

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 42(11), 947-957(2014)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2014.42.11.947

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

의사위성 항법시스템의 항법성능 분석기법 연구

박준표*, 석진영**

A Study on Navigation Performance Analysis Technique of Pseudolite Navigation Systems

Jun-Pyo Park* and Jinyoung Suk**

Agency for Defense Development*, Chungnam National University**

ABSTRACT

In this paper, the navigation performance analysis techniques of a pseudolite navigation system are proposed. To validate the techniques, operation and navigation test results using real test data are addressed. The conventional navigation performance analysis methods used for satellite navigation system, such as Galileo and GPS, are analyzed to identify the error factor and to check the criterion of UERE defined in the standard document. And then the method to calculate the UERE through the ranging measurements are studied. By identifying the error factor in pseudolite navigation system based on these methods, the available UERE observation and calculation method applicable to pseudolite navigation are proposed. Simulation results considering various circumstances and the actual flight test results are presented to verify the proposed method.

초 록

본 논문은 의사위성 항법시스템의 항법성능 분석기법을 제시하고, 실제 시험 데이터를 이용한 의사위성 항법시스템의 항법결과 성능분석을 통해 이를 검증하고자 하였다. 기존 GPS 및 Galileo 등의 위성항법 분야에서 적용되는 항법성능 분석방법들을 통해 오차 요소들을 식별하고, 표준화된 문서에서 정의한 UERE의 기준을 확인하고, 실험적으로 UERE를 계산하는 방안을 살펴보았다. 이를 기준으로 의사위성 항법시스템에서의 오차 요소를 식별하고, 가용한 UERE 관측 방법과 UERE 계산 방법 및 UERE와 위성 배치로부터의 항법해 성능 추정 방안을 제안하고 몇 가지 상황을 고려한 시뮬레이션을 수행하였으며, 최종적으로 비행시험을 통한 실제 데이터를 이용하여 이를 검증하였다.

Key Words : Pseudolite(의사위성), GNSS(위성항법시스템), Navigation(항법), UERE(의사거리 오차)

† Received : May 26, 2014 Revised : October 23, 2014 Accepted : October 28, 2014

** Corresponding author, E-mail : jsuk@cnu.ac.kr

I. 서론

미국의 GPS로 대표되는 위성항법시스템(GNSS : Global Navigation Satellite System)의 경우, 위성이 우주공간에 위치하고 전지구에 고르게 분포하는 관측 기준국으로부터 오랜 시간동안 평균화된 GNSS 항법 성능을 추정할 수 있는 측정 데이터를 축적하여 위성항법의 성능을 지속적으로 분석하고, 그 결과를 사용자들에게 제공하고 있다[1,2].

최근 GNSS 음영지역에서의 보강시스템 또는 대체항법 시스템으로서 활용되고 있는 의사위성항법시스템(Pseudolite Navigation System)은 실내, 도심지에서의 가용 항법 신호원 확보를 통한 GNSS 항법 성능 향상 및 협역의 범위에서 독자항법 시스템으로 사용되고 있다[3~6]. 이러한 의사위성항법시스템은 대부분의 경우 국부적인 지역에 의사위성이 분포하는 관계로 의사위성 신호를 상시 관측할 수 있는 관측기준국을 확보하기 어렵다. 따라서, 의사위성의 시각동기 오차 및 거리 측정 오차를 공통적으로 관측할 수 없게 되어, 지역적으로 편향된 의사거리 오차를 유발하게 된다. 또한 지상에 설치되는 의사위성의 특성상 지형 지물에 의한 고정 오차가 존재할 수 있다. 그리고 항법 시스템의 용도에 따라 서비스 영역을 충분히 둘러싸지 못하는 비대칭 배치 특성을 갖게 된다. GNSS의 경우 사용자 기준으로 위성의 배치가 고르게 구성되어, 전리층 및 대류권 지연 오차와 같이 공간적으로 상관성이 높은 오차 요소들이 항법해 계산 과정에서 일부 공통 오차로 제거되는 이점을 갖게 된다[1]. 하지만 사용자와 의사위성간의 상대거리 차이가 크고 배치 특성이 비대칭으로 구성되는 경우에는 이와 같은 이득을 기대하기 어렵다. 이와 같은 특성으로 인하여 의사위성 항법 시스템의 성능 분석을 위해서는 GNSS와는 다른 고려가 필요하다.

본 논문에서는 특히 GNSS를 대체하는 독자항법을 목적으로 항법 대상영역이 배치된 의사위성의 외부에 있는 경우로서, 사용자 기준에서 의사위성들이 둘러싸여져 있는 대칭적(symmetric) 형태의 위성 배치가 아닌 지상기반의 의사위성항법시스템에서의 항법성능을 분석하는 방안을 제시하고자 하였다. 먼저, 기존 GNSS 분야에서 적용되는 분석 방법들을 통해 오차 요소들을 식별하고, 표준화된 문서에서 정의한 UERE(User Equivalent Range Error)의 기준과 실험적으로 UERE를 계산하는 방안 등을 살펴보았다[7~9]. 이를 바탕으로 의사위성 항법시스템에서의 오차

요소를 식별하고, 가용한 UERE 관측 방법과 이로부터 UERE 계산 방법을 제안하고 몇 가지 상황에 따른 시뮬레이션을 수행하였으며, 최종적으로 실험결과를 통해 의사위성 항법시스템의 항법해 성능분석 기법을 제안하고 이를 검증하였다.

II. 항법성능 분석기법

2.1 의사거리 측정 오차

일반적으로 위성항법 시스템에서 UERE는 사용자가 항법 신호원으로부터 송신되는 신호를 이용해 계산하는 의사거리 측정치 오차의 통계적인 수준을 말한다[7]. 예를 들어, 항법 신호원의 위치 오차, 신호의 품질 지연, 전자 모듈의 지연 등의 오차 요소들을 거리 측정 오차로 환산한 것이다. 이때, 측정치간의 상관성을 갖는 오차는 제외하여, 실제 항법해 계산에 영향을 미치는 오차 성분만을 고려하게 된다.

UERE는 URE(User Range Error)와 UEE(User Equipment Error)로 구분된다. URE와 UEE의 구분은 명확하지 않으나, 일반적으로 위성과 지상국과 관련된 오차를 URE로 정의하고, 위성 송신기가 신호를 송출하고 난 이후의 수신과정에서의 오차 성분을 UEE로 정의한다[9].

