

## 論文

## B-Value를 이용한 GBAS 지상국 오차 표준편차 모델 개발 및 성능 평가

전향식\*, 안중선\*\*, 이영재\*\*, 최영규\*\*\*, 성상경\*\*, 염찬홍\*

## Development of B-Value Based GBAS Ground Facility Error Standard Deviation Model and Verification

Hyang-Sig Jun\*, Jong-sun Ahn\*\*, Young-Jae Lee\*\*, Young-kiu Choi\*\*\*,  
Sang-Kyung Sung\*\* and Chan-Hong Yeom\*

## ABSTRACT

The ICAO and FAA are developing and verifying of GBAS for civil aircraft landing and take-off. The guarantee of aircraft integrity issue is the important part of GBAS. To guarantee integrity, the GBAS ground facility broadcasts various informations to aircraft. The informations are related to the estimated accuracy of each pseudorange correction and the estimated error terms, for example B-value and standard deviation of the ground facility error. These parameters are used to calculate position error (estimated value of the user). If estimated position errors don't satisfy requirements, aircraft use alternate navigation means.

In this paper, GBAS reference stations's real data, which operated by KARI (Korea Aerospace Research Institute) in Jeju international airport, are used to development of new ground facility error standard deviation model. We verify improvement of GBAS availability, with respected to vertical protection level, using B-value based a new ground facility error standard deviation model and a sigma inflation factor.

## 초 록

국제민간항공기구 및 미 연방항공청에서는 항공기 이·착륙에 적용될 수 있는 지역위성항법보강시스템 (GBAS)에 대한 연구 개발을 수행하고 있다. 항공기 이·착륙에 위성항법시스템이 사용되는 만큼 시스템에 대한 무결성 확보가 최우선시 되어야 한다. 이를 위해 GBAS에서는 발생 가능성이 있는 오차 모델을 통해 위치 오차 예측값을 계산하고 이를 허용 한계치를 초과 하는 지 확인하고, 만약 초과하였을 경우 항공기는 GBAS 시스템 활용을 중단하고 다른 항법수단을 강구하게 된다. 하지만 높은 위치 오차 예측값은 시스템의 무결성 확보에는 도움이 되겠지만, 가용성 확보에 어려움이 있다. 본 논문에서는 제주도 국제공항에 설치되어 있는 항공우주연구원 GBAS 기준국의 실제 데이터를 사용하여, 위치 오차 예측값 계산에 사용될 수 있는 B-Value 기반의 지상국 오차 표준편차 모델 제시하였다. 또한 제시된 오차 표준편차 모델에 시그마 인플레이션을 적용하여 GBAS의 가용성 향상을 검증하였다.

**Key Words :** GBAS(지역위성항법보강시스템), 지상국 오차 표준편차 모델, B-Value

† 2009년 10월 16일 접수~2009년 11월 25일 심사완료

\* 정회원, 한국항공우주연구원 항공연구본부  
교신저자, E-mail : hsjun@kari.re.kr

대전광역시 유성구 과학로 115번지

\*\* 정회원, 건국대학교 항공우주정보시스템공학과

\*\*\* 정회원, 부산대학교 전기전자공학과

## 1. 서 론

위성항법시스템을 이용하는 항공항법에서는 사용자의 정확한 위치 계산을 위해 DGPS 기법

을 활용하여 각 가시 위성의 측정값 오차 정보 (의사거리 보정정보, PRC : Pseudorange Correction)를 계산하여 이용한다. PRC의 생성 방법과 제공 방법에 따라 위성항법보강시스템 (GNSS Augmentation System)의 형태가 정의 된다. 위성항법보강시스템 중, 공항에 설치되어 있는 다중 지상 기준국을 이용하여 PRC를 제공하는 GBAS (Ground Based Augmentation System)에서는 항공기의 무결성 확보를 위해 PRC를 생성하는 지상 기준국 및 신호 수신 환경에 대한 무결성 확보가 필요하다. 이를 위해 국제민간항공기구 (ICAO : International Civil Aviation Organization) 및 미국 연방항공청 (FAA : Federal Aviation Administration)에서는 사용자가 위성항법시스템을 이용하여 항법을 수행하기 전에 관련 오차를 예측하고 위치 도메인에 투영시켜 위성항법시스템의 가용 여부를 판단하게 한다. GBAS의 무결성 (Integrity)과 가용성 (Availability)이 환경적인 요인에 영향을 받기 때문에 실 데이터 획득과 분석이 필요하다.

