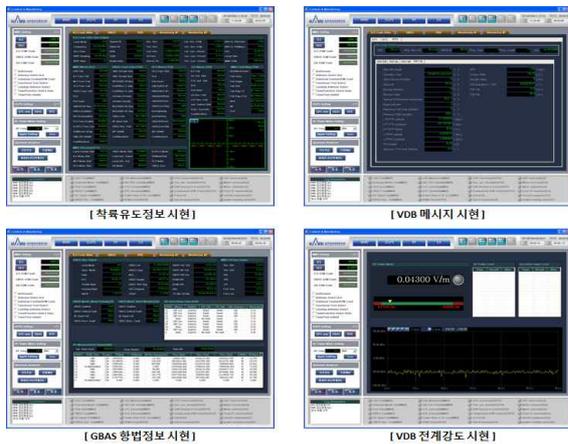


그림 4. GBAS 탑재시험평가장비 제어 및 시험 프로그램
Fig. 4. Program for control and display of GBAS onboard test equipment.

GBAS 탑재시험평가장비는 시험평가에 필요한 데이터를 수집할 수 있도록 MMR, GPS수신기, RF power meter, 스펙트럼 분석기 등의 계측장비와 이들 계측장비를 제어할 수 있는 제어 컴퓨터, 그리고 그림 4와 같이 계측장비의 출력정보 및 데이터 분석 결과를 시험할 수 있는 시험장치로 구성되어 있다. 시험 평가자는 그림 4의 GBAS 탑재시험평가장비 제어 및 시험 프로그램을 통해 각각의 계측 장비를 제어하고 또한 계측 장비에서 출력되는 정보를 실시간으로 모니터링 할 수 있다[7]. 그 밖에 의사거리영역 정확도 시험 및 연속성 시험 등 장기간의 시험 데이터에 대한 분석이 필요한 시험의 경우, 별도의 GPS 안테나 및 VDB 안테나를 GBAS 쉘터의 옥상에 설치하고 쉘터 내 GPS 수신기와 VDB 수신기를 설치하여 장기간 데이터를 수집하였다.

IV. 시험 결과

김포국제공항에 설치된 CAT-I급 GBAS 지상장비인

Honeywell사 SLS-4000은 2013년 1월부터 설치작업을 시작하여 2013년 7월 말경 설치가 완료되었고 이후, 2013년 8월부터 ~ 2014년 4월까지 앞서 소개한 표 1의 GBAS 지상시험 평가항목 및 평가기준을 바탕으로 지상시험평가를 수행하였다. 12개 시험항목 모두 평가기준을 만족하였으며, 본 장에서는 12개 시험항목 중 GBAS 지상장비가 제공하는 정확도 및 연속성 등의 성능을 간접적으로 확인할 수 있는 위치영역 정확도 시험, 의사거리영역 정확도 시험, 연속성 시험과 VDB 신호의 적절한 출력 및 송수신 데이터의 오류를 평가하는 활주로 표면 신호통달범위 시험, VDB 데이터 내용 확인 시험 등 주요 5개 시험항목에 대한 구체적인 평가 방법 및 결과를 기술하였다. 그 밖의 나머지 7개 지상시험 항목은 주파수 카운터, 스펙트럼 분석기 등의 계측기를 이용하여 간단하게 시험평가를 진행할 수 있으므로, 본 논문에서 다루지 않았으며 자세한 시험방법은 국내 항행안전전문시설의 설치 및 기준을 통해 확인할 수 있다.

4-1 위치영역 정확도 시험

위치영역 정확도 시험은 공항내 특정 위치에서 200초 간격으로 3회 연속으로 GBAS 정지 측량을 수행하고, 이를 정밀 위치 좌표값과 비교하여 GBAS 위치정확도를 평가하는 시험이다. 본 시험은 기능적 측면에서 위치정확도를 평가하는 시험으로 정확도의 신뢰도까지는 고려하고 있지 않다. 시험 평가를 위해 VDB 안테나로부터 약 4 km 가량 떨어진 활주로 14L 시단 부근의 공항 내 순환도로에서 GBAS 탑재시험평가장비의 MMR과 GPS 수신기를 이용하여 4시간 이상 정지 측량을 수행하였다. MMR을 통해서 GBAS 위치정보를 수집하였고, GPS 수신기를 통해서 GPS L1, L2 raw 데이터를 수집하였다. 수집된 GPS L1, L2 raw 데이터는 CSRS (canadian spatial reference system) 사이트에서 제공하는 온라인 GIPSY (GNSS-inferred positioning system) 프로그램인 PPP (precise point positioning)를 이용하여 정지측량이 이루어진 위치의 정밀 위치 좌표값을 얻었다[8]. PPP는 수 cm 이하의 정확도를 제공하므로 PPP가 제공하는 위치 좌표는 참값으로 가정할 수 있으며, 평가를 위해 PPP를 통해 얻어진 정밀 위치 좌표값을 기준으로 MMR에서 출력된 GBAS 위치정보의 수평 및 수직 위치오차를 계산하였다. 표 2는 UTC (coordinated universal time)를 기준으로 2013년 12월 12일 2시 1분 30초에서부터 200초 간격으로 3회 연속 측정된 GBAS 위치좌표의 수평 및 수직오차를 나타낸 것으로, 3회 모두 1 m 이하의 위치오차 값을 가졌으며, 이는 평가 요구 조건인 수평 16 m, 수직 4 m를 충분히 만족함을 확인하였다.