UERE 및 URE, UEE 계산에서, 통상적으로 의사거리 오차의 특성이 평균이 0인 정규분포를 갖는다고 가정한다. 이러한 가정은, 임의 시간에 특정 장소에서 측정한 GNSS 의사거리 오차 특성으로는 맞지 않으나, 오랜 시간에 걸쳐 전 지구에 분포한 사용자를 가정했을 때는 합리적인 가정이 된다. 이와 같은 가정이 합당한 경우 UERE를 1-sigma 형태로 정의할 수 있고, 수식 (1)과 같이 URE와 UEE의 RSS(Root Sum Square)로 UERE를 계산할 수 있다.

$$UERE = \sqrt{URE^2 + UEE^2} \quad (1)$$

2.2 GNSS UERE 버짓

2.2.1 GNSS 오차 요소

GNSS UERE를 결정하는 GNSS 의사거리 오차 요소로는 일반적인 GNSS 항법 오차 요소들이 모두 포함된다. 이들 오차 요소들로는 위성계도 오차, 위성시계 오차, 전리층 지연 오차, 대류권 지연 오차 및 수신기 시계 오차 등이 있다.

2.2.2 GPS UERE

GPS의 경우, 미국 국방부(DoD, Department of Defense)에서 해마다 GPS 프로그램 업데이트

에 맞추어 GPS의 성능에 대한 공식 자료를 배포한다. UERE 버짓은 개별 오차 요소를 오랜 시간에 걸쳐 평균을 낸 값이다. 또한, 다양한 수신 환경에 대해서 GPS 수신기의 UEE 추정 값을 제시하고 있지만, 미국 DoD의 공식 문서인 GPS SPS(Standard Positioning Service) PS(Performance Standard)는 단지 SIS(Signal In Space)에만 한정된 표준을 제공하고 있다[10].

2.3 UERE에 기반한 항법해 성능분석

2.3.1 의사거리 모델

위성항법 시스템에서 항법해 계산을 위한 관측치는 의사거리 측정치가 된다. 의사거리 측정치의 간략한 모델은 수식 (2)와 같다.

$$\rho_u^i = \| \underline{x}^i - \underline{x}_u \| + B + \epsilon \quad (2)$$

ρ_u^i : 사용자와 i-번째 위성간 측정 의사거리

\underline{x}^i : i-번째 위성의 위치

\underline{x}_u : 사용자 위치

B : 수신기 시계 오차

ϵ : 각종 잡음 오차

수식 (2)를 선형화하여 수식 (3)으로 정리할 수 있고, 다수의 관측치에 대해서는 수식 (4), 수식 (5)와 같이 행렬식으로 구성할 수 있다. 이때, $\delta\rho$ 는 선형화 위치에서 추정된 사용자와 위성간의 의사거리와 관측 의사거리의 차이를 나타내고, H 는 사용자와 수신기 간의 시선벡터로 구성되는 행렬로 항법 시스템의 사용자 기준 배치 특성을 나타내게 된다[1].

$$\delta\rho_u^i = - \frac{(\underline{x}^i - \underline{x}_u)}{\| \underline{x}^i - \underline{x}_u \|} \cdot \delta\underline{x}_u + \delta B + \epsilon \quad (3)$$

$$\equiv - \underline{1}^i \cdot \delta\underline{x}_u + \delta B + \epsilon$$

$\underline{1}^i$: 사용자와 i-번째 위성간의 단위 방향벡터

$$\text{(Line of sight vector, } \underline{1}^i = \frac{(\underline{x}^i - \underline{x}_u)}{\| \underline{x}^i - \underline{x}_u \|} \text{)}$$

$$\delta\rho = H \cdot \delta\underline{x} + \epsilon \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \delta\rho^1 \\ \delta\rho^2 \\ \vdots \\ \delta\rho^N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\underline{1}^{1^T} & 1 \\ -\underline{1}^{2^T} & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\underline{1}^{N^T} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta x_u \\ \delta B \end{bmatrix} + \epsilon \quad (5)$$

$\delta\rho$: 측정의사거리 오차

H : 위성과 수신기간의 시선벡터

\underline{x}^i : i-번째 위성의 위치

\underline{x}_u : 사용자 위치

수식 (5)는 의사거리 측정치로부터 항법해를 계산하기 위한 기본적인 관계식이다. 여기서, H 행렬은 사용자로부터 위성간의 방향벡터와 공통 시계오차 B 를 고려한 항으로 구성된 관측행렬이 된다.

2.3.2 항법해와 의사거리 오차 상관관계

수식 (5)의 풀이는, 일반적으로 수신기의 위치와 수신기 시계오차를 포함하는 4개의 미지수보다 의사거리 측정치의 수가 많은 과 결정(over-determined) 문제가 된다. 이를 위해 최소 자승법을 이용한 항법해는 수식 (6)과 같다.

$$\delta\underline{x} = (H^T H)^{-1} H^T \cdot \delta\rho \quad (6)$$

항법 식으로부터 의사거리 오차와 항법해 오차의 공분산의 상관식은 수식 (7)로 표현된다.

$$\text{cov}(\delta\underline{x}) = (H^T H)^{-1} H^T \cdot \text{cov}(\delta\rho) \cdot H (H^T H)^{-1} \quad (7)$$

2.3.2.1 GNSS의 UERE 가정이 만족되는 경우

수식 (7)로부터 항법해와 의사거리 오차의 공분산을 계산하는 방법은, 의사거리 오차의 통계 특성에 따라 단순화될 수 있다. 일반적인 UERE 가정인, 의사거리 오차들이 모두 평균 0의 정규 분포이고, 측정치간의 상관성이 없는 동일한 분포를 갖게 되면, 아래와 같이 단순화가 가능하다.

$$\text{cov}(\delta\rho) = I \cdot \sigma_{UERE}^2 \quad (8)$$

$$\text{cov}(\delta\underline{x}) = (H^T H)^{-1} \sigma_{UERE}^2$$

수식 (8)은 일반적인 UERE 가정을 만족하는 경우, 의사거리 오차의 공분산이 하나의 스칼라 값으로 표현되어, 1-sigma 형태의 UERE로 표현 가능하게 되고, 항법해의 공분산은 UERE와 위성의 배치로 결정된다는 것을 의미한다. $(H^T H)^{-1}$ 의 대각 성분을 조합하여, 위성의 배치 특성에 대한 항법 정밀도를 판단하는 DOP이라고 하는 판단값을 결정하며, DOP 값으로부터 RMS 기준의 항법해 추정 오차는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$RMS_3D_Position_Error = \sigma \cdot PDOP \quad (9)$$

$$RMS_horizontal_error = \sqrt{\sigma_E^2 + \sigma_N^2} = \sigma \cdot HDOP$$

$$RMS_vertical_error = \sigma_U = \sigma \cdot VDOP$$

2.3.2.2 GNSS의 UERE 가정이 만족되지 않는 경우

GNSS의 경우 위성의 이동에 따라 다중경로 오차의 특성이 변화하고, 특정 방향 및 양각에서 발생하는 오차의 특성이 계속적으로 유지되지 않는다. 또한 전리층 및 대류층 지연의 경우 보상 모델의 오차가 모든 위성에 대해 평균적으로 동일하게 반영되어 항법해 계산 과정에서 일부 공통오차로 제거되는 이득이 있다. 하지만 지상에 설치되는 대부분의 의사위성 항법 시스템의 경우, GNSS 위성과는 달리 고정된 지점에 설치되고 지역항법의 특성상 목표 항법 영역도 고정되어 있기 때문에 사용자 기준에서의 위성 배치가 변하지 않는다. 이 때문에 지형 지물에 의한 고정적인 바이어스 오차가 계속적으로 유지되는 특성을 갖게 된다. 또한 비대칭 적이고 상대적인 거리 차이가 큰 배치 특성으로 인하여, 대류층 지연과 같이 지역 상관성이 높은 오차 요소들이 항법해 계산 과정에서 공통오차로 제거되기 어렵다.