본 논문에서는 ICAO 및 FAA에서 제시하는 기준국 오차 표준편차 모델 대신 국내 환경에서 획득된 실 데이터의 B-Value를 통해 GPS 위성의 양각 (Elevation Angle)에 따른 오차 표준 편차 모델을 보간법을 통해 제안하였다. 제안된 모델 평가를 위해 항공기 착륙 환경을 모사하고 시그마 인플레이션 (Sigma Inflation)을 적용하였다.

## II. 본 론

### 2.1 GBAS 신호 무결성 검사

GBAS의 신호 무결성을 검사하기 위해서는 두 가지 시스템 (다중 지상 기준국과 사용자)에 대한 고려가 필요하다. 먼저 GBAS는 다중 지상 기준국 (보통 2~4곳)에서는 공항 활주로 주변에 설치되어 수신되는 위성항법시스템의 신호에 포함된 각 위성별 오차의 크기인 PRC를 계산하고, 이를 사용자에게 전송을 하게 된다. GBAS 기준국은 PRC를 계산해 내는 과정에 있어 사용되는 측정값 (코드 기반 의사거리, 반송파, 위성좌표, 위성시계오차 보정값 등)에 발생할 수 있는 고장 요인 (신호 구조 이상, 전리층, 위성시계고장, 궤도력 고장 등)에 맞는 기법을 구성하여, 만약 고장이 발생이 되었다고 판단되는 위성을 PRC 생성 과정에서 제외한다. 사용자에서는 지상국으로부터 전송되는 B-Value, 지상국 오차 표준편차 모델 등을 이용하여 위치 오차 예측 값인

Protection Level (이하 PL)을 계산한다. 이를 목표로 하는 성능 요구 조건별 한계치(Alert Limit, 이하 AL)와 비교하여 GBAS 시스템의 가용 여부를 판별 하게 된다.

#### 2.1.1 GBAS 지상국 신호 무결성 검사

GPS의 경우 신호의 고장이 발생하였을 경우, 미국 주관제국 (Master Station)에서는 일정한 시간이 소요되는 반면에 유럽연합 (EU)에서 개발하고 있는 갈릴레오의 경우, 시스템 자체적으로 무결성 관련 정보를 생성하여 사용자에게 제공하며 유연성을 증대시키고 있다[1]. GBAS는 신뢰성을 확보하기 위하여 별도의 신호 무결성 검사 과정이 필요하며 다양한 기법이 제시되고 있다. 미국 스탠포드 대학에서 FAA와 함께 미국의 GBAS인 LAAS (Local Area Augmentation System)에 적용이 가능한 무결성 검사 시스템 (IMT : Integrity Monitoring Testbed)를 제시하였다[2]. IMT에 사용되는 신호 고장 검출 기법으로는 SQM (Signal Quality Monitoring), DQM (Data Quality Monitoring), MQM (Measurement Quality Monitoring), Sigma-Mean Monitoring, MRCC (Multiple Reference Consistency Check), MFRT (Message Field Range Test), EXM I, II (Executive Monitoring)으로 고장 위성의 고장 식별/제거 기능을 수행하고 있다[2].

