

## 의사거리 기반 위성 이상 검출 및 식별 기법

### Method for Detection and Identification of Satellite Anomaly Based on Pseudorange

서기열<sup>†</sup> · 박상현 · 장원석 · 김영기

Kiyeol Seo<sup>†</sup>, Sanghyun Park, Wonseok Jang, and Youngki Kim

한국해양연구원 해양안전·방제기술연구부

#### 요 약

현재 운영 중인 위성항법보정시스템(Differential GPS)은 기준국(Reference Station), 감시국(Integrity Monitor), 그리고 제어국(Control Station)으로 구성되어 있다. 기준국(RS)에서는 의사거리 보정정보(Pseudorange Correction)를 계산하고 RTCM 국제표준 메시지를 생성하여 사용자에게 방송한다. 감시국(IM)에서는 기준국으로부터 보정정보를 수신하여 보정정보가 허용치 이내인지를 검사한다. 그리고 제어국(CS)에서는 기준국과 감시국의 기능 및 성능 파라미터 제어, 상태 감시를 수행한다. DGPS 무결성 감시국의 핵심 기능은 보정정보의 검사와 기준국으로 피드백 메시지를 전송하는 것이다. 하지만 무결성 감시를 위한 현재의 알고리즘은 위성 이상이 발생할 경우 그 무결성 기능에 한계가 있다. 그러므로 본 논문에서는 해상 DGPS RSIM을 위한 위성 이상 검출 및 식별기법에 중점을 둔다. 먼저 현재 운영 중인 DGPS RSIM의 기능 분석을 토대로 DGPS RSIM을 위한 무결성 기능의 한계를 분석하고, 다음으로 위성시계 이상을 검출하고 이상위성을 식별하기 위한 기법을 제안한다. 위성이상 검출 및 식별 기법을 실제 위성시계 이상사례에 적용하여 그 실험 결과를 제시한다.

**키워드** : 위성항법시스템, 위성항법보정시스템, 기준국과 감시국, 위성 고장, 식별 및 검출, 의사거리

#### Abstract

Current differential GPS (DGPS) system consists of reference station (RS), integrity monitor (IM), and control station (CS). The RS computes the pseudorange corrections (PRC) and generates the RTCM messages for broadcasting. The IM receives the corrections from the RS broadcasting and verifies that the information is within tolerance. The CS performs realtime system status monitoring and control of the functional and performance parameters. The primary function of a DGPS integrity monitor is to verify the correction information and transmit feedback messages to the reference station. However, the current algorithms for integrity monitoring have the limitations of integrity monitor functions for satellite outage or anomalies. Therefore, this paper focuses on the detection and identification methods of satellite anomalies for maritime DGPS RSIM. Based on the function analysis of current DGPS RSIM, it first addresses the limitation of integrity monitoring functions for DGPS RSIM, and then proposes the detection and identification method of satellite anomalies. In addition, it simulates an actual GPS clock anomaly case using a GPS simulator to analyze the limitations of the integrity monitoring function. It presents the brief test results using the proposed methods for detection and identification of satellite anomalies.

**Key Words** : GNSS, Differential GNSS, RSIM, Satellite anomaly, Detection and Identification, Pseudorange

## 1. 서 론

현재 우리나라 DGPS 기준국은 해양기준국 11개소, 내륙 기준국 6개소, 감시국 17개소로 구성되어 운영되고 있으며

접수일자: 2012년 4월 20일

심사(수정)일자: 2012년 5월 29일

게재확정일자: 2012년 5월 29일

<sup>†</sup> 교신 저자

본 논문은 본 학회 2012년도 춘계학술대회에서 선정된 우수논문입니다.

본 연구는 국토해양부 사업인 "DGNSS 보정서비스 신뢰성 기술개발(PMS2320)" 과제의 지원으로 수행되었습니다.