항법시스템을 운용하는 관점에서는 각 의사위성의 오차를 관측하기 위한 기준국 확보가 불가능한 특징이 있다. 지형에 따라 지상에 설치된 모든 의사위성으로부터 안정적으로 신호를 수신할 수 있는 장소를 확보할 수 없기 때문이다. GNSS의 경우 전지구에 분포한 기준국을 이용하여 관측 오차를 평균적으로 제거하고 시각동기 및 의사거리 오차를 보상할 수 있지만, 의사위성 항법 시스템에서는 이와 같은 운용 시스템 구축이 어렵다. 따라서 모든 의사위성 신호를 동시에 수신하기 위해서는 항공기를 이용한 성능 검증이 유일한 방법이 된다.

이상의 의사위성 항법시스템 운용 특성으로 인해, 항공기에서 관측된 의사거리 오차는 바이어스를 갖게 된다. 이는 GPS의 UERE 측정을 위한 기본 가정인 평균이 0인 정규분포 특성을 만족하지 못하게 된다. 따라서, 수식 (8)과 같이 의사거리 오차의 공분산이 스칼라 값으로 표현될 수 없으므로, 수식 (9)와 같이 단순화된 UERE와 DOP로 항법해 오차와의 상관관계를 정의할 수 없다. 결국 수식 (7)의 기본식이 의사거리 오차와 항법오차의 상관관계를 정의하는 최종 상관식이 된다.

2.4 통계적인 항법해 성능 분석

의사거리와 항법해의 상관식으로부터, 의사거리 오차와 항법해 오차의 상관관계를 도출하고, 의사거리 오차의 통계값인 UERE와 위성의 기하 배치를 나타내는 DOP를 이용해서 항법해 오차

성능을 추정하는 방법과는 다른 방법으로, 실제 측정된 항법해 샘플들을 통계 처리하여 각종 지수로 항법해 오차를 정의할 수 있다. 항법해 오차가 임의의 n 개 샘플만큼 각 방향에 대해 $\Delta e_j, \Delta n_j, \Delta u_j$ 로 획득 가능하다면, RMS오차는 아래와 같이 계산할 수 있다[1].

$$RMS_vertical_error = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \Delta u_j^2} \quad (10)$$

$$2D_RMS_error = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\Delta e_j^2 + \Delta n_j^2)}$$

$$3D_RMS_error = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\Delta e_j^2 + \Delta n_j^2 + \Delta u_j^2)}$$

이때, 항법해가 바이어스되지 않은 경우, 각 방향 오차의 표준편차로부터 RMS오차를 식(11)과 같이 도출할 수 있다. 이 때, RMS와 STD는 1차원에서 동일한 크기를 갖게 되고, 수평 항법해 및 3차원 항법해에서의 상관식을 확인할 수 있다.

$$RMS_vertical_error = \sigma_u \quad (11)$$

$$2D_RMS_error = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_n^2}$$

$$3D_RMS_error = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_n^2 + \sigma_u^2}$$

III. 의사위성 항법시스템의 항법성능 분석기법

본 장에서는 이상에서 기술한 기본적인 항법성능 분석기법과 GNSS의 사례를 바탕으로 지상 기반의 의사위성 항법시스템의 항법성능 분석기법을 제시하도록 한다. 우선, 의사위성 항법시스템의 오차 요소를 식별하고, 의사위성 항법시스템에서 가용한 UERE 관측 방법과 이로부터 UERE 계산 방법을 선정하고 시뮬레이션 및 실험결과를 통해 검증하였다.

3.1 의사위성 항법시스템의 오차요소

3.1.1 의사거리 오차

GNSS 신호는 우주 공간에서 고속 이동하는 위성체로부터 송신되는 반면, 지상기반의 의사위성 항법시스템의 경우 송신기는 지표면의 고정된 지점에 위치한다. 이와 같은 의사위성 항법시스템의 환경적 특성으로 인해, GNSS에서 고려하는 전리층 지연 오차, 상대성 효과, 사냥 효과(Sagnac effect) 등을 의사위성 항법시스템의 오차 요소에서 제외할 수 있다. 하지만, 대기권 효

과 중 대류층 지연 오차의 경우는 의사위성 항법 시스템의 사용자와 송신기는 모두 대기권 내에 존재하기 때문에, 광역에 배치되는 시스템 특성상 사용자-송신기 간의 양각이 GNSS에 비해 상대적으로 작다. 대부분의 대류권지연 추정 기법들은 사용자-송신기 간의 양각이 낮은 환경에서 오차를 크게 유발하는 특성이 있다. 이로 인해 대류권 지연 오차는 의사위성 항법시스템에서 사용자-송신기, 송신기-송신기 간에서 주요한 오차 요소가 된다[11].

3.1.2 의사위성 항법시스템 특성

3.1.2.1 의사위성 배치

의사위성 항법시스템은 앞에서 나열한 의사거리 오차 요소 외에 의사위성 즉, 항법신호의 신호원인 송신기의 배치 특성이 항법해 성능에 큰 영향을 미치게 된다. GNSS 위성은 항상 사용자의 상공에 위치하기 때문에, 고도 방향에 대한 배치 특성이 좋지 않다. 즉 수평 항법해에 영향을 미치는 HDOP에 비해 수직 항법해 성능에 영향을 미치는 VDOP이 더 크게 된다. 의사위성 항법시스템 송신기는 사용자 수신기에 대해서 지형적, 운용목적에 따라 대칭적으로만 배치되지 않기 때문에, 대칭으로 배치되지 못하는 방향에 대한 DOP 값이 커지게 된다.

3.1.2.2 의사위성 항법시스템 운용 환경

GNSS의 경우 지상에 고정된 다수의 기준국 수신기 데이터를 이용하여, GNSS 신호를 정밀하게 수신할 수 있다. 이들 기준국 수신기는 사전에 정밀 측위된 기준 위치를 알고 있으므로, 해당 시점에서의 의사거리 측정 오차를 계산할 수 있다. 그리고 다수 기준국의 수신 데이터와 기상 관측 값으로부터 측정된 의사거리 오차의 개별 요소들을 추정할 수 있게 된다.