#### 2.1.2 GBAS 사용자 신호 무결성 검사

사용자에서는 지상국에서 전송되는 의사거리 보정정보를 이용하여 각 위성별 측정값 (의사거리)에 포함된 오차를 제거하여, 정확도가 향상된 위치를 계산할 수 있게 된다. 하지만 지상국과는 달리 항공기와 같은 움직이는 물체의 위치의 참값 (True Position)을 알 수 없기 때문에 무결성을 보장하기 위해서는 위치 오차의 예측값을 계산해야 한다. 이를 위해 ICAO 및 FAA에서는 PL이라는 개념을 도입하였다. PL에는 수평방향의 HPL (Horizontal PL)과 수직방향의 VPL (Vertical PL)이 있다. GBAS에서는 항공기 이착륙 상황에서의 VPL이 무결성 판별에 중요한 역할을 하게 된다. VPL을 계산할 때는 두 가지 가설 (H0 와 H1)을 설정하고 식(1)과 같이 두 가지 가설 하에 계산된 VPL 중 최대값을 사용하게 된다[3].

$$VPL = \max(VPL_{H0}, VPL_{H1}) \quad (1)$$

먼저 '기준국의 측정값에는 문제가 없다 (H0 가설)'라는 가설을 통해 계산되는 VPL은 다음과 같다.

$$VPL_{H0} = K_{ffmd} \times \sqrt{\sum_{i=1}^N S_{ver,i}^2 \times \sigma_i^2} \quad (2)$$

여기서,

$K_{ffmd}$  : H0 가설에서 Fault Free missed

detection 확률에 의해 결정되는 상수

$S_{ver,i}^2$  : 의사거리 오차를 수직방향 위치 오차로  
의 투영(Projection) 행렬

$\sigma_i^2$  : 각종 오차 성분의 표준편차

두 번째로 '다중 기준국 중 한 기준국의 측정 값에는 고장 위성이 한 개 이상 포함되어 있다' (H1가설) 가설에서 유도되는 VPL은 다음과 같다.

$$VPL_{H1} = \max(VPL_{H1}[j]) \quad (3)$$

$$VPL_{H1}[j] = |B_{j,ver}| + K_{md,ver} \times \sum_{i=1}^N s_{3,i} \sigma_{i,H1}^2 \quad (4)$$

$$B_{j,ver} = \sum_{i=1}^N s_{3,i} B[i,j] \quad (5)$$

여기서,

$K_{ffmd}$  : H1 가설에서 Missed detection 확률에  
의해 결정되는 상수

$\sigma_{i,H1}^2$  : 각종 오차 성분의 표준편차

$B[i,j]$  : j번 기준국 수신기에서 생성되는 i위성  
대한 B-Value(m)

HPL 계산식은 투영 행렬을 제외하고 VPL과 동일하다[4]. 식(2)와 식(4)에서 적용되는 각종 파라미터들은 위성 양각에 따른 각종 오차 표준편차 모델 (전리층, 대류층, 지상국, 다중경로, 신호 잡음), 수신기 성능 지표, 고장에 대한 가설 및 수신기 개수에 따른 상수값을 통해 계산된다[4]. 계산된 PL은 GBAS 성능 요구조건에 따라 결정되는 한계치(AL)와 비교하여 시스템의 가용 여부를 판단하게 되는데, 그림 1과 표 1은 실제 오차를 알고 있다고 가정하였을 때 GBAS를 운용하면서 발생할 수 있는 각종 상황을 나타낸 것이다.

○ 정상상태(Normal)

정상상태는 PL이 실제 오차를 포함하고, 규정된 요구사항 조건을 만족시키므로 무결성 및 가용성을 보장함.

○ 오경보 상황(False Alarm)

PL이 실제 오차를 감싸고 있어 무결성은 보장되었지만, 규정된 요구사항 조건(AL)을 만족시키지 못하여 고장이라고 잘못 판단하게 되어 시스템의 가용성이 떨어짐을 나타낸다.

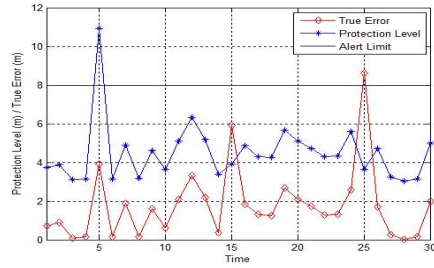


그림 1. 시스템 고장 상황

○ 고장 상황(Misleading Information)

PL이 실제 오차를 감싸고 있지 못하여 무결성이 보장되지 못하였지만, 실제 오차가 규정된 요구사항 조건(AL)을 만족시켜 시스템 운용 중에도 위험이 없음을 나타낸다.