표 2. 위치영역 정확도 시험 결과

Table 2. Position domain accuracy test results.

시험횟수	시험시간(UTC)	수평오차 (m)	수직오차 (m)
1회	2013/12/12, 02:01:30	0.3968	-0.6113
2회	2013/12/12, 02:04:50	0.1532	-0.3737
3회	2013/12/12, 02:08:10	0.3736	-0.5260

한편, 2014년 3월 25일 김포국제공항 GBAS 쉘터 근처의 고정된 위치에서 24시간 동안 GPS raw 데이터, GBAS VDB 데이터, 일본의 SBAS (satellite based augmentation system) 위성인 MSAS (multi-functional satellite augmentation system) 위성으로 부터의 SBAS 데이터를 수집한 후 EUROCONTROL에서 제공하는 GPS 후처리 분석 틀인 PEGASUS를 이용하여 GPS, SBAS, GBAS가 제공하는 위치정보의 정확도를 비교 분석하였다[9]. 그림 5와 그림 6은 각각 GPS, SBAS, GBAS 시스템이 제공하는 위치정보의 수평 위치오차와 수직 위치오차를 비교하여 나타낸 것으로, 이때 GPS 위치정보는 GPS L1 단일 주파수만을 이용하여 계산된 위치정보이다. 각각의 시스템이 제공하는 위치정보의 오차는 GBAS < SBAS < GPS 순으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 표 3은 동일 시험에서 각 시스템이 제공한 위치정보의 수평 및 수직 위치오차에 대한 평균 및 2DRMS (twice the distance root mean square, 정확도 95%)를 계산한 결과로, L1 단일 주파수만을 이용하여 얻은 GPS 위치정보의 오차는 수평 약 8.66 m, 수직 약 10.36 m를 갖고, SBAS는 수평 약 2.76 m, 수직 약 5.50 m의 위치오차를 갖는 것을 확인하였다. 이에 반해 GBAS는 수평위치오차 약 0.76 m, 수직위치오차 약 1.04 m로 GPS L1 단일 주파수 위치해와 SBAS 대비 그 정확도가 매우 뛰어남을 확인할 수 있다.

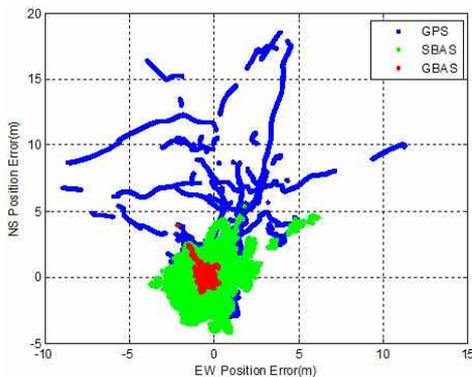


그림 5. 수평 위치 오차
Fig. 5. Horizontal position errors.

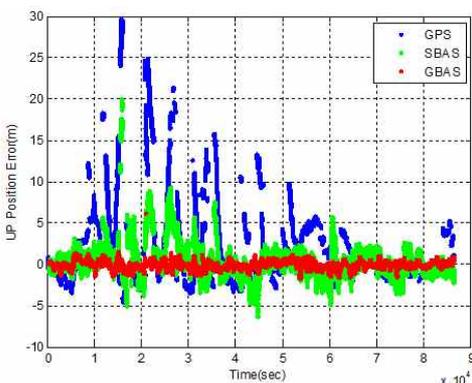


그림 6. 수직 위치 오차
Fig. 6. Vertical position errors.

표 3. 위치정확도 비교 결과(정지측량)

Table 3. Comparative results of position accuracy(static survey).

구분	GPS		SBAS		GBAS	
	평균	2DRMS	평균	2DRMS	평균	2DRMS
수평오차	3.48 m	8.66 m	1.17 m	2.76 m	0.55 m	0.76 m
수직오차	2.18 m	10.36 m	0.40 m	5.50 m	-0.03 m	1.04 m

4-2 의사거리영역 정확도 시험

의사거리영역 정확도 시험은 실제 공항에 설치된 GBAS 지상장비가 제공하는 의사거리보정정보 (PRC; pseudorange correction)의 정확도가 GBAS 지상장비에 할당된 GAD (ground accuracy designator) 등급에 부합하는지를 평가하는 시험이다. GAD는 GBAS 기준국 수신기가 제공하는 의사거리정보의 정확도 성능에 따라 A, B, C 세 등급으로 나뉘며, A < B < C 순으로 정확도 성능이 우수하다. 즉 기준국 수신기의 성능에 따라 GBAS 지상장비의 GAD 등급이 결정되면, GBAS 지상장비가 제공하는 PRC 오차 표준편차 모델은 식(1)과 표 4에 의해 GPS 위성 각각을 기준으로 그림 7과 같이 GAD 등급별로 다르게 설정된다. 따라서 의사거리영역 정확도 시험은 GBAS 지상장비에서 실제 방송되는 PRC에 포함된 오차성분의 분포가 GBAS 지상장비에 할당된 GAD 등급에 따른 PRC 오차 표준편차 모델, 즉 그림 7의 GAD 커브 곡선을 아래에 분포하고 있는지를 평가하는 시험이다. 식(1)의 σ_{pr_gnd} 는 PRC 오차 표준편차, M은 GBAS 지상장비의 기준국 수신기 수, θ_i 는 GPS 위성의 각각을 의미한다[10].

