

한국형 광역보정시스템 테스트베드 가용성 성능 분석

Availability Performance Analysis of Korean Wide Area Differential GNSS Test Bed

윤호*, 기창돈*, 김도윤**

Ho Yun*, Chang-Don Kee* and Do-Yoon Kim**

요 약

위성항법시스템(GNSS)을 민간항공 분야에 활용하기 위해서는 국제민간항공기구(ICAO)가 정한 비행단계별 정확성(Accuracy), 무결성(integrity), 연속성(continuity), 가용성(availability) 성능요구조건을 만족시켜야 한다. 사용자의 무결성을 확보하기 위해서는 사용자의 보호 수준을 크게 잡아야 하고 가용성을 향상시키기 위해서는 보호수준이 작을수록 좋다. 따라서 주어진 항행요구조건을 만족하기 위해서는 사용자의 무결성을 확보하면서 보호수준을 최대한 작게 잡아야 한다. 본 논문에서는 한국형 광역보정시스템 테스트베드 중앙처리국 모듈의 현재까지 진행 상황에 대해서 설명하고 현재 사용되고 있는 무결성 관련 알고리즘을 적용하였을 때 사용자의 무결성 및 가용성 성능에 대한 예측을 수행하였다. 또한 항법위성의 궤도 및 시계오차에 대한 공분산 행렬을 사용자 무결성 감시에 적용하였을 때의 가용성 향상 정도를 시뮬레이션을 통해 예측하도록 한다.

Abstract

For using Global Navigation Satellite System(GNSS) in the civil aviation, it should satisfies the Required Navigation Performances(RNPs) which are defined by International Civil Aviation Organization(ICAO). RNP defines the required accuracy, integrity, availability, continuity of each flight procedure. In order to guarantee user's integrity, user's protection level has to be overestimated. On the other hand, for improving user's availability, user's protection level has to be estimated tightly. Therefore protection level should be estimated as tight as possible while it assuring the user's integrity.

This paper describes the current integrity function of Korean WAD GNSS test bed, and predicts the availability performance of Korean WAD GNSS by simulation.

Key words : WAD-GPS, Availability, Integrity, SBAS, Protection Level

I. 서 론

GPS나 Galileo와 같은 위성항법시스템을 민간항공 분야에 활용하기 위해서는 국제민간항공기구가 규정

한 비행단계별 항행 요구조건을 만족하여야 한다. 항행요구조건은 정확성, 가용성, 무결성, 연속성으로 이루어져 있고 네 가지 요구조건을 모두 만족할 수 있어야 해당 항법시스템을 사용할 수 있게 된다.

* 서울대학교 기계항공공학부, 서울대학교 항공우주신기술연구소

** 방위사업청(DAPA)

· 제1저자 (First Author) : 윤호

· 투고일자 : 2011년 8월 3일

· 심사(수정)일자 : 2011년 8월 4일 (수정일자 : 2011년 8월 19일)

· 게재일자 : 2011년 8월 30일

정확성은 정상 상태에서 실제 사용자 위치와 항법 시스템으로부터 구해진 위치 사이에 존재하는 오차로서, 네 가지 성능 요소 중에서 가장 간단히 계산될 수 있으며, 가장 널리 사용되는 성능 지표이다. 연속성은 항법 장치가 원하는 임무를 수행하는 동안 중단 없이 기능을 발휘할 수 있는 성능을 말한다. 무결성은 시스템이 항법 장치로서의 요구 성능을 만족하지 못할 경우 이를 일정한 시간 내에 사용자에게 통보해 줄 수 있는 성능을 의미한다. 사용자는 항법을 수행할 때에 계산된 위치를 중심으로 실제 위치가 있을 수 있는 한계를 정하는데 이를 보호수준이라고 한다. 사용자의 실제 위치가 보호수준을 벗어나게 되었는데 시스템이 정해진 시간 내에 사용자에게 경보를 해주지 못하면 무결성이 상실되었다고 할 수 있다. 가용성은 항법시스템을 주어진 임무에 따른 요구 조건을 만족시키며 이용할 수 있을 확률을 의미한다. 보호수준이 각 항행 단계에서 요구하는 보호 한계보다 작아야 사용자는 해당 항행 단계를 수행할 수 있다. 보호 수준이 보호 한계를 초과할 경우 사용자의 실제 위치가 위험지역에 위치할 수 있으므로 항법을 수행할 수 없게 되고 이때에는 가용성이 상실되었다고 할 수 있다.