○ 심각한 고장 상황(Hazard Misleading Information)

PL이 실제 오차를 감싸고 있지 못하여 무결성이 보장되지 못하였고, 실제 고장의 크기가 규정된 요구사항 조건(AL)을 만족시키지 못한 상황이다. 문제는 PL이 고장을 감지하지 못하여 GBAS 시스템은 치명적인 오류를 가지고 운용될 수 있는 위험한 상황에 있음을 나타낸다.

표 1. GBAS 무결성 시스템 운용 상황

상 황	비 고
TE<PL<AL	Normal
TE<AL<PL	False Alarm
PL<TE<AL	Misleading Information
PL<AL<TE	Hazard Misleading Information

## 2.2 GBAS 지상국 오차표준편차 모델

지상국에서 전송되는 PRC에 포함되어 있는 오차를 예측하기 위해 ICAO에서는 식(6)과 지상국 오차 표준편차 모델을 제시하였다[4].

$$\sigma_{pr\_gn\&#224;s} = \sqrt{\left( \frac{a_0 + a_1 e^{-\frac{\theta_n}{\theta_0}}}{M} \right)^2 + (a_2)^2} \quad (6)$$

여기서,

$a_0, a_1, a_2, \theta_0$  : 안테나 성능에 따른 상수

$\theta_n$  : GPS 위성 양각(Degree)

$M$  : 지상국 수신기 개수

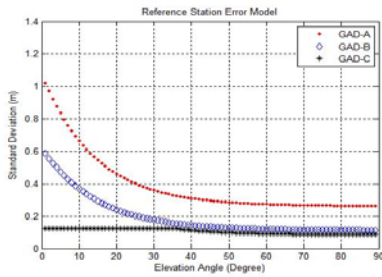


그림 2. GPS 위성 양각에 따른 지상국 오차 표준편차

GAD A, B, C의 구분은 지상국 수신기 및 안테나의 성능에 따라 결정되며, 그림 2와 같이 GAD-A에서 C로 갈수록 같은 위성 양각에 대해 낮은 오차 표준편차 모델이 적용됨을 알 수 있다.

2.3 제안된 지상국 오차표준편차 모델

본 절에서는 위성 양각에 따른 B-Value의 오차 표준편차를 산출하여 보간법을 통해 지상국 오차표준편차 모델을 제시하였다.

2.3.1 B-Value

B-Value는 식(7)과 같이 3개 이상의 지상국에서 생성되는 의사거리 보정정보를 각 기준국간 서로 비교하여 보정정보간의 일치성을 확인할 수 있는 GBAS 시스템에서 매우 중요한 파라미터이다. 다시 말해, 서로 다른 수신기간의 보정되지 않는 오차의 크기를 나타내며, 이를 기준국 수신기와 항공기의 수신기간에도 적용시킬 수 있다.

$$B_{k,j}(t) = \frac{\sum_{i=1}^M PRC_{i,j}(t)}{M(t)} - \frac{\sum_{i=1(i \neq k)}^M PRC_{i,j}(t)}{M(t) - 1} \quad (7)$$

여기서,

$PRC_{i,j}$  : i 번 지상국 수신기에서 생성된 j 번 위성의 보정정보

$M(t)$  : 가용 지상국 수신기 개수

지상국 오차 표준편차 모델 역시 지상국간 수신기에서 생성된 보정정보가 항공기에 적용되었을 때 보정되지 못한 오차를 모델링 하고 있어, B-Value를 이용한 오차 모델링 과정이 타당성이 있다고 볼 수 있다.