국제항로표지협회(IALA)의 권고에 따라 사용자에게 실시간 보정서비스를 하고 있다. DGPS 기준국 시스템은 보정 정보를 생성하고 전송하기 위한 기준국(Reference Station)과 보정정보의 무결성을 감시하기 위한 무결성 감시국(Integrity Monitor), 그리고 기준국과 감시국의 제어 및 운영을 위한 제어국(Control Station)으로 구성되어 있다. DGPS 기준국에서는 추적 위성수, 최대 보정치, UDRE(User Differential Range Error), 보정나이, 의사거리 잔차, 절대위치오차의 무결성 감시를 수행하고 있다[1]. 그러나 현재의 운영 중인 기준국 시스템은 무결성 감시를 위한 국제해사기구(IMO)의 강화된 요구성능을 충족시키지 못하고 있는 실정이다. 특히 NANU(Notice Advisory to Navstar Users) 공지 분석 통계를 살펴보면, GPS 위성 이

상 발생 건수가 매년 십여건 이상 발생하고 있으며, 2008년 이후에 감소하고 있는 것으로 보고되고 있지만, DGPS 기준국 차원에서의 적절한 대응이 아직까지 부족한 실정입니다. 이를 보완하기 위한 연구가 필요합니다. DGPS 무결성 감시 기능 개선을 위한 기존 연구는 항공항법을 위한 연구가 주를 이루고 있으며, 해양항법을 위한 무결성 감시 개선을 목적으로 위성이상 발생시 기준국의 무결성 감시 기능의 한계를 분석한 연구가 있었다[3]. 또한 항공분야에서 정의된 무결성 감시 기법을 해양용 DGPS 기준국 무결성 감시에 적용하기 위한 가능성을 제시하였으나 국제표준의 측위정확도 및 무결성 수준을 충족시키는데 대한 성능시험 결과를 제시하지 못하였다. 그러므로 GNSS 서비스 중단 및 고장을 검출하고 그 원인을 식별하여 신뢰할 수 있는 GNSS 측위체계의 확보가 필요하다. 본 논문에서는 위성시계 이상 발생시 DGPS RSIM의 무결성 감시 기능의 한계를 다시 분석하고 그 문제점을 해결하기 위한 방안으로 위성시계 이상 현상 검출 및 식별 기법을 제안하여 적용한 결과를 제시한다. 현재 운영 중인 DGPS 기준국 시스템의 변동 없이 기준국 수신기 특성을 고려한 위성이상신호 검출 및 이상위성 식별 기법을 실제 위성시계 이상발생 사례에 적용하여 시물레이션 기반 성능평가 결과를 제시한다.

## 2. DGPS 기준국 시스템 아키텍처

위성항법보정시스템(DGPS)은 이미 알고 있는 기준점에 기준국용 GPS 수신기를 설치하여 정밀하게 측정된 자신의 위치와 GPS 위성 신호를 받아 수신기로 계산된 위치를 비교하여 오차를 계산한다. DGPS 기준국 시스템은 그림 1에 나타난 것처럼, 기준국(RS), 감시국(IM), 그리고 제어국(CS)으로 구성되고, 사용자에게 보정정보를 송신하기 위한 변조기와 송신기 시스템으로 구성되어 있다[1]. 먼저 기준국 시스템은 의사거리 보정정보(Pseudorange correction)를 계산하여 RTCM 국제표준 포맷에 맞게 변환한 다음, MSK 변조기 및 송신기를 통해 사용자에게 방송한다[2].

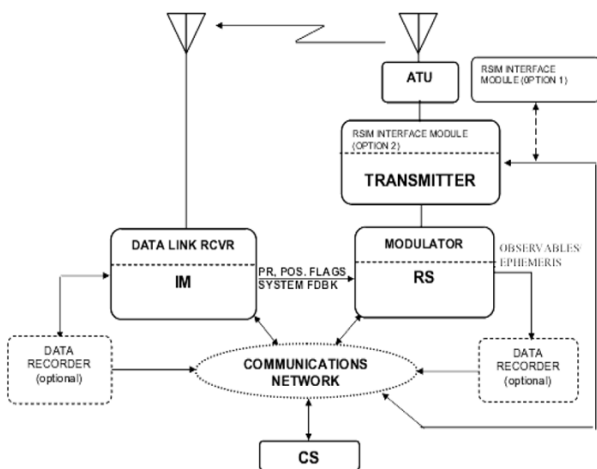


그림 1. DGPS 기준국 아키텍처  
Fig. 1. DGPS RSIM architecture

무결성 감시국(IM)에서는 기준국(RS)에서 보내온 RTCM 정보를 수신하여 보정정보의 무결성을 감시한다. 감시결과를 피드백 메시지를 이용하여 기준국과 제어국에 상시 전송하며, 이상이 발생할 경우 이상플래그를 전달하여 사용자가 해당 보정정보를 사용하지 않도록 조치를 취한다. 그리고 제어국(CS)은 기준국(RS)과 감시국(IM), 송신국의 시스템 상태를 RSIM 국제표준 포맷에 따라 운영제어 및 모니터링 기능을 수행한다.