따라서 무결성 측면에서 보면 사용자의 안전을 보장하기 위해서 보호수준이 클수록 좋고, 가용성 측면에서 보면 최대한 많은 항행 단계에서 시스템을 사용하기 위해서 사용자의 보호수준이 작을수록 좋다. 따라서 주어진 항행요구조건을 만족하기 위해서는 보호수준이 사용자의 무결성을 보장하면서 최대한 작게 추정되어야 한다. 이러한 노력의 일환으로 미국, 유럽, 일본 등에서는 이미 광역보정시스템을 구축하여 서비스를 실행 중이고 인도, 중국, 러시아 등에서도 앞다투어 광역보정시스템을 개발하고 있다. 우리나라도 2010년 10월부터 국토해양부의 주관으로 광역보정시스템 구축기술개발 연구개발과제가 4년 예정으로 진행 중에 있다. 본 논문에서는 한국형 광역보정시스템 테스트베드 중앙처리국 모듈의 현재까지 진행 상황에 대해서 설명하고 현재 사용되고 있는 무결성 관련 알고리즘을 적용하였을 때 사용자의 무결성 및 가용성 성능에 대한 예측을 수행하였다. 또한 항법위성의 궤도 및 시계오차에 대한 공분산 행렬을

사용자 무결성 감시에 적용하였을 때의 가용성 향상 정도를 시뮬레이션을 통해 예측하도록 한다.

II. 무결성정보 생성 및 적용 알고리즘

광역보정시스템은 지역보정시스템과 달리 보정메시지를 오차 요인별로 계산하여 사용자에게 보내주기 때문에 무결성 정보도 오차 요인별로 계산하여야 한다. 광역보정시스템 중앙처리국은 위성관련 정보와 전리층 관련정보의 보정정보와 무결성 정보만을 제공하기 때문에 광역보정시스템 사용자는 광역보강 메시지를 받아 자신의 위치에 맞는 위성위치 및 시계 오차, 전리층 지연 오차 보정정보 및 무결성 정보만을 계산하게 되고 대류층 지연 오차와 수신기 잡음, 다중경로 오차 등은 모델을 통해 무결성정보를 생성하게 된다.

2-1 무결성 정보 생성 알고리즘

① UDRE(User Differential Range Error)의 계산

광역보정시스템 중앙처리국은 위성 궤도 오차 보정치와 위성 시계 오차 보정치의 추정 오차 수준을 UDRE라는 값으로 계산하여 사용자에게 전달한다. UDRE를 구하는 식은 다음과 같다[2].

$$P_{UDRE} = R + H\hat{P}H^T \quad (1)$$

여기서, 각 인자는 다음과 같다.

R : 측정치의 공분산 행렬

H : 각 기준국에서 위성까지의 시선벡터로 구성된 관측 행렬

\hat{P} : 위성 궤도 및 시계 오차 추정 과정에서 계산된 공분산 행렬

식 (1)에서 구한 PUDRE를 이용하여 다음과 같이 각 오차 보정치의 오차 수준을 결정한다.

$$\sigma_{UDRE}^2 = \left(\sum_{i=1}^{i=M} \frac{1}{P_{UDRE,i}} \right)^{-1} \quad (2)$$

여기서 $P_{UDRE,i}$ 는 UDRE의 i 번째 대각 성분을 나타낸다. 이렇게 추정된 각 위성의 보정치에 대한 오차수준은 99.9%의 유의 수준을 갖는 오차 범위인 UDRE 값으로 환산되어 사용자에게 전달된다.

$$UDRE = \sigma_{UDRE} \times 3.29 \quad (3)$$

② GIVE(Grid Ionospheric Vertical Error)의 계산

중앙처리국은 UDRE 뿐만 아니라, 같이 제공되는 격자 전리층 지연값에 대한 오차 한계인 GIVE 값도 같이 제공한다. 참고문헌 [2]에서 제안된 방법을 사용하여 다음과 같이 GIVE 값을 구할 수 있다.