2.3.2 B-Value 계산을 위한 실 데이터 수집

본 논문에서는 실제 데이터를 통한 B-Value 계산을 위해 그림 3과 같이, 한국항공우주연구원 에서 개발하여 운용 중인 제주국제공항의 다중

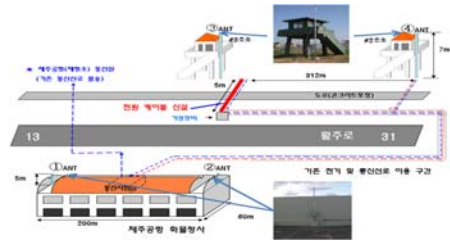


그림 3. 한국항공우주연구원 GBAS 기준국[8]

GBAS 기준국 (4곳)이 2Hz로 수집한 데이터를 사용하였다[6][7][8].

계산된 B-Value의 무결성 확보를 위해 코드 반송파 발산 검사, 코드 잔차 검사, 코드-반송파 스무딩, 다중 기준국의 보정정보 잔차 검사, 수신기 시계 바이어스 제거 등의 기법을 수행하였다. 무결성 검사를 통과한 데이터는 계산량의 효율화를 위해 0.1Hz 데이터로 추출한 후 B-Value를 계산하였다. B-Value 계산에 사용된 데이터는 2009년 6월 13일부터 6월 27일까지의 2주간 데이터를 사용하였다.

2.3.3 B-Value를 통한 오차 표준편차 산출

위성의 양각에 따른 B-Value 표준편차 모델을 산출하기 위해 수집된 데이터를 활용하여 계산된 B-Value 값을 위성 양각 10도 간격으로 분류 하였다.

그림 4와 같이, 위성 양각이 낮을수록 B-Value의 편차가 심해짐을 알 수 있다.

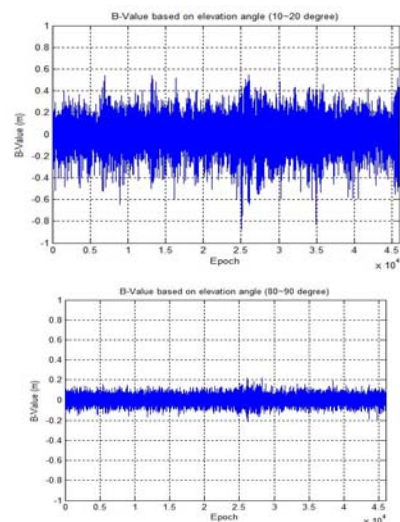


그림 4. 위성양각에 따른 B-Value (상: 10-20도, 하: 80-90도)

### 2.3.3 보간법을 통한 GPS 양각에 따른 오차 표준 편차 모델

위성 양각 10도 간격에 따라 분류된 B-value의 표준편차를 다항식과 지수 보간법을 사용하여 위성 양각( $\theta_i$ ; degree)에 따른 수식을 생성하였다.

- 3차 다항식 모델

$$\sigma_{pr\_gnd,i} = -2.454 \times 10^{-7} \theta_i^3 + 5.083 \times 10^{-5} \theta_i^2 - 0.004 \theta_i + 0.138 \quad (8)$$

- 지수함수 모델

$$\sigma_{pr\_gnd,i} = 0.85e^{-0.0607 \times \theta_i} + 0.06e^{-0.0058 \times \theta_i} \quad (9)$$

그림 5는 ICAO GAD-C 모델의 값과 본 논문에서 제안하는 모델을 나타낸 것이다. 기존의 모델과 비교했을 때 제안된 모델은 같은 위성 양각에 대해 전반적으로 낮은 표준편차를 갖는 것을 알 수 있다. 이는 기존의 지상국 오차 표준편차 모델로 인해 PL이 과도하게 계산되어 GBAS 시스템의 가용성을 떨어뜨릴 수 있음을 나타낸다.