반면 의사위성 항법시스템은 지상에 설치된 송신기로부터의 신호를 항법 신호원으로 이용하기 때문에, 의사위성 항법시스템 신호를 수신할 수 있는 고정 위치점을 확보하기 어렵다. 따라서, GNSS 항법 성능분석을 위해 요구되는 다수의 기준국 데이터를 이용할 수 없는 단점이 있다.

이와 같은 의사위성 항법시스템 운용 환경 특성으로 인해, 의사위성 항법시스템 의사거리 오차 관측은 상공에서 이동하는 항공기에 의사위성 항법시스템 수신기와 GNSS 수신기를 동시에 부착하여 수행되었다. 매 시간 관측된 의사위성 항법시스템 의사거리를 측정치로 하고, 해당 시점의 DGPS 항법해를 기준 위치로 사용하여 의사

거리 측정 오차를 수집하였다.

3.2 UERE 계산 방법

3.2.1 개별 위성에 대한 의사거리 오차 계산

의사거리 측정치의 모델을 아래와 같이 정의하였다.

$$\rho = d + T + B - b + M + \epsilon \tag{12}$$

d : 탑재수신기-송신기간의 거리

T : 대류권 지연

B : 수신기 시계 오차

b : 송신기 시계 오차

M : 다중경로 오차

ϵ : 수신기 관련 오차

의사거리 모델의 오차 요소 중, 대류권 지연 오차를 지상의 기상값과 RTCA모델을 적용하여 제거하고, 수신기 시계오차는 항법해 결과로부터 계산하여 제거한다[11]. 수신기와 개별 위성간의 거리는 탑재 GPS 수신기의 DGPS 항법해 결과를 기반으로 추정한다. 이렇게 계산된 개별 위성에 대한 의사거리 잔차는 수식 (13)과 같다.

$$\Delta\rho = \rho - \hat{d} - \hat{T} - \hat{B} = \delta d + \delta T + \delta B - b + M + \epsilon \tag{13}$$

\hat{d} : 탑재 GPS 수신기 항법해와 송신기 간의 거리 계산값

\hat{T} : RTCA 모델로 계산된 대류권 지연 추정값

\hat{B} : 항법해 결과에서 도출된 수신기 시계 오차

수식 (13)에서 정의한 의사거리 잔차는 고정된 수신기가 아닌 이동 중인 수신기에서 관측된 결과로, GNSS에서 정밀 측위된 기준위치에서 계산하는 의사거리 잔차와 비교하여 잔여 오차항들이 상대적으로 크다. 우선 다중경로 오차에 대해서는 별도의 추정 알고리즘을 적용하지 않았다. 그리고 송신기 시계오차의 경우 의사위성 항법 시스템의 시각동기 오차가 그대로 반영되게 된다. 결국 충분히 관측될 수 없는 송신기 시계오차, 의사위성과 사용자 간의 다중경로 오차 등이 본 의사위성항법 시스템에서의 바이어스 오차로 나타나게 된다.

3.2.2 UERE 계산

의사위성 항법 시스템의 배치 특성 및 고정적인 지형 특성으로 인해, 의사위성 항법 시스템의 항법 성능은 시간이 지나도 변하지 않는 고정적인 오차 요소가 존재하게 된다. GPS UERE의 기본 가정은 의사거리 측정오차는 평균적으로 바이어스가 0이라는 것인데, 의사위성 항법 시스템에

서는 이와 같은 가정을 그대로 적용하기가 어렵게 된다. 따라서 GPS와 같이 하나의 대푯값으로 UERE를 결정할 수 없고, UERE의 잡음 수준과 바이어스 수준을 나누어 표현하는 것이 합리적인 표현 방법이다[7,9]. 그러나, 전체 시스템의 성능을 계량화하는 관점에서 UERE를 대표하는 하나의 통계값이 요구되는 경우, 바이어스와 잡음 수준을 모두 표현할 수 있는 RMS 통계값으로 UERE를 정의하는 것이 타당하다고 판단된다. 의사위성 항법시스템 항법해가 수렴된 구간에서, 모든 위성에 대해 계산한 수식 (14)의 의사거리 잔차를 UERE로 정의하고, 이들의 RMS를 UERE 대푯값으로 이용하였다. RMS 통계치의 UERE 계산 방법을 정리하면 아래와 같다.

$$UERE = \sqrt{\frac{1}{N \cdot K} \sum_{t=1}^K \left(\sum_{i=1}^N (\Delta \rho^i(t))^2 \right)} \quad (14)$$

$\Delta \rho^i(t)$: 시간 t에서 계산된 i-번째 위성의 의사거리 오차 계산값

N : 가시 위성 수

K : UERE 계산에 사용된 총 epoch

그리고 UERE와 위성의 배치 특성으로부터 항법 성능을 추정하는 방법은 수식 (9)와 같이 DOP와 UERE의 곱으로 계산될 수 없고, UERE 가정이 적용되기 전의 관계식인 수식 (7)을 이용하여 추정되어야 한다. 이 때, 각 의사위성에 대한 거리 측정치의 공분산은 각 의사위성별로 별도로 계산되어야 한다. 이로부터 항법해 성능을 추정하기 위해서는, 수식 (15)와 같이 계산된 항법해 공분산의 대각 성분의 제곱합의 제곱근으로 계산할 수 있다.

$$RMS_horizontal_error = norm[diag(cov(\delta x))] \quad (15)$$

3.3 시뮬레이션

UERE의 계산 과정 및 UERE 통계값과 항법해와 상관성을 확인하기 위하여, Fig. 1의 위성배치를 가정한 시뮬레이션을 수행하였다. 2-D 항법을 수행하였고, 5개의 위성을 사용자로부터 1km 등거리 배치하였다. 이 때 얻을 수 있는 HDOP은 2.27이다.