$$GIVE = 3.29 \times \sqrt{1 / \sum_{k=1}^K w_k} \quad (4)$$

여기서 w_k 는 격자전리층 지연 보정치를 생성할 때 사용되는 값으로 일반적으로 아래와 같이 측정치 분산에 반비례하는 값을 갖는다.

$$w_k = \left(\frac{\Delta_k}{\sigma_k} \right)^2 \quad (5)$$

여기서 Δ_k 는 거리에 관한 가중치를 규정한 함수로써 아래와 같이 나타낼 수 있다(Chao, 1997).

$$\Delta_k = \exp \left[- \left(\frac{d_k}{2D} \right)^2 \right] \quad (6)$$

여기서 d_k 는 격자점에서 각 전리층 통과점까지의 거리이고, D 는 기준 거리로써 5도 간격 격자점의 평균 간격에 해당하는 556km를 사용한다.

2-2 무결성 정보 적용 알고리즘

방송되는 위성 관련 오차 및 전리층 지연 오차의 보정치를 이용하여 사용자는 의사거리에서 해당 오차가 차지하는 오차를 효과적으로 제거할 수 있다. 이 때 오차 보정에 사용되는 보정치의 오차 수준을 계산하기 위해서는 각 오차가 모두 포함되는 분산 값을 계산하여야 한다. 여기에는 위성 관련 오차, 전리층 지연 오차, 다중 경로 오차가 포함된 수신기 오차, 대류층 지연 오차 등이 고려되어야 한다. 이 때 수신기 관련 오차와 대류층 지연 오차에 관해서는 위성의 양각에 따라 표현되는 관계식을 이용하여 손쉽게 구할 수가 있다(RTCA, 2006). 또한 위성 관련 오차는 방송되는 UDRE를 이용하고 전리층 관련 오차는 GIVE 값을 이용하여 구한다. 이 때 여기서 계산된 분산값은 각각의 의사거리 오차를 대표하는 값이므로 관측행렬을 이용하여 위치오차로 환산하도록 한다. 중앙처리국으로부터 전달된 전리층 및 위성 관련 무결성 정보와 사용자의 위치에 따른 모델로부터 계산된 수신기 관련 오차 대류층 지연 오차 정보를 통합하여 사용자는 아래의 식과 같이 자신의 측정치의 신뢰성을 계산하게 된다.

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i,flt}^2 + \sigma_{i,UIRE}^2 + \sigma_{i,receiver}^2 + \sigma_{i,tropo}^2 \quad (7)$$

여기서 $\sigma_{i,UIRE}^2$ 는 사용자의 전리층 통과점 주변의 GIVE값을 보간하여 얻게 된다(RTCA, 2006). 사용자는 이렇게 계산된 측정치의 분산값을 위치영역으로 투영시켜 보호수준을 계산하여 자신의 항법해가 해당 항행 단계에서 사용할 수 있을지를 판단하게 된다.

2-3 위성 궤도 및 시계오차 공분산 행렬을 이용한 가용성 및 무결성 향상

사용자가 위성관련 무결성 정보를 계산할 때에 사용하게 되는 UDRE 값은 각 기준국의 시선벡터를 기준으로 계산된 스칼라 값이다. 따라서 서비스 영역 중심에 위치한 사용자나 서비스 영역 밖에 있는 사용자나 같은 수준의 위성 관련 보정치 오차수준을 전달 받게 된다. 이때 중앙처리국은 모든 사용자의 무결성

을 보장하기 위해서 상당히 큰 UDRE 값을 방송하게 되고 대부분의 사용자는 실제 위성관련 보정오차수준보다 큰 값을 받아 사용하게 되므로 가용성 측면에서 손해를 보게 된다. 또한 서비스 영역 밖의 사용자에게는 UDRE값이 실제 보정오차수준을 포함하지 못하여 무결성 위협이 발생할 수도 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 사용자는 아래의 식과 같이 UDRE로부터 얻은 분산값에 사용자의 위치에 따른 변화량을 곱하여 사용하게 된다 [4].

$$\sigma_{i,fl}^2 = (\sigma_{i,UDRE} \cdot \delta UDRE)^2 \quad (7)$$

여기서 $\delta UDRE$ 는 아래의 식을 통해 얻게 된다.