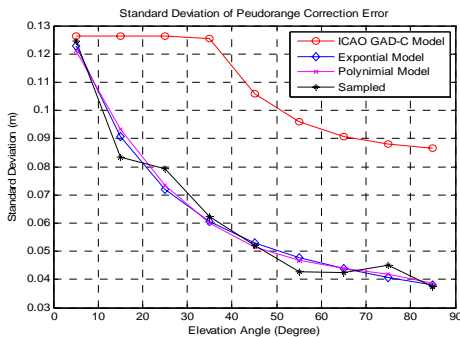


그림 5. 기존 ICAO GAD-C 모델과 제안한 오차 표준편차 모델

## 2.4 VPL을 통한 오차 표준편차 모델 성능 평가

본 절에서는 제안한 오차 표준편차 모델을 이용하여, H0 가설 (기준국 시설에는 고장이 포함되어 있지 않다) 하에서 VPL을 계산하여 실제 오차를 포함할 수 있는지 검증하고 가용성 향상 여부를 확인할 것이다.

### 2.4.1 항공기 착륙과정 모델

VPL을 이용한 시스템의 가용성을 판단하기 위해 그림 6과 같이, 항공기가 착륙하는 과정을 최대한 모사하였다. 제주국제공항에서 수신된 실제 지상 기준국 4곳 데이터 중 3곳은 기준국으로, 1곳은 항공기로 가정하였다. VPL 계산 과정

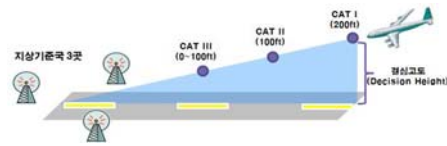


그림 6. 항공기 착륙 시나리오

중에 전리층 및 대류층 오차 모델을 통해 표준편차를 계산하기 위해서는 항공기 상태에 관한 각종 정보가 필요하다[3]. 항공기 위치는 규정된 요구조건 (CAT II)에서의 결심고도 (100 ft)로 하였고, 속도는 160 knot로 설정하여 VPL을 계산하였다.

### 2.4.2 시그마 인플레이션 산출

GBAS 다중 기준국으로부터 전송되는 보정정보에 의해 계산된 항공기의 위치 오차는 실제 가우시안 및 영평균 (Zero Mean) 특성을 갖지 않는다[5]. 그리하여 그림 7과 같이 1-시그마로는 실제 항공기 위치 오차를 포함할 수 없어 GBAS 무결성 보장을 위해 전체 오차를 포함하는 시그마 값을 PL 계산하는데 사용해야 한다[3]. 그리하여 2009년 6월 13일부터 6월 27일까지 제주도에 수신된 데이터 사용하여 수직 방향의 위치 오차를 구한 후, 시그마 인플레이션 값을 산출하였다. 전체 오차를 포함하는 값은 1.8-시그마를 VPL 계산에 사용하였다.

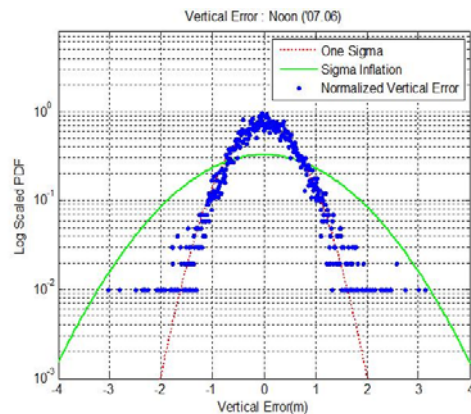


그림 7. 시그마 인플레이션 산출

### 2.4.3 VPL 계산을 통한 성능 평가

본 논문에서 제안한 지상국 오차 표준편차 모델을 이용하여 계산한 VPL과 ICAO에서 제안하는 GAD-C 모델을 이용하여 계산한 VPL을 비교하였다.