Figure 1과 같이 위성의 배치가 사용자 항법 영역에 대하여 고르게 배치되지 않고, 한쪽에만 위치하는 경우, x축 방향으로의 DOP이 y축 방향으로의 DOP보다 커지게 되고, 따라서 x축 방향으로의 오차가 상대적으로 커지게 된다. Fig. 2에서 시뮬레이션 항법결과를 도시하였다. 5개의

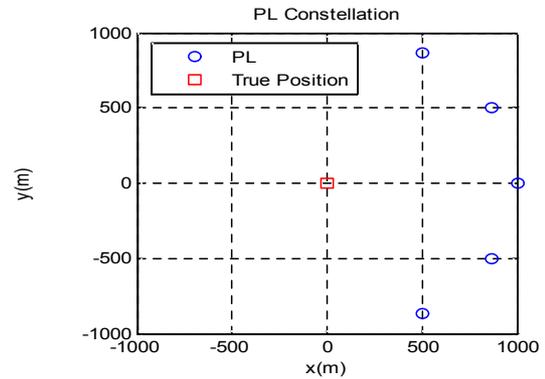


Fig. 1. Pseudolite constellation used in simulations

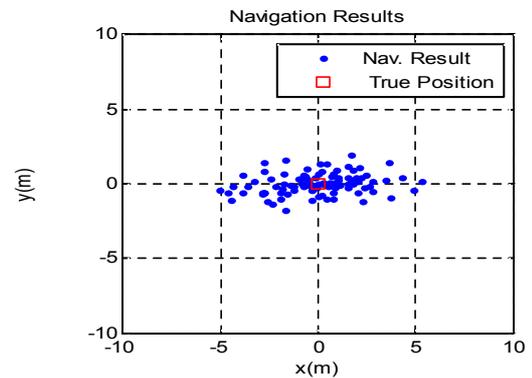


Fig. 2. Navigation results using unbiased Gaussian Noise pseudorange errors

위성에서 동일한 특성을 갖는 가우시안 잡음의 의사거리 오차를 적용하여 항법해를 계산한 시뮬레이션 결과, x축 방향으로의 오차가 상대적으로 커지는 특성을 확인할 수 있다. 가우시안 잡음 이외의 바이어스 오차 역시 항법해 계산시 DOP이 큰 방향에 대해서 항법해 오차가 더욱 크게 유발된다.

시뮬레이션 결과는 크게 2가지 관점에서 분석되었다. 첫째로 UERE 대푯값을 선정하기 위한 다양한 통계치들간의 비교 결과이다. 둘째로는 항법해 성능을 추정하기 위한 위성 배치와 의사거리 측정 오차의 상관식에 대한 비교 결과이다.

UERE 대푯값을 계산하기 위하여, 다양한 통계치들의 결과를 비교하였다. 총 5가지의 비교 대상 통계값은, 매 epoch별 5개 위성의 의사거리 오차로부터 표준편차(STD), 제곱평균의 제곱근(RMS), 평균(MEAN), 모든위성 의사거리 오차의 모든 epoch에 대한 RMS, 그리고 위성별 RMS이다.

그리고 UERE와 항법해의 상관성을 확인하기 위하여, HDOP과 UERE 통계치의 산술곱으로 표현되는 수식 (9)의 결과와 수식 (15)로 계산되는

항법해 성능 추정 결과를 정리하여, 실제 관측된 항법해 오차와 비교하였다.

시뮬레이션은 바이어스 오차에 따른 의사거리 잔차 계산 결과, 통계치 특성, 항법해 결과를 확인하기 위한 것으로, 모두 동일한 잡음(표준편차 1m)을 인가하고, 3가지 경우의 바이어스 오차를 추가하였다. 의사거리 잔차의 계산은 대류권 지연은 고려하지 않고, 단순 거리와 항법해 결과의 수신기 시계 오차만을 적용하였다. 아래에 계산식을 다시 한번 정리하였다.

$$\Delta\rho = \rho - \hat{d} - \hat{B} \quad (16)$$

3.3.1 Case Study

3.3.1.1 Case 1 : 균등한 바이어스 의사거리 오차

Figure 1의 5개 위성 의사거리 측정치를 생성하고 이들에 모두 균등하게 10m의 바이어스 오차를 인가하여, 수식 (16)의 의사거리 잔차를 계산하였다. 의사거리 잔차 계산 결과 및 각종 통계치, 항법해 결과를 Fig. 3에 도시하였다.

의사거리 오차의 바이어스 성분이 모두 동일하게 10m로 적용되었기 때문에, 모두 공통시계 오차로 제거되어, 의사거리 잔차 계산에서는 바이어스가 남아 있지 않다. 따라서 의사거리 잔차 계산 결과는 0을 기준으로 분포하고, 항법해 역시 원점을 기준으로 계산되었다. 이렇게 의사거리 잔차의 바이어스가 없는 경우 GNSS와 같이 잔차의 표준편차만으로 UERE를 정의할 수 있고, HDOPxUERE로 계산된 결과로 항법해 성능을

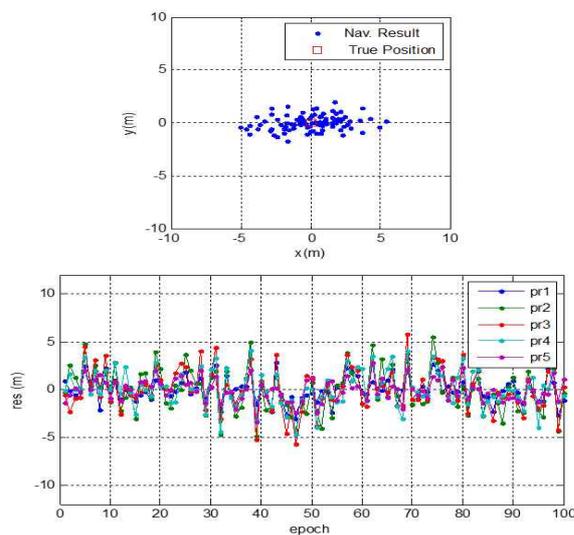


Fig. 3. Simulation result(case 1): pseudorange residuals (top) and navigation results (bottom) with statistics

예측할 수 있다. 본 시뮬레이션에서 관측된 항법해 오차(Meas. 2D_RMS)는 2.24m로, HDOPxSTD =2.15m 계산 결과와 동일한 수준으로 판단된다.

3.3.1.2 Case 2 : 바이어스 의사거리 오차 8m, 12m, 7m, 13m, 6m

의사거리 오차의 바이어스 성분을 각 위성에 대해 순서대로 8m, 12m, 7m, 13m, 6m를 인가하였다. Case 3과의 비교를 위하여, 항법해 오차가 서쪽으로 바이어스되는 경우를 가정하였으며, Case 2와 Case 3의 차이는 서편향 바이어스 오차의 크기변화를 기준으로 하였다. Fig. 4에 시뮬레이션 결과를 도시하였다.

PRN 2번과 4번에 상대적으로 큰 의사거리 오차가 인가되었고, 나머지는 상대적으로 작은 값이 적용되었다. 그 결과 의사거리 잔차도 PRN 2번과 4번이 큰 바이어스를 갖고 나머지는 작은 크기의 바이어스를 갖게 되었다. Case 1과 달리, 의사거리 잔차에 바이어스가 반영되었고, 각 위성들의 잔차 특성이 동일하지 않기 때문에 HDOPxUERE의 계산식으로는 실제 관측된 항법해 오차 수준을 추정할 수 없음을 확인할 수 있다.