$$\sigma_{pr_gnd}(\theta_i) \leq \sqrt{\frac{(a_0 + a_1 e^{-\theta_i/\theta_0})^2}{M} + (a_2)^2} \quad (1)$$

GBAS 지상장비에서 생성된 PRC 정보에는 전리층 지연오차, 대류층 지연 오차, 위성궤도 및 시계오차와 같이 GBAS 기준국 수신기와 항공기 탑재 GPS 수신기가 공통으로 갖는 GPS 오차 보정정보 이외에 다중경로오차(multipath error), 수신기 열잡음(thermal noise) 등과 같이 서로 다른 수신 간에 공통되지 않는 오차 보정정보도 함께 포함되어 있다. 따라서 항공기 탑재 GPS 수신기 측면에서 보면 PRC 정보에 포함된 기준국 수신기의 다중경로 오차, 수신기 열잡음은 PRC 정보의 오차 성분에 해당된다. 따라서 의사거리영역 정확도 시험은 GBAS 지상장비에서 방송되는 PRC 정보에 포함된 다중경로오차, 수신기 열잡음 등의 값을 추출하고 그 값을 GPS 위성각각에 따라 분포시켰을 때 그 값의 분포가 앞서 언급한 GBAS 지상장비의 GAD 등급에 따른 PRC 오차 표준편차 모델에 포함되는지를 평가하는 시험이다.

표 4. GPS 위성 양각에 따른 GAD 파라미터
Table 4. GAD parameters corresponding to elevation angle of GPS satellite.

GAD	θ_i (°)	a_0	a_1	θ_0	a_2
A	≥ 5	0.5	1.65	14.3	0.08
B	≥ 5	0.16	1.07	15.5	0.08
C	>35	0.15	0.84	15.5	0.04
	5~35	0.24	0	-	0.04

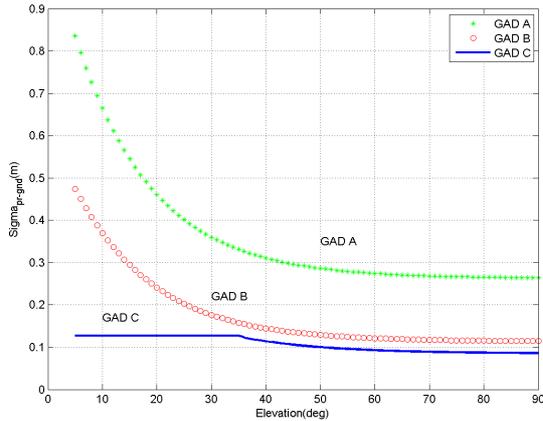


그림 7. GAD별 PRC 오차 표준편차 모델 (GAD 곡선)
Fig. 7. Standard deviation of PRC error by GAD letter (GAD curve).

항행안전무선시설에 대한 시험평가 기준 및 방법을 제시하고 있는 국제기술표준문서인 ICAO Doc 8071 Vol.2에서는 의사거리영역 정확도 평가를 수행하는 방법으로 B-value 분석 기법과 CMC(code minus carrier) 분석 기법이 있으나 이중 B-value 분석 기법을 더 권장하고 있다. CMC 분석 기법은 GPS L1 코드(code)와 반송파(carrier)의 차분을 통해 기준국 수신기와 항공기 탑재 GPS 수신기 간의 공통 오차 성분을 제거하고 나머지 비 공통 오차인 다중경로오차와 수신기 열잡음 값의 크기를 직접적으로 계산해 내는 방식이다. 이 방법은 B-value 분석 기법보다 좀 더 정확하게 PRC 오차성분을 추출할 수는 있으나, 기준국 수신기와 항공기 탑재 GPS 수신기 간의 공통 오차 요소인 전리층 지연오차는 코드와 반송파의 단순 차분을 통해 제거되지 않기 때문에 GPS L1, L2 이중주파수를 이용하여 전리층 지연오차를 계산 및 제거하는 과정을 거쳐야 한다는 단점이 있다. 즉, 이를 위해 GBAS 기준국 수신기 및 안테나가 GPS 이중주파수를 수신할 수 있어야 한다. 뿐만 아니라 이 기법은 코드-반송파 차분시 반송파 모호정수 (ambiguity)를 제거하는 과정에서 다중경로오차 중 long delay multipath 성분 또한 함께 제거될 수 있다는 문제점도 갖고 있다[2].

이에 반해 B-value 분석 기법은 VDB MT(message type)1 메시지에 포함되어 방송되는 GBAS 지상장비의 각 기준국 수신기 별 B-value 값을 이용하여 PRC 정확도를 간접적으로 분석하는 방법이다. B-value는 식 (2)와 같이 동일 GPS 위성에 대해 각

기준국 수신기에서 생성된 PRC정보와 나머지 기준국 수신기가 생성한 PRC 정보의 평균값과의 차로써, 서로 다른 기준국 수신기 간의 비공통 오차 값이다. 식(2)에서 $PRC_{i,j}$ 는 i번째 기준국 수신기에서 생성된 j번 GPS 위성에 대한 PRC 정보를 의미하고, $M(t)$ 는 해당시점에 가용한 기준국 수신기의 개수를 의미한다[11].

$$B_{k,j}(t) = \frac{\sum_{i=1}^M PRC_{i,j}(t)}{M(t)} - \frac{\sum_{i=1(i \neq k)}^M PRC_{i,j}(t)}{M(t) - 1} \quad (2)$$