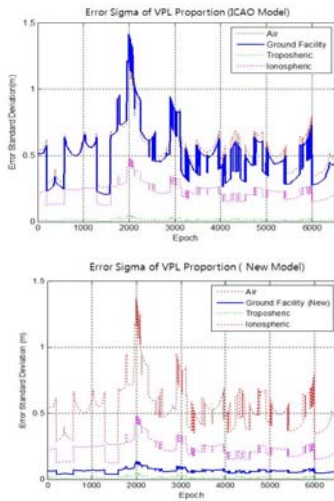


그림 8. 시뮬레이션 과정 중 각종 오차 모델 크기 비율(상: ICAO 모델, 하: 제안된 모델)

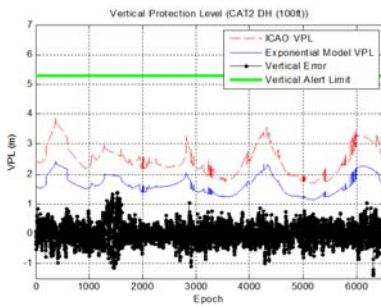


그림 9. VPL 계산을 통해 성능 평가 결과

그림 8 상측 그림과 같이 ICAO 모델에서는 지상국 오차의 크기가 (실선, Ground Facility) 전체 적으로 큰 부분을 차지하였지만, 본 논문에서 제안 모델을 이용할 경우, 그림 8 하측 그림과 같이 지상국 오차의 영향이 현저하게 줄어들음을 확인 할 수 있다.

이를 통해, 그림 9와 같이 실제 VPL을 산출 하였을 경우, 두 모델 모두 실제 오차를 포함하여 무결성을 보장할 수 있는 것을 확인하였다. 하지만 두 모델간의 차이는 VPL의 크기에서 나타난다. 제안한 모델을 이용한 VPL이 약 1.2m 낮아 보다 좋은 가용성 향상을 보일 수 있음을 볼 수 있다.

### III. 결 론

본 논문에서는 PL 계산하는 데 있어 사용되는 각종 오차 표준편차모델 (전리층, 대류층, 신호

노이즈, 지상국오차) 중 지상국 오차 표준편차 모델을 위성 양각에 따른 B-Value의 표준편차를 통해 모델을 제안하였다. 제안한 지상국 오차 표준편차 모델은 기존의 ICAO 및 FAA에서 제공하는 지상국 오차 표준편차 모델보다 같은 양각에 대해 작은 표준편차를 산출 할 수 있었다. 이를 실제 VPL 계산하는데에 적용하여 VPL 감소함을 확인할 수 있었고, 적어진 지상국 오차 표준편차로 인해 손상될 수 있는 무결성에 대해서는 시그마 인플레이션을 적용하여 보완하였고, VPL 감소로 가용성이 향상되었다. 제안된 모델은 VPL 측면에서 CAT I 뿐만 아니라 CAT II/III도 만족하였다. 향후 장기간의 데이터 분석을 통해 ICAO나 FAA에서 제공하는 방법을 무조건 사용하기보다, 우리나라 실정에 적합한 모델 개발을 진행하는 연구가 필요하다.

### 후 기

본 연구는 국토해양부 항공선진화사업 “항공관제용 감시자료처리시스템 개발”에 의해 연구비 지원을 받았으며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

- 1) V. Oehler, et. al., "The Galileo Integrity Concept", Proceeding of ION GNSS 2004.
- 2) G. Xie, "Optimal On-Airport Monitoring of the Integrity of GPS-Based Landing Systems", Stanford University, 2004.
- 3) Fan Liu, Tim Murphy, Trend A. Skidmore, "LAAS Signal-in-Space Integrity Monitoring Description and Verification Plan", Proceedings of the 10th ITM of ION, 1997.
- 4) "Minimum Operational Performance Standards for GPS/Local Area Augmentation System Airborne Equipment", RTCA, Washington, D.C., RTCA SC 159 WG-4A, DO-253A, Nov, 28, 2001.
- 5) Boris Pervan, Irfan Sayim, "Sigma Inflation for the Local Area Augmentation of GPS", IEEE Transactions on aerospace and electronic system, Vol. 37, No. 4, 2001.
- 6) 항공용 위성항법시스템 기반기술 개발(II), 건설교통부, 2006.
- 7) 항공용 위성항법시스템 기반기술 개발(III), 건설교통부, 2007.
- 8) IMT를 활용한 위성항법시스템 신호 신뢰성 분석 연구, 한국항공우주연구원, 2008.