의사거리 잔차의 epoch별 표준편차인 STD(epoch-by-epoch)는 3.25m이고, 모든 의사거리 잔차의 RMS 결과인 RMS(all)은 5.74m로 계산된다. HDOP 2.27을 적용했을 때, 실제 항법해 결과로부터 계산된 2D_RMS값인 6.65m를 추정할 수 있는 HDOPxUERE 결과를 얻을 수 없다.

하지만 수식 (15)에서 제안한 바와 같이 각 위성별 UERE RMS 결과와 위성의 배치 특성을 적

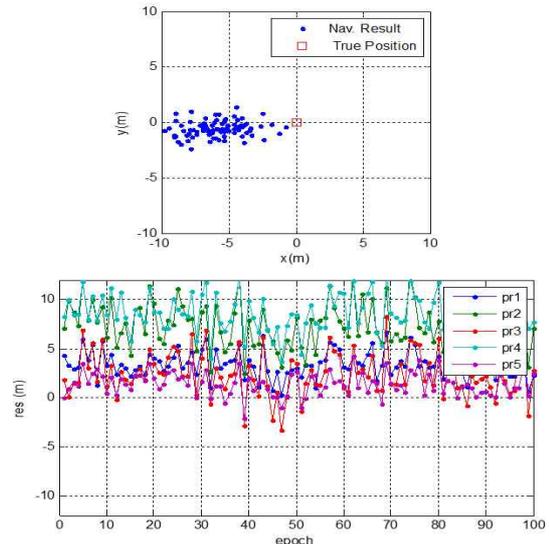


Fig. 4. Simulation result(case 2): pseudorange residuals (top) and navigation results (bottom) with statistics

용한 공분산의 대각 성분합 결과는 수평오차 약 6.7m로 계산되어, 실제 관측된 항법해 오차 6.65m와 유사한 수준의 추정 결과를 보여주고 있다. GPS와 유사한 환경이 주어지는 Case 1과 달리 Case 2에서는 기존 GPS 항법해 성능 분석 방법이 그대로 적용될 수 없고, 수식 (15)과 같은 기법이 적용되어야 하는 것을 확인할 수 있다. 다음으로 Case 3의 더욱 오차 수준이 커지는 경우에서의 시뮬레이션 결과를 정리하였다.

3.3.1.3 Case 3 : 바이어스 의사거리 오차 6m, 9m, 12m, 9m, 6m

각 의사거리 측정치에 순서대로 6m, 9m, 12m, 9m, 6m의 바이어스 오차를 적용한 시뮬레이션 결과를 Fig. 5에 도시하였다.

Case 2에 비해 Case 3에서는 UERE계산을 위한 통계치는 크게 변하지 않았으나, 관측된 항법해 오차의 크기가 크게 변한 상황을 가정하였다.

Case 2에서 STD값은 3.25m이고, Case 3에서는 2.67m으로 감소하였다. 하지만 항법해 결과의 2D_RMS값은 10.8m 수준으로 오차가 증가하였다. 이로부터 의사거리 잔차의 표준편차만으로 UERE를 표현할 수 없음을 확인할 수 있다. 반면에 의사거리 잔차의 평균과 RMS값은 항법해의 2D_RMS와 같이 증가했음을 확인할 수 있다.

따라서, UERE의 표현을 위해서는 RMS 결과를 적용하는 것이 적합하다는 것을 확인할 수 있다. 그리고 Case 2와 마찬가지로 기존의 DOP와 UERE 곱으로 항법해 오차 추정이 불가능을 확

Table 1. The simulation result

	Meas. 2D_RMS	HDOP×STD (epoch)	HDOP×RMS (all)	norm[DIAG(cov)]
Case 1	2.24m	2.15m	4.17m	2.08m
Case 2	6.65m	7.39m	13.05m	6.75m
Case 3	10.82m	6.08m	19.19m	10.71m

인할 수 있다. 실제 관측된 수평 항법해 오차는 10.8m 이지만, HDOP×RMS 결과는 18.8m로 계산되었다. 반면에 본 논문에서 제안하는 방식은 10.7m로 실제 관측 오차와 유사한 수준의 추정이 가능함을 확인하였다.

3.3.2 시뮬레이션 결과 요약

이상의 3가지 환경에 대한 시뮬레이션을 통해, 의사위성 항법시스템의 바이어스된 의사거리 오차 환경에서의 UERE 계산 접근 방법의 타당성을 확인하였다(Table 1). 우선, 의사거리 잔차에 바이어스 성분이 남아 있는 경우, DOP×UERE로부터 항법해 성능을 추정할 수 없음을 확인하였다. 그리고 Case 2와 Case 3의 비교 결과로부터, 표준편차 통계 특성만으로 UERE를 정의할 수 없음을 보았다.

이로부터 GNSS의 경우와 같이 UERE의 정의를 의사거리 잔차의 표준편차와 평균으로 나누어 해석하는 것이 의미있는 의사위성 항법시스템 의사거리 측정치 오차 분석 방법으로 판단된다. 따라서, 하나의 대푯값으로 표현하는 경우, 표준편차와 평균을 모두 포함하는 개념인 RMS를 이용하는 것이 타당하다. 또한, 시뮬레이션에서 보인 바와 같이 각 채널의 의사거리 잔차 간의 편이가 상당한 수준인 경우, 전체적인 UERE 통계치를 바탕으로 성능 분석을 하기에는 시스템의 성능이 충분히 안정되지 않은 상황으로 판단할 수 있다. 따라서, 참고문헌 [8]에서 처럼 Giove-B 위성에 대한 UERE 측정 자료와 같이 개별 송신기에 대한 성능을 확인하고 분석하는 과정이 더욱 의미 있는 성능 방법으로 판단된다.