$$\delta UDRE \equiv \sqrt{l^T \cdot C \cdot l} + \varepsilon_C \quad (8)$$

여기서 l 은 사용자와 위성간의 시선벡터이고 C 는 광역보정메시지로부터 계산된 위성 시계 및 위치 오차의 공분산 행렬이고 ε_C 는 광역보정메시지의 quantization error를 보상하기 위한 값이다. ε_C 값은 중앙처리국에서 사용자가 양자화로 인한 오차를 보상할 수 있도록 양자화 오차 계산에 필요한 계수를 계산하여 10번 메시지에 실어서 사용자에게 방송하게 된다. 위성 시계 및 위치오차의 공분산 행렬은 x, y, z, t 에 대한 4×4 행렬이므로 각 위성마다 16개의 요소를 갖게 된다. 광역보정메시지는 250bit의 메시지를 250bps로 방송하게 되므로 1초에 하나의 메시지만 보낼 수 있고 한번에 보낼 수 있는 데이터의 양도 제한적이다. 따라서 효율적인 데이터 전송을 위해서 중앙처리국에서는 공분산 행렬을 Cholesky factorization (G. Golub and C. van Loan, 1996)하여 행렬의 구성요소를 10개로 줄이고 각각의 값을 양자화 하여 방송하게 된다.

III. 한반도주변 광역보정시스템 사용자 가용성 성능 분석

앞서 설명한 무결성 정보 생성 및 적용기법을 사용하여 사용자가 광역보정시스템을 이용한 항법을 수행하였을 때 가용성 성능을 예측하기 위하여 실측 데이터를 기반으로 한 시뮬레이션을 수행하였다. 실제에 가까운 측정치를 생성하기 위하여 위성궤도 및 시계오차는 IGS(International GNSS Service)에서 제공하는 정밀궤도력과 실제 GPS에서 방송되었던 Ephemeris data를 사용하여 생성하였다. 전리층 지연 오차 역시 IGS에서 제공하는 IONEX 데이터를 이용하여 생성하였고, 대류층 지연 오차는 WAAS MOPS에서 정의된 대류층 지연 모델에 따라 생성하였다. 아래의 그림과 같이 실측 데이터에 근거한 측정치 및 항법 데이터를 생성하고 이를 4개의 광역기준국과 중앙처리국 모듈을 거쳐 생성된 보정정보 및 무결성 정보를 사용자에게 적용하였을 때의 성능을 분석하였다. 각 광역기준국 모듈과 중앙처리국 모듈은 서울대학교에서 자체 개발한 광역보정시스템 테스트베드 모듈을 사용하였다 [3]. 데이터 간격은 1초이고 총 6시간동안 시뮬레이션 하였다.

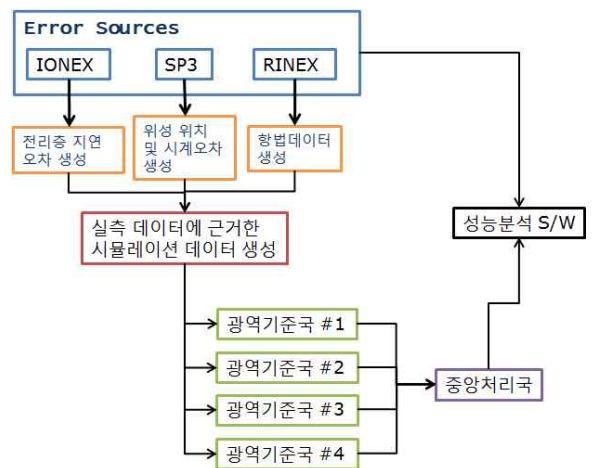


그림 1 시뮬레이션 시나리오
Fig. 1. Simulation Scenario

시뮬레이션 결과는 서울대학교 GNSS 연구실과 한길소프트가 공동으로 자체 개발한 광역보정시스템 성능분석 소프트웨어를 사용하여 분석하였다. 광역보정시스템 성능분석 소프트웨어는 사용자 위치에 따른 전리층 지연오차, 보호수준, 가용성, 위성 상태 등을 가시화하여 보여줌으로써 전체적인 시스템의 성능검증을 용이하게 한다.