B-value 값은 정확한 다중경로오차, 수신기 열잡음 값은 아니지만 서로 다른 기준국 수신간의 비공통 오차 성분을 포함하고 있는 값이므로, 기준국 수신기와 항공기 탑재 GPS 수신기 간의 비공통 오차 성분으로도 볼 수 있다. 즉, B-value 값에 다중경로오차, 수신기 열잡음에 준하는 성분이 포함되어 있으므로 이를 PRC 오차 성분으로 가정할 수 있다. B-value 분석 기법의 경우 CMC 분석 기법과 달리 L1, L2의 이중 주파수를 이용한 전리층 지연오차 추정 및 L1 코드-반송파 차분 등의 연산이 요구되지 않으며, 단순히 VDB를 통해 방송되는 B-value 정보를 수집한 후 이를 위성 양각에 따라 분포시켜 GAD 곡선과 비교를 통해 의사거리영역 정확도 평가를 수행할 수 있어 CMC 분석 기법 보다 평가가 용이하다.

B-value를 이용한 의사거리영역 정확도 평가를 수행하기 위해서는 우선 GBAS 지상장비에서 방송되는 VDB MT1의 각 기준국 수신기별 B-value 값을 최소 24시간(1일) 수집한 후 200초마다 1개의 독립된 B-value 샘플을 추출한다. 추출된 B-value는 GPS 위성 양각에 따라 분포시킨 후 각 고도각 별로 B-value 표준편차를 계산하고, 계산된 B-value 표준편차 값에 신뢰도 95%를 보장하기 위한 환산 계수(scale factor)를 곱한 후 그 값의 분포를 GAD 곡선과 비교하여 평가한다. 이때 환산계수는 독립된 B-value 샘플 개수와 요구 신뢰도 %에 따라 카이스퀘어 분포표를 통해 계산할 수 있다[5].

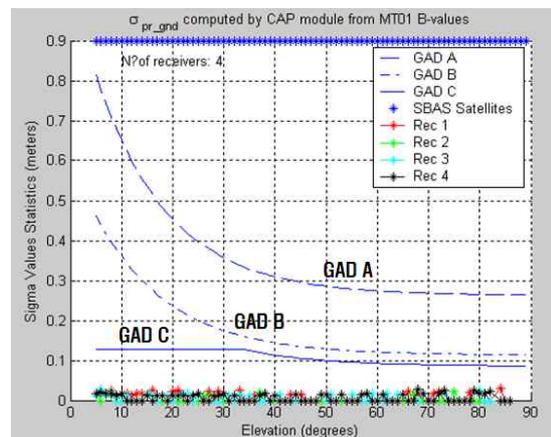


그림 8. 김포국제공항 GAD 평가 결과
Fig. 8. GAD test result of Gimpo international airport.

그림 8은 UTC 기준으로 2013년 8월 4일 14시부터 ~ 2013년 8월 5일 14시까지 약 24시간 동안 김포국제공항에서 실제로 방송되는 VDB MT1 데이터를 수집한 후 PEGASUS 프로그램을 이용하여 의사거리영역 정확도 평가를 수행한 결과 그래프이다. Honeywell SLS-4000은 GAD C 등급이며, 각 기준국 수신기의 위성 양각에 따른 B-value 표준편차는 GAD C 곡선 아래에 분포하는 것을 확인할 수 있다. 즉 김포국제공항의 GBAS 지상 장비에서 실제 방송되는 PRC 정보의 오차는 SLS-4000에 부여된 PRC 오차 표준편차 모델에 충분히 부합됨을 알 수 있다.

4-3 연속성 시험

연속성 시험은 주어진 시험 기간 동안 GBAS 지상장비가 아래 세 가지 평가 조건들을 모두 만족하며 연속적으로 정상 동작하는지를 평가하는 시험이다. 단, 연속성 시험 기간 중 일부 GPS 위성 자체에 대한 고장 및 사용 중단 등의 문제로 연속성 요구조건을 만족하지 못하는 기간에 대해서는 평가 기간에서 제외할 수 있다. 평가 요구조건에서 보호수준(PL; protection level)은 GBAS를 통해 계산된 항공기 위치정보의 오차 예측치를 의미하고, 경보한계(AL; alert limit)는 허용 가능한 보호수준의 최대값으로 정밀접근서비스 등급에 따라 그 값이 다르게 설정되어 있다[10].

- 1) VDB 신호는 중단 또는 끊어지지 않아야 한다.
- 2) 보호수준이 경보한계를 초과하지 않아야 한다.
- 3) VDB MT1 메시지에 최소 4개 이상의 위성에 대한 의사거리보정정보가 포함되어 있어야 한다.

CAT-I급 GBAS 지상장비에 할당된 연속성 요구조건은 $1-3.3 \times 10^6 / 15$ s로 이를 MTBO(mean time between outage)로 환산하면 1262.62시간(52.6일)에 해당한다. 즉 CAT-I급 GBAS 지상장비가 약 1263시간 동안 연속적으로 위의 세 가지 평가 조건을 모두 만족하였을 경우 연속성 요구조건을 만족한 것으로 판단할 수 있다. 그러나 일반적으로 GBAS 장비의 MTBO는 장비 제작사가 장비 제작 또는 FAT(factory acceptance test) 단계에서 시험 및 검증을 수행하므로, 독일, 미국 등 SLS-4000을 설치 및 운용하고 있는 대부분의 해외 국가들은 GBAS 지상시험 시 연속성 시험을 약 2주간(14일)만 수행하는 것으로 평가를 대신하고 있다.