## 3. 위성 이상 사례 분석

### 3.1 위성 이상 분석

2011년 현재 미국은 32기의 GPS 위성을 운영 중이며, NANU 공지 분석 통계를 살펴보면, GPS 위성 이상 발생 건수가 2000년부터 2007년까지 최소 13건에서 최대 18건까지 발생하고 있으며, 2008년 이후에는 GPS BLOCK II 위성대체 완료로 3~5건으로 위성 이상이 발생하고 있다. 그림 2는 GPS 위성 이상현상 발생 건수를 나타낸다. GPS 위성이상 현상은 위성신호 결합기 결함, 신호 스펙트럼 이상, 송출신호 전력 이상, PRN 코드 이상, 위성시계 이상, 위성의 잘못된 궤도 운행 등을 들 수 있다. 이 중 위성클러크와 궤도 이상이 가장 큰 빈도를 나타내고 있으며, 사용자에게는 의사거리 오차 증가의 원인이 된다.

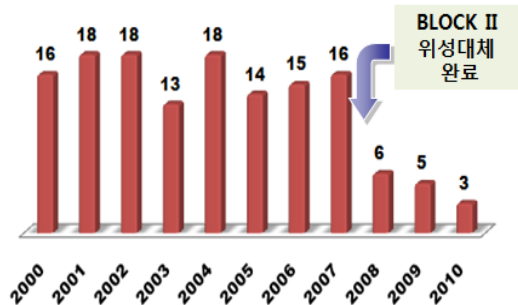


그림 2. GPS 위성 이상현상 발생 건수  
Fig. 2. The number of GPS anomalies

### 3.2 위성시계 이상에 의한 기준국 영향

2004년 1월 1일 PRN 23 위성의 위성시계 고장이 발생하여 기준국의 보정정보 제공 서비스를 할 수 없을 정도의 문제가 발생하였다. 그림 3은 실제 위성시계 이상 사례를 나타낸 것으로 PRN 23 위성시계 이상이 다른 모든 PRN에 영향을 주어 보정정보(PRC) 오차가 크게 증가함을 확인 할 수 있다[3][4]. 위성시계 고장은 18시 30분에 시작하여 21시 18분까지 계속되었다. 기준국에서의 PRC 알람은 고장발생 시점에서 5분 후에 발생하였으나 추적 중인 모든 위성의 PRC 이상으로 기준국 보정서비스가 불가한 상태였다. 21시 18분에 GPS 마스터국에서 해당 PRN 23번의 이상정보를 사용자에게 공지한 후에 기준국의 보정정보 서비스가 정상화 되었다.