아래의 그림은 수식 (8)을 이용하여 PRN 15번 위성의 공분산 행렬을 계산하고, 사용자가 위도, 경도 5도 간격으로 있다고 가정하고 사용자에게 적용할 때의 $\delta UDRE$ 값을 나타낸 그림이다. 광역보정메시지를 생성할 때 사용된 기준국은 마라도, 주문진, 호미곶 NDGPS 기준국과 서울대학교 기준국, 총 네 개의 기준국을 사용하였다. 앞서 예상하였듯이 서비스 영역 가장자리로 갈수록 $\delta UDRE$ 값이 커지는 것을 확인할 수 있다.

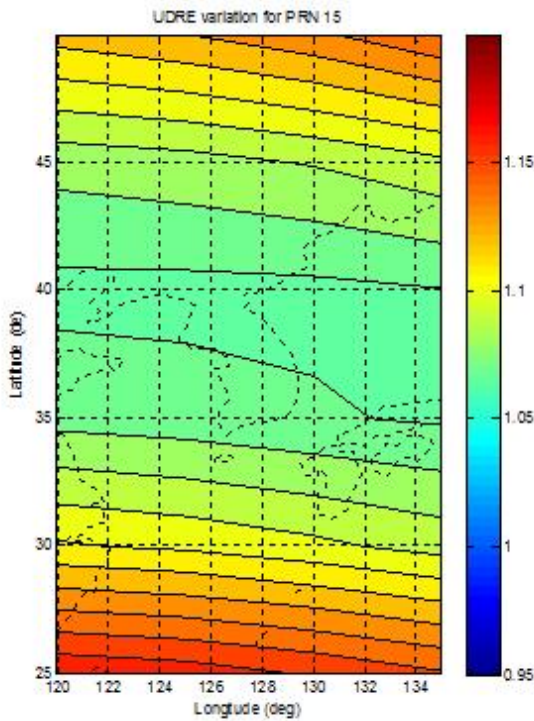


그림 2 한반도 지역에서의 UDRE 변화
Fig. 2. $\delta UDRE$ value in Korean region

수식 (7)을 이용하여 사용자 위치에 따른 위성 궤도 및 시계 오차 보정오차는 아래의 그림과 같다. 그림 1의 결과를 적용하지 않을 경우 하나의 위성에 대해서 사용자의 위치에 관계없이 일정한 신뢰수준을 갖게 되지만 $\delta UDRE$ 를 적용함으로써 아래의 그림과 같이 사용자의 위치에 맞는 신뢰수준을 제공할 수 있다.

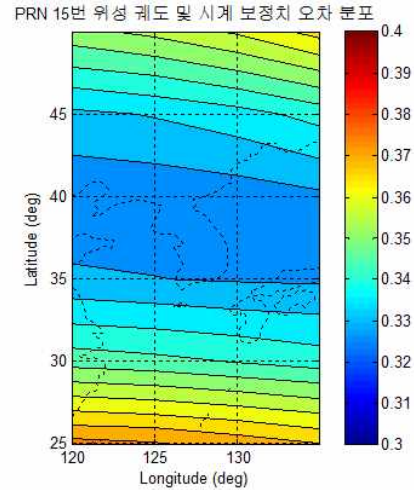


그림 3 PRN 15번 위성 궤도 및 시계 보정치 오차 분포
Fig. 3. Satellite clock and ephemeris error variance of PRN 15

아래의 그림은 한반도 주변의 수직 격자전리층 지연오차의 신뢰도 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 파란 동그라미로 표시된 격자점은 기준국의 전리층 통과점이 해당 격자점 근처에 없어서 사용하지 못하게 되는 격자점이다. 하지만 기준국 네트워크가 전국의 가장자리에 위치해 있기 때문에 한반도 내의 사용자에게는 모니터링 되지 않은 격자점의 정보가 필요한 경우가 거의 없기 때문에 연속적인 항법을 수행할 수 있다. 서비스 영역 내의 대부분의 지점에서 GIVE 값이 3.5 이내로 높은 신뢰수준을 갖는 것을 확인할 수 있다.