이에 김포국제공항에 설치된 SLS-4000에 대한 연속성 시험 또한 2014년 4월 1일부터 ~ 2014년 4월 14일까지 2주간 GBAS 셀터 지붕에서 수집된 GPS 데이터와 VDB 데이터를 분석하여 평가를 진행하였다. 해당 기간 동안 VDB 신호는 중단없이 연속적으로 방송되었으며, VDB MT1에 포함된 GPS 위성에 대한 의사거리보정정보 갯수 또한 그림 9와 같이 4개 밑으로 떨어진 적이 없으며, 평균적으로 약 6~11개 가량 GPS 위성에 대한 의사거리보정정보가 방송되는 것을 볼 수 있다. 그리고 RTCA (radio technical commission for aeronautics) DO-245 문서에 기

술된 보호수준 계산 공식에 의거하여 계산된 수평보호수준 (HPL; horizontal protection level) 및 수직보호수준 (VPL; vertical protection level) 또한 그림 10, 그림 11과 같이 각각 CAT-I 평가 기준인 HAL 40 m와 VAL 10 m를 평가 기간 동안 한 차례도 초과하지 않았다[10]. 따라서 김포국제공항에 설치된 GBAS 지상장비는 세 가지 연속성 평가 기준을 모두 만족하였음을 확인하였다.

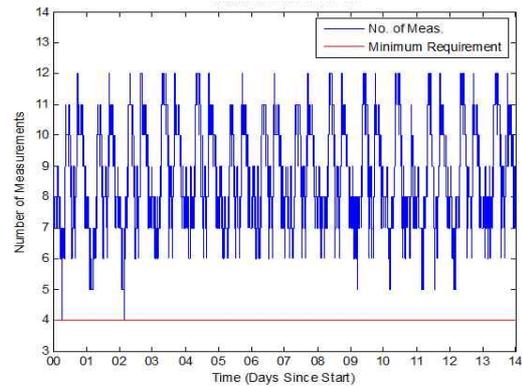


그림 9. 의사거리 보정정보 개수
Fig. 9. The number of pseudorange correction.

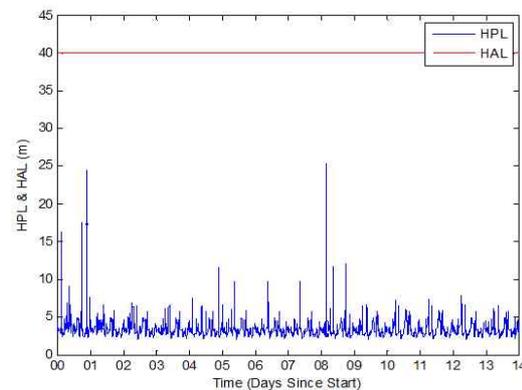


그림 10. 수평보호수준 대 수평경보한계
Fig. 10. HPL vs HAL.

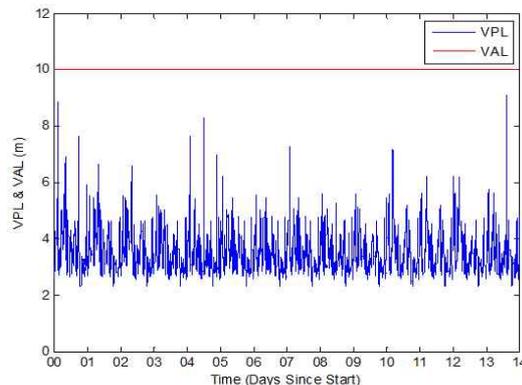


그림 11. 수직보호수준 대 수직경보한계
Fig. 11. VPL vs VAL.

4-4 활주로 표면 신호통달범위 시험

활주로 표면 신호통달범위 시험은 공항내 활주로 및 유도로 표면 위 고도 12ft 지점에서 측정된 VDB 전계강도 (field strength) 값이 -99 dBW/m² ~ -35 dBW/m² 범위 내에 있는지를 평가하는 시험이다. GBAS VDB 신호는 항공기가 활주로 접근 및 착륙하는 시점 이외에 활주로에 착륙하여 계류장으로 이동하는 과정에서 항공기에 장착된 MMR을 통해 지속적으로 수신이 되는데, 이때 VDB 신호의 세기가 지나치게 강할 경우에는 오히려 VDB 신호 포화(saturation)로 인해 MMR이 오작동을 일으킬 수 있다. 따라서 지상시험 단계에서 항공기가 이동할 수 있는 공항 내의 활주로 및 유도로를 이동하며 VDB 전계강도를 측정하여 GBAS 지상장비에 설정된 VDB 안테나의 송신 출력 값의 적절성을 확인하여야 한다.