IV. 시험 결과 분석

본 장에서는 의사위성 항법시스템을 이용한 비행시험 결과 데이터를 기반으로 지상기반의 의사위성 항법시스템의 의사거리 오차의 수준과 항법해 성능을 분석하도록 한다. 시험에 사용된 의사위성 항법 시스템은 해양 상공에서 비행하는 항공기를 사용자로 하기 때문에 해안가에 길게 배치되는 특성을 갖게 되었다. Fig. 1에서의 시뮬레이션과 같이 사용자 영역을 둘러싸지 못하는

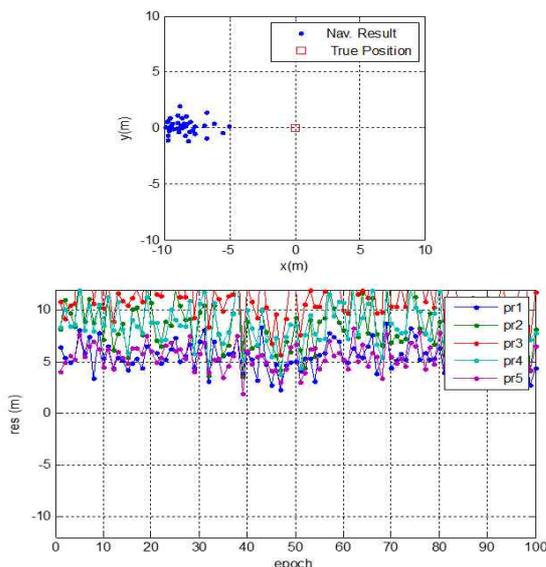


Fig. 5. Simulation result(case 3) : pseudorange residuals (top) and navigation results (bottom) with statistics

배치 특성을 갖고 있으며, 사용자의 이동 위치에 따라 사용자와 개별 의사위성간의 상대거리 차이가 급격히 변하는 특성을 갖게 된다. 그리고 의사위성의 설치 지역에 따라 산악 지형 및 해수면 반사에 의한 고정적인 오차가 관측되었다[12]. 이로 인해 사용자의 항법 오차는 고정적으로 참값에서 편향된 특성을 갖게 되었다. 본 시험 결과는 편향된 항법해 오차를 반영할 수 있는 의사위성의 UERE 추정 기법을 검증하는 것을 목적으로 하였다.

우선, 지상기반의 의사위성 항법시스템의 의사거리 오차 분석을 위해 DGPS 항법해 결과를 기준으로 의사거리 잔차를 계산하고, 통계 특성을 제시하며, 항법해 성능 분석을 수행하였다.

4.1 의사거리 오차 분석

비행시험 결과 탑재 수신기에서 획득한 의사거리 측정치를 Fig. 6에 도시하였다. 획득된 의사거리에서 탑재된 GPS 수신기의 DGPS 결과를 기준으로 각 송신기와 수신 안테나간의 실제거리를 추정하였다. 그리고 시험 당일의 기상 데이터를 기반으로 RTCA 대류권 지연 모델을 적용하여, 대류권 지연 추정값을 제거하고, 의사위성 항법시스템의 항법해에서 얻어진 수신기 시계 오차 결과로부터 수신기 시계오차 항을 제거하였다. 의사거리 오차 분석을 위한 의사거리 잔차의 계

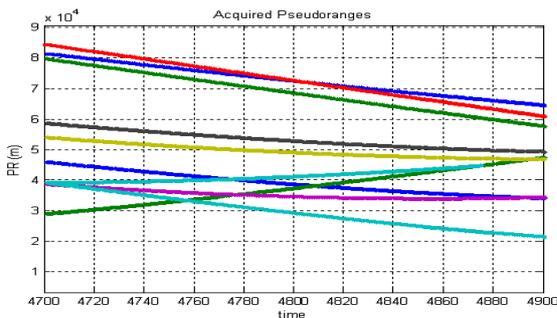


Fig. 6. Pseudorange measurements

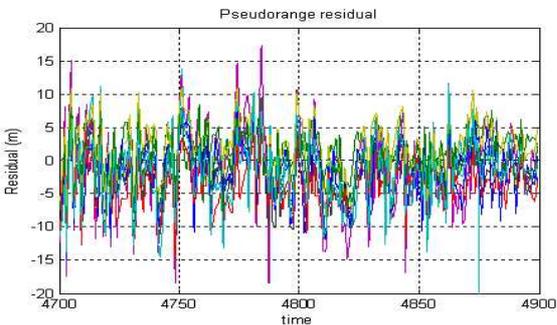


Fig. 7. Pseudorange residuals of flight test

산 방법은 수식 (13)과 같다.

의사거리 잔차 계산 시, 수신기 시계 오차를 적절히 제거하기 위하여 항법해가 수렴된 구간에 대해서만 의사거리 잔차를 계산한 결과를 Fig. 7에 도시하였다.

수신기의 의사거리 측정치는 스무딩 처리를 하지 않은 것으로, GPS UERE에서 정의하는 state 5의 잡음 수준 대비 상당히 큰 값으로 보인다. 해당 시간(초) 동안의 의사거리 오차의 성능 분석 결과를 각 epoch별 평균, 표준편차, RMS로 도시하고, 전체의 평균, 표준편차, RMS를 통계치로 Fig. 8~10에 도시하였다. Epoch별 통계치를 도시한 것은 지상기반의 의사위성 항법시스템의 의사거리 오차의 시간별 흐름을 보기 위한 것이다. 통계치로 제시한 전체 의사거리 잔차의 평균은 -1.1m이고, 표준편차는 4.9m, RMS는 5.0m로 확인되었다.