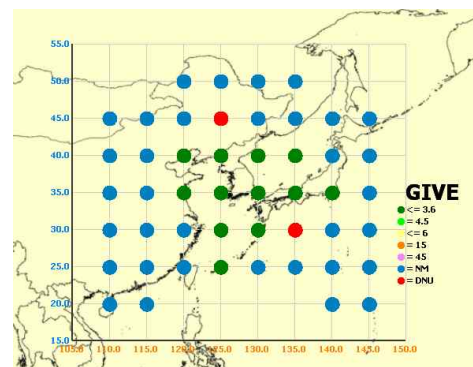


그림 4 한반도 주변 수직 격자 전리층 지연 오차 신뢰도 분포
Fig. 4. GIVE values in Korea

그림 5와 6은 광역보정메시지를 적용한 사용자의 수평 및 수직 보호수준을 나타낸 것이다. 수평 보호수준은 약 18 ~ 38m의 결과가 나타났고 서비스 영역 내에서는 대부분 20m 정도를 갖는 것으로 나타났다. 수직 보호수준은 GNSS 특성 상 수평보호수준보다 1.5배 정도 큰 30~45m 정도를 갖는 것으로 나타났다.

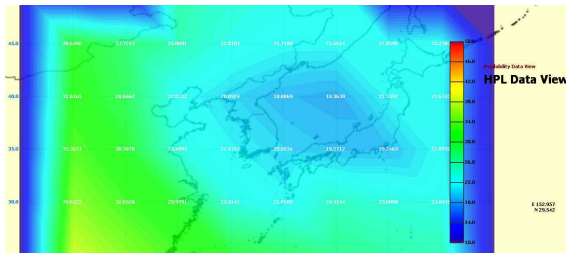


그림 5 사용자 위치에 따른 수평보호수준 분포
Fig. 5. Horizontal protection level w.r.t. user position

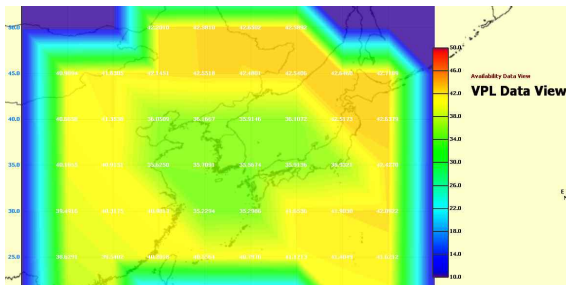


그림 6 사용자 위치에 따른 수직보호수준 분포
Fig. 6. Vertical protection level w.r.t. user position

수평 및 수직 보호수준을 가지고 사용자의 가용성을 판단한 결과는 아래의 그림과 같다. ICAO에서 규정한 LPV-200 항행 요구조건의 경우 수평 보호수준 40m, 수직 보호수준 35m 이하인 부분이 전체의 99%이상이어야 해당 요구조건을 만족한다. 전체 시뮬레이션 시간동안 LPV-200의 가용성은 사용자의 위치에 따라 96~99%로 나타났다. 아직 전체 시스템이 완벽하게 개발되지 않았고 특히 무결성과 관련된 부분에 Degradation factor의 고려 등 많은 개선의 여지가 있기 때문에 전체 시스템이 개발된 후에는 LPV-200의 성능 요구조건을 만족할 수 있을 것이라고 판단된다.

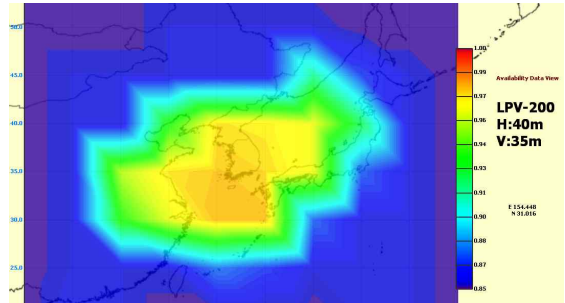


그림 7 LPV-200 가용성 분포
Fig. 7. LPV200 coverage contour

아래의 그림은 참고문헌 [7]에서 규정한 항구 입항 및 접근 단계에서의 항행 요구조건에 따른 사용자의 가용성을 나타낸 것이다. 이 항행 단계에서는 수평 보호수준이 20m 이내인 부분이 전체의 99.7% 이상이어야 한다. 시뮬레이션 결과 한반도 연안에서는 99% 이상을 달성하지 못하였지만 해당 항행 단계가 사용되게 되는 대부분의 항구 지역에서 99% 이상을 나타냈다. 하지만 이 역시 무결성 부분의 개선을 통해 더욱 가용성이 향상될 것으로 예상된다.