김포국제공항에서 본 시험의 진행을 위해 그림 3과 같이 GBAS 탑재시험평가장비를 차량에 탑재한 후 VDB 안테나를 지표면으로부터 12ft 고도로 차량 위쪽에 장착하고, 그림 12의 검은색 선을 따라 김포국제공항 내 활주로 및 유도로를 차량으로 이동하며 VDB 전계강도 값을 측정하였다. 그 결과 공항 내 모든 활주로 및 유도로에서 측정된 VDB 전계강도 값은 대략 -45 dBW/m² ~ -38 dBW/m² 범위 내에서 측정되었으며, 평가 기준을 충분히 만족함을 확인하였다. 그림 13은 VDB 안테나로부터 가장 가까이에 위치한 활주로 32R의 활주로 시단에서 활주로 14R 활주로 시단까지 차량을 이동하는 과정에서 측정된 VDB 전계강도 값을 나타낸 것이다. 측정된 VDB 전계강도 값은 VDB 안테나로에 근접한 활주로 32R 부근에서 -38.11 dBW/m²의 최대값 측정되었고, VDB 안테나로부터 가장 멀리 떨어진 지점인 활주로 14L의 시단에서 최소값 -43.51 dBW/m²가 측정되었다. 즉 VDB 안테나로부터 차량이 멀어질수록 측정된 VDB 전계강도 값이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 시험 당시 김포국제공항의 GBAS VDB 송신 출력은 VDB 안테나 높이에 따른 시뮬레이션 분석을 통해 63.1 Watts (47 dBm)로 설정되어 있었으며, 본 시험을 통해 실제 GBAS 지상장비에 설정된 송신 출력 값이 적절하게 설정되었음을 확인하였다.



그림 12. 김포국제공항 활주로 및 유도로 이동 궤적
Fig. 12. Moving trajectory on runways and taxiways of Gimpo international airport.

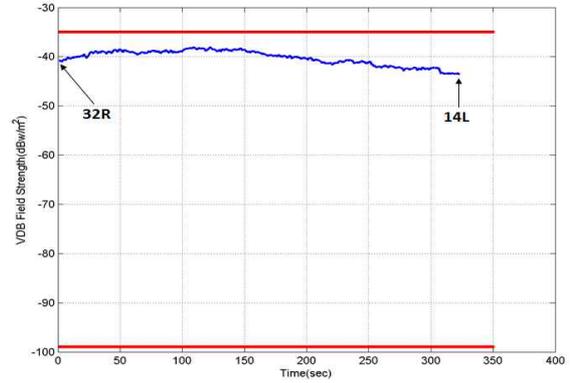


그림 13. 측정된 VDB 전계강도(활주로 32R→14L)
Fig. 13. Measured VDB field strength(runway 32R→14L).

4-5 VDB 데이터 내용 확인 시험

VDB 데이터 내용 확인 시험은 표 5와 같이 GBAS 지상장비에 설정된 매개변수와 VDB 신호를 통해 수신된 MT1, MT2, MT4 내의 매개변수 간의 일치성을 확인하는 시험이다. 즉 방송되는 VDB 메시지에 포함된 데이터 값이 오류없이 정상적으로 송수신되는 지를 확인하는 시험이다. GBAS는 VDB 데이터에 포함된 정보를 이용하여 항공기 정밀위치정보 및 활주로 착륙을 위한 착륙유도정보를 생성하기 때문에 방송되는 VDB 데이터에 오류가 발생할 경우 항공기 비행 안전에 치명적인 영향을 끼칠 수 있다. 따라서 GBAS 지상시험에서 방송되는 VDB 데이터의 오류 여부에 대한 검증이 필요하다.

표 5. 김포국제공항 VDB 데이터 내용

Table 5. VDB data contents of Gimpo international airport.

MT	데이터 내용	김포공항 설정 값
MT1	<ul style="list-style-type: none"> • SSID(station slot ID) • MBI(message block ID) • GBAS ID 	A Normal RKSS
MT2	<ul style="list-style-type: none"> • SSID(station slot ID) • MBI(message block ID) • GBAS ID • GBAS reference receivers • GBAS accuracy designator letter • GBAS continuity/integrity designator • Local magnetic variation • Latitude • Longitude • Ellipsoid height • Reference station data selector • Maximum use distance(Dmax) • Kmd_e_POS,GPS • Kmd_e_CAT1,GPS • Kmd_e_POS,GLONASS • Kmd_e_CAT1,GLONASS 	A Normal RKSS 4 C CAT-I -8.00° 37.54468389° 126.80540917° 39.53 m 255 42 km 0 4.0 0 0
MT4	<ul style="list-style-type: none"> • SSID(station slot ID) • MBI(message block ID) • GBAS ID • Data set length • FAS block • FASLAL • FASVAL 	A Normal RKSS 41 김포공항 FAS data 40 m 10 m

본 시험의 평가는 GBAS 탑재시험평가장비를 장착한 차량을 공항 내 활주로 및 유도로, 순환도로 등을 이동하며 VDB 메시지를 수신한 후, 수신된 VDB 데이터와 GBAS 지상장비에서 송신한 VDB 데이터를 비교하여 값의 일치 여부를 확인하는 방식으로 진행하였다. 시험결과 공항 내 활주로, 유도로 등에서는 VDB 데이터가 그림 14 ~ 그림 16과 같이 데이터 오류없이 정상적으로 수신되는 반면, VDB 안테나로부터의 신호 가시선 (line of sight)이 확보되는 않는 항공기 계류장 건물 뒤편, 활주로 14방향 주변의 일부 순환도로 저지대에서는 VDB 신호 수신 이 차단되거나 또는 일부 VDB 데이터가 깨져서 들어오는 것을 확인 할 수 있었다.