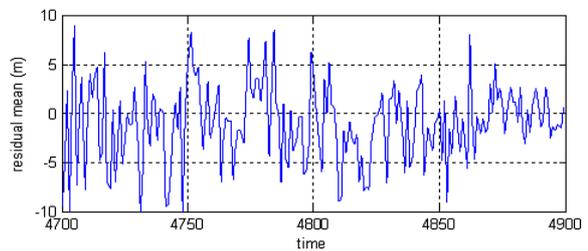


Fig. 8. Epoch-by-epoch average of pseudorange residuals

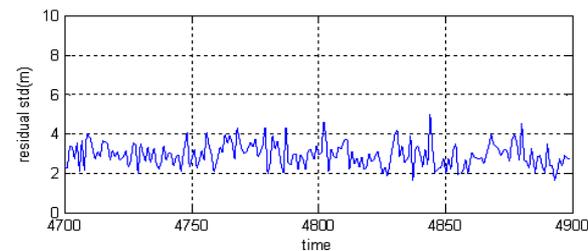


Fig. 9. Epoch-by-epoch standard deviation of pseudorange residuals

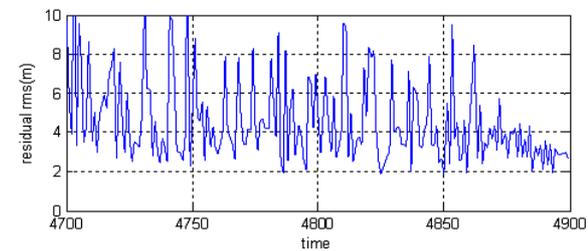


Fig. 10. Epoch-by-epoch RMS of pseudorange residuals

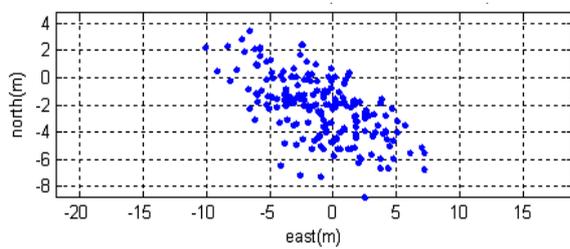


Fig. 11. Horizontal navigation performance results

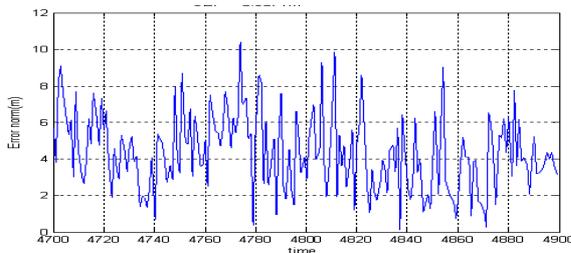


Fig. 12. Magnitude of horizontal navigation errors

4.2 항법해 성능 분석

항법해 성능 분석을 하기 위하여, 매 epoch마다 DGPS 항법해를 기준으로 지상기반의 의사위성 항법시스템의 항법해 결과를 ENU 좌표 변환하여 누적한 결과를 수평 항법성능으로 정의하여 CEP와 바이어스 오차로 의사위성 항법시스템의 항법해 성능을 도시할 수 있다. 도시한 항법해는 고정된 지점에서 측정된 것이 아니라 매번 변화하는 위치마다의 DGPS 기준 대비 오차로 해석할 수 있다.

Figure 11에서 도시한 결과는 CEP로 약 5m 수준으로 분석되었다. 매 epoch의 데이터를 누적 표시하는 방법 외에 수평오차의 크기를 시간에 대해 도시하고, 항법 성능의 시간별 추이를 확인할 수 있다. Fig. 12에 시간별 추이를 도시하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 의사위성 항법시스템의 항법성능 분석기법을 제시하고, 실제 시험데이터를 이용한 의사위성 항법시스템의 항법결과 성능분석을 통해 이를 검증하고자 하였다. GPS와 같이 전지구에 분포된 위성과 사용자, 오랜 시간에 걸친 측정치를 얻게 되어, 측정치간의 상관성이 없고, 동일한 통계적 분포를 갖는 평균이 0인 UERE를 가정할 때, $DOP \times UERE$ 가 곧바로 항법

해 오차 수준을 의미할 수 있다. 따라서 UERE를 정의할 때, 이와 같은 가정이 성립하지 않는다면, UERE를 하나의 대푯값으로 정의할 수 없다. 또한, 일부의 경우에는 UERE를 평균과 잡음수준으로 표현하고, 또는 각 수신 환경에 맞게 통계화된 수치로 UERE를 표현해야 한다. 대푯값을 이용해서 UERE를 표현한다면, 바이어스 오차와 잡음 오차 모두를 표현할 수 있는 RMS 방식을 적용하는 것이 타당하다고 판단된다. 그리고 UERE로부터 항법해 오차 수준을 추정하는 방법으로는, 의사위성별 UERE를 추정하고, UERE 단순화 가정이 적용되기 이전의 단계에서 항법해 오차를 추정해야 함을 확인하였다. 결론적으로 GPS나 Galileo의 오차 분석은 지상에 고정되어 정밀 측위된 기준국 수신기를 이용하여 수행된다. 그리고 위성의 배치가 고르게 분포된 상황이고, 오랜 시간 전지구적으로 데이터가 확보된 경우임을 보았다. 이에 반해 지상기반의 의사위성 항법시스템의 경우 고정된 기준국을 확보하기 어렵고, 위성의 배치가 사용자 이동에 따라 크게 변화하는 특징 때문에, 기존 위성항법에서 이용되는 방법을 그대로 적용하기 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 고속 이동하는 탑재체에 의사위성 항법시스템 수신기와 GPS 수신기를 모두 장착하여, 후처리 DGPS 결과를 기준으로 의사거리 잔차를 계산하고, 이를 기준으로 의사거리 오차 및 항법해 오차를 분석하는 방법을 사용하였다. 이러한 의사위성 항법시스템 운용 환경의 제약으로 인해, 본 논문에서 제시한 항법 성능 분석 결과는 한계점을 갖게 된다. 이는 본 논문에서 분석한 결과 수치는 많지 않은 시험들 중 임의 비행 시험에 대한 것으로, 전체 의사위성 항법시스템 시험 결과를 대표하지 못한다. 따라서, 추후 GNSS와 같이 의사위성 항법시스템에 대한 오랜 시간동안에 축적된 데이터를 이용한 분석결과를 통해 보다 신뢰성 있는 분석기법 검증이 필요할 것이다.

References

- 1) Kaplan, E.D. & Hegarty, C.J. (2006), "Understanding GPS Principles and Application," 2nd Edition, Norwood, MA, Artech House
- 2) Misra, P. & Enge, P. (2006), "Global Positioning System Signals, Measurements, and Performance," 2nd Edition, Lincoln, MA, Ganga-Jamuna Press
- 3) Craig, D. & Locata Corp., "USAF's New

Reference System, Truth on the Range," Article of Inside GNSS Magazine, May/June 2012

4) J. Wang, "Pseudolite Applications in Positioning and Navigation: Progress and Problems," Journal of Global Positioning Systems, Vol. 1, No. 1, pp.48-56, 2002

5) Kee, C., D. Yun, and H. Jun, "Indoor Navigation System using Asynchronous Pseudolites," Journal of Navigation, Vol 56, No. 2, pp.443-455, 2003

6) So, H., T. Lee, S. Jeon, C. Kim, C. Kee, T. Kim, and S. Lee, "Implementation of a Vector-based Tracking Loop Receiver in a Pseudolite Navigation System," Sensors, Vol. 10, No. 7, pp.6324-6346, 2010

7) Belabbas, B., Petitprez, F. and Hornbostel, A. (2005), "UERE Analysis for Static Single Frequency Positioning Using Data of IGS Stations," Proceedings of ION NTM 2005, January, CA, USA

8) Eleuteri, M., Cretoni, D. and Gotta, M. (2009), "Detailed analysis on Giove-B User

Equivalent Range Error (UERE)," Proceedings of ENC-GNSS 2009, Naples, Italy

9) Kovach, K. (2000), "New User Equivalent Range Error (UERE) Budget for the Modernized Navstar Global Positioning System (GPS)," Proceedings of ION NTM 2000, January, CA, USA

10) Department of Defense (USA), "Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard," 4th Edition, Sep. 2008

11) So, H., Lee, K. Park, Y. Park, J. and Song, K., "Performance Analysis of Pseudolite Tropospheric Delay Models Using Radiosonde Meteorological Data," Journal of the Korean GNSS Society(JKGS) 2(1), pp.49-57, 2013

12) Park, J. and Suk, J., "A Study on the Effects and the Countermeasure of Sea Surface Reflection Waves in Pseudolite Navigation Systems," Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 42(6), pp.505-514, 2014