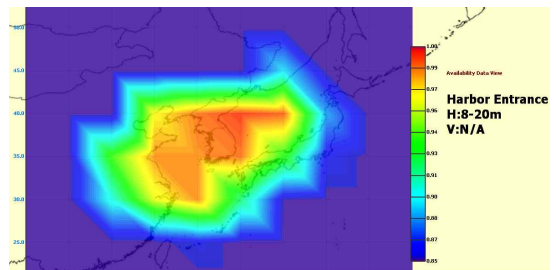


그림 8 항구 입항 및 접근 가용성 분포
Fig. 8. Harbor approach and entrance coverage contour

V. 결 론

본 논문은 한국형 광역보정시스템의 무결성 관련 알고리즘을 설명하고 이를 적용하였을 때의 가용성 결과를 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 시뮬레이션 결과 서비스 영역 중심 부근에서는 가용성 성능이 기존에 개발되어 사용되고 있는 외국의 광역보정시스템에 견줄만한 성능을 보였다. 앞으로 무결성 관련 degradation factor의 고려, 광역보정 메시지 스케줄링

기법 최적화, 기준국 추가 설치 등을 통하여 항법 성능을 더욱 높일 예정이고 실측데이터를 활용한 성능 분석도 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 소관 연구개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

This research was supported by a grant from "Development of Wide Area DGNSS" funded by Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs of Korean government, contracted through SNU-IAMD at Seoul National University.

참 고 문 헌

- [1] Yi-Chung Chao, 1997, "Real time implementation of the wide area augmentation system for the global positioning system with an emphasis on ionospheric modeling", ph. D. dissertation, *Stanford University*, 1997.
- [2] Yeou-Jyh Tsai, 1999, "Wide area differential operation of the global positioning system : Ephemeris and clock algorithms", ph. D. dissertation, *Stanford University*, 1999.
- [3] Doyoon, K. and K. Changdon (2003). "Development & performance analysis of Korean WADGPS positioning algorithm." *Wuhan University Journal of Natural Sciences* 8(2): 575-580.
- [4] RTCA. "Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment.", 2006.
- [5] Todd Walter, Andrew Hansen, and Per Enge, "Message Type 28," *Proceedings of NTM ION*, 2001
- [6] G. Golub, and C. van Loan, "Matrix Computations," third edition, *Johns Hopkins University Press Ltd., London*, 1996
- [7] Department of Defense, Department of Homeland Security, and Department of Transportation, " 2010 Federal Radionavigation Plan", 2010.

윤 호 (尹浩)



2006년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부(공학사)
 2006년 3월~현재 : 서울대학교 기계항공공학부 공학석박사통합과정
 관심분야 : 무결성 감시, 광역보정 항법

기 창 돈 (奇昌敦)



1984년 2월 : 서울대학교 항공공학과 (공학사)
 1986년 2월 : 서울대학교 항공공학과 (공학석사)
 1994년 1월 : Stanford Univ. 항공우주공학과(공학박사)
 1996년 9월 ~ 2000년 9월 : 서울대학교 기계항공공학부 조교수

2000년 10월~2006년 9월 : 서울대학교 기계항공공학부 부교수

2006년 10월~현재 : 서울대학교 기계항공공학부 교수
 관심분야 : 위성항법시스템, 실시간 보정위성항법시스템, 실시간 광역보정위성항법시스템, 실시간 초정밀 위치결정 시스템, 항공기/우주비행체 자세결정, 무인항공기 자동 제어 시스템, 항공기 자동착륙 유도제어 시스템, 차량항법 시스템, 실내용 자동항법시스템, 위성체 위치결정 시스템, 항공교통 관제시스템, Avionics

김 도 윤

2001년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부(공학사)
 2007년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부(공학박사)
 관심분야 : 광역보정항법