그림 14는 GBAS 탑재시험평가장비 제어 및 시험 프로그램을 통해 MMR이 수신한 VDB MT1 데이터로, MT1 메시지 헤더에 포함된 SSID, MBI, GBAS ID 값 등이 김포국제공항 GBAS 지상장비에 설정된 값과 일치하는 것을 확인할 수 있다. 그림 15는 MMR을 통해 수신된 VDB MT2 데이터로, 표5의 GBAS 지상장비 설정값과 수신 데이터의 값이 모두 일치하는 것을 확인할 수 있다. 그림 16은 MMR을 통해 수신된 VDB MT4의 헤더정보와 활주로 14L의 FAS 정보를 나타낸 것으로, 이들 정보 또한 데이터 오류없이 모두 정상 수신됨을 확인하였다. 항공기가 실제로 이동하는 활주로 및 유도로 등에서 수신된 VDB 데이터에 대한 오류가 발생하지 않았기 때문에 김포국제공항에서 수행된 VDB 데이터 내용 확인 시험은 평가 기준을 만족한 것으로 판단할 수 있다. 한편, 표 1의 대류층 지연 및 잔차 불확실성 시험과 전리층 잔차 불확실성 시험 또한 VDB 데이터 내용 확인 시험과 거의 유사한 시험으로 VDB MT2에 포함되어 방송되는 대류층 및 전리층 관련된 파라미터인 refractivity index, scale height, refractivity uncertainty, $\sigma_{vertical_iono_gradient}$ 값이 오류없이 수신되는지를 확인하는 시험이다.

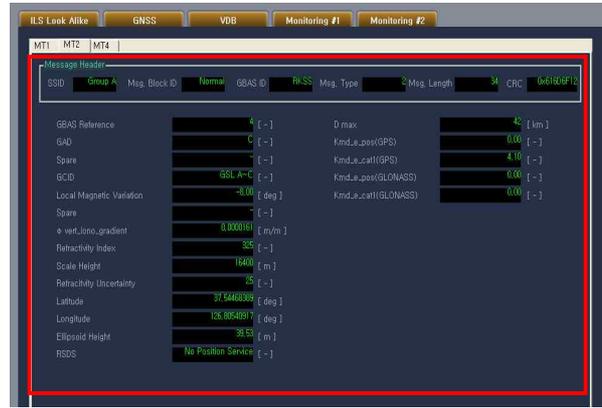


그림 15. 수신된 VDB MT2 데이터
Fig. 15. Received VDB MT2 data.



그림 16. 수신된 VDB MT4(활주로 14L FAS block)
Fig. 16. Received VDB MT4(RWY 14L FAS block).

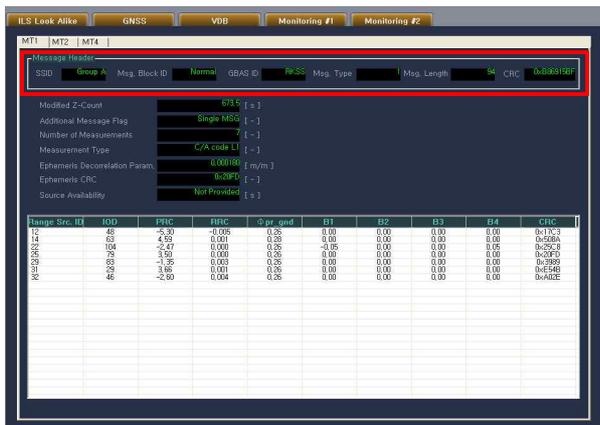


그림 14. 수신된 VDB MT1 데이터
Fig. 14. Received VDB MT1 data.

V. 결론

GBAS 지상시험은 공항에 GBAS 지상장비를 설치한 이후 설치된 장비의 기능 및 성능을 평가하기 위해 수행되는 시험으로, 국내 항공안전부선시설의 설치 및 기술기준에 의거 반드시 수행되어야 한다. 본 논문에서는 김포국제공항에 국내 최초로 설치된 GBAS 지상장비인 Honeywell사 SLS-4000에 대해 수행되어진 GBAS 지상시험평가 내용에 대해 기술하였다. 우선 국내 GBAS CAT-I 지상시험 평가 기준 및 방법을 제시하고, 김포국제공항에서의 시험 진행 방식 및 시험장비에 대해 기술하였다. 그리고 김포국제공항에서 수행된 GBAS 지상시험 12개 시험항목 중 주요 5개 시험항목인 위치영역 정확도 시험, 의사거리영역 정확도 시험, 연속성 시험, 활주로 표면 신호통달범위 시험, VDB 데이터 내용 확인 시험에 대한 상세한 시험평가 방법 및 분석 결과를 기술하였다.

위치영역 정확도 시험 및 의사거리영역 정확도 시험은 GBAS 지상장비가 제공하는 위치정보의 정확도 성능을 간접적

으로 확인할 수 있는 시험으로, 시험결과 GBAS는 수평 약 0.76 m, 수직 약 1.04 m의 위치 정확도를 제공하며 SBAS(일본 MSAS 기준) 대비 약 3배 이상 정확도가 높은 것을 확인할 수 있었다. 그리고 연속성 성능도 해외 시험평가 사례를 바탕으로 한 2주간의 시험에서 연속성 평가 기준을 만족함을 확인하였다. 또한 GBAS 지상시험에 있어서 가장 중요한 시험항목 중 하나인 활주로 표면 신호통달범위 시험을 통해 공항 내에서 수신되는 VDB 신호의 전계강도 및 GBAS 지상장비에 설정된 VDB 안테나 송신출력 값이 적절함을 확인하였으며, VDB 데이터 내용 확인 시험을 통해 방송되는 VDB 데이터가 오류없이 정상적으로 방송됨을 확인하였다.

본 논문에서 기술된 GBAS 지상시험 방법 및 시험 결과 값 등은 국내에서 GBAS 지상시험을 수행한 경험이 전무하기 때문에, 향후 국내 공항의 GBAS 지상장비 설치가 활성화 될 때 참고 자료로써 널리 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

[1] J. Bae, H. S. Jun, and C. H. Yeom, "Status of GBAS CAT-II/III(GAST-D) technology development," *Current Industrial and Technological Trends in Aerospace*, Vol. 11, No. 2, pp. 192-208, 2013.

[2] M. S. Jeong, C. H. Choi, W. J. Ko, Y. Ko, J. Bae, H. S. Jun, and D. M. Kim, "Analysis of GPS signal environment for GBAS siting in Gimpo international airport," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 41, No. 1, pp. 70-78, 2013.

[3] ICAO, Manual on testing of radio navigation aids - Vol. II

Testing of satellite-based radio navigation systems(ICAO Doc 8071), 2007.

[4] ICAO, Annex 10 to convention on international civil aviation: aeronautical telecommunications. Volume I - Radio Navigation Aids, 2006.

[5] EUROCAE, Minimum operational performance specification for global navigation satellite ground based augmentation system ground equipment to support category I operations(ED-114), EUROCAE WG-28 SG2, 2003.

[6] M. S. Jeong, J. Bae, and H. S. Jun, "A study on ground and flight testing for GBAS ground system implementation," *Journal of The Korean Society for Aviation and Aeronautics*, Vol. 22, No. 2, pp. 16-26, 2014.

[7] M. S. Jeong, W. J. Ko, J. Bae, and H. S. Jun, "Preliminary design of GBAS onboard test equipment," *Journal of The Korean GNSS Society*, Vol. 2, No. 1, pp. 41-48, 2013.

[8] Canadian Spatial Reference System. [Internet]. Available: <http://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php>

[9] EUROCONTROL, PEGASUS: Technical notes on CMC, PEG-TN-CMC, 2008.

[10] RTCA, Minimum aviation system performance sStandards for local area augmentation system(DO-245), 2004.

[11] H. S. Jun, J. S. Ahn, Y. J. Lee, Y. K. Choi, S. K. Sung, and C. H. Yeom, "Development of B-value based GBAS ground facility error standard deviation model and verification," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 37, No. 12, pp. 1232-1237, 2009.



정 명 숙 (Myeong-Sook Jeong)

2007년 2월 : 한국항공대학교 항공우주공학과 (공학사)
 2009년 2월 : 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 (공학석사)
 2010년 2월 ~ 2011년 9월 : 국방과학연구소 연구원
 2011년 9월 ~ 현재 : 한국항공우주연구원 연구원
 ※ 관심분야 : 위성항법, GBAS/SBAS, CNS/ATM



최 윤 정 (Yunjung Choi)

2011년 2월 : 한국과학기술원 물리학과 (이학사)
 2013년 2월 : 한국과학기술원 항공우주 및 기계공학과 (공학석사)
 2013년 2월 ~ 현재 : 한국항공우주연구원 연구원
 ※ 관심분야 : 위성항법, CNS/ATM



윤영선 (Youngsun Yun)

2000년 2월 : 서울대학교 기계항공 공학부 (공학사) 2002년 2월 : 서울대학교 기계항공 공학부 (공학석사)
2007년 2월 : 서울대학교 기계항공 공학부 (공학박사) 2004년 3월 ~ 2005년 3월 : Stanford University GPS Lab, Visiting Researcher
2007년 5월 ~ 2010년 3월 : 삼성전자 정보통신총괄 책임연구원
2010년 4월 ~ 현재 : 한국항공우주연구원 선임 연구원
* 관심분야 : GNSS 무결성 감시, GBAS/SBAS 시스템 개발/평가/인증, GNSS 항공 활용



배중원 (Joongwon Bae)

1995년 2월 : 한양대학교 제어계측공학과 (공학사)
1997년 2월 : 한양대학교 제어계측공학과 (공학석사)
1997년 2월 ~ 2004년 2월 : 한국항공우주산업(주) 주임연구원
2004년 3월 ~ 현재 : 한국항공우주연구원 선임 연구원
* 관심분야 : GNSS 항공 활용, 차세대항행시스템



전향식 (Hyang Sig Jun)

1988년 2월 : 부산대학교 전기공학과 (공학사) 1992년 2월 : 부산대학교 전기공학과 (공학석사)
2010년 2월 : 부산대학교 전기전자공학과 (공학박사) 1991년 ~ 1999년 : 대우중공업(주) 대리
2000년 ~ 2003년 : 한국항공우주산업(주) 선임과장
2004년 ~ 현재 : 한국항공우주연구원 책임 연구원 및 차세대항행팀 팀장
* 관심분야 : GNSS/ATM, 위성항법, 항공전자



이영재 (Hyang Sig Jun)

1982년 2월 : 서울대학교 항공우주공학 (공학사) 1985년 2월 : 서울대학교 항공우주공학 (공학석사)
1990년 2월 : The Univ. of Texas at Austin in USA 항공우주공학 (공학박사)
1990년 ~ 1992년 : 미국 The Univ. of Texas at Austin in USA 연구원
1992년 ~ 현재 : 건국대학교 항공우주정보시스템 공학과 교수
* 관심분야 : 위성항법, 위성궤도설계, 무인기 항법 및 제어