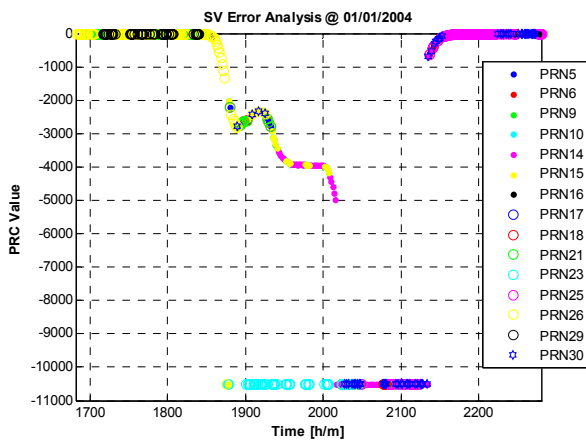


그림 3. 위성시계 이상사례 분석  
Fig. 3. SV error analysis at 01/01/2004

### 4. 무결성 감시 기능 분석

#### 4.1 무결성 감시 프로세스

DGPS 기준국에서 무결성을 감시하는 과정은 그림 4와 같다[2]. 감시국 수신기에서 의사거리 측정정보를 기반으로 기준국으로부터 수신한 의사거리 보정정보(PRC)를 적용한 다음, 보정나이를 계산하고, 기준위치와의 오차비교를 통한 감시, 의사거리 잔차를 통한 감시를 수행한다. 보정정보의 나이와 의사거리 잔차, 그리고 절대위치 오차가 허용치를 벗어나면 피드백 메시지의 플래그에 이상 플래그를 적용하여 기준국과 제어국에 전송한다. 이때 이상 플래그를 지닌 메시지를 수신한 기준국은 보정정보를 생성할 때 해당 위성의 보정정보를 사용하지 말라는 코드를 삽입하여 사용자에게 전송한다.

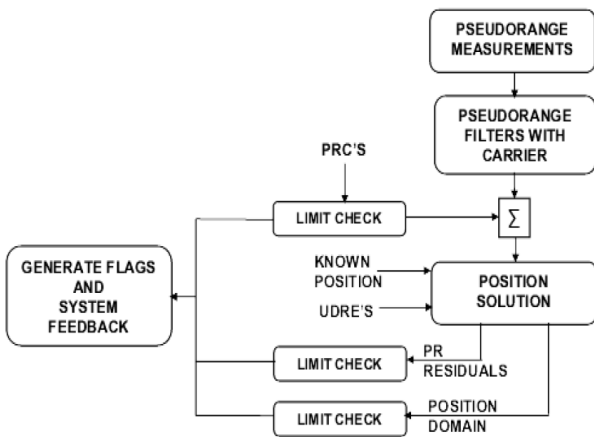


그림 4. 무결성 감시 프로세스  
Fig. 4. Integrity monitor process

무결성 감시를 위하여 DGPS 시스템은 표 1과 같이 최대 의사거리 보정치(PRC), 의사거리 보정치의 변화량(RRC), RSIM 피드백 메시지, UDRE, 보정나이(Correction age),

의사거리 잔차 및 변화율(PR/RR residual), 절대위치 오차 (Position error) 값을 기준으로 무결성 여부를 검사한다.

표 1 무결성 감시 파라미터  
Table 1. Integrity monitor parameters

구분	허용치	대상 시스템
최소 위성수	4개	RS/IM
최대 PRC	100m	RS
최대 RRC	4m/s	RS
IM 피드백 메시지	12s	RS
보정나이	30s	IM
PR 잔차	5m	IM
RR 잔차	0.5m/s	IM
절대 위치 오차	10m	IM

#### 4.2 무결성 감시 기능의 한계 분석

특정 위성(PRN23)의 위성시계 고장이 전체위성에 영향을 주는 이유를 살펴보면, 먼저 위성고장 및 이상이 발생 할 경우 전체 가시위성의 가용성이 저하된다. 특히 DGPS 보정정보 생성시 DGPS 기준국 수신기의 시계 오차성분을 제거하기 위하여 보정정보의 공통오차 성분을 추정하면서 고장위성의 오차를 정상 위성의 오차로 오인한 것이다. 식(1)은 기준국에서 보정정보 생성을 위한 수식을 나타낸다 [3][4]. 수신기 클럭 바이어스 제거 단계에서 공통성분 바이어스 제거를 위한 평균 계산시 문제의 PRN을 포함하여 계산하기 때문이다. 그러므로 이와 같은 문제는 수신기 클럭 바이어스 제거 단계 이전에 이상 PRN을 제거함으로써 해결이 가능하다. 이를 위해서는 보정정보 생성단계에서 이상 위성을 검출하고 식별하여 제거하기 위한 기법이 고려되어야 할 것이다.

$$PRC(k) = PRC^s(k)_{smooth} - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N PRC^j(k)_{smooth} \quad (1)$$

### 5. 위성시계 이상 검출 및 식별 기법

위성시계 이상으로 인한 기준국 무결성 감시 기능의 한계를 극복하기 위하여, 위성시계 이상현상을 검출하고 또한 이상위성을 식별하기 위한 기법을 적용하였다. 먼저 단일 기준국에서의 위성시계 오차 이상현상을 검출 및 식별하기 위하여 다음과 같은 조건을 고려하였다. 위성별 의사거리 원시정보(Pseudorange) 계산은 식 (2)를 이용하였다[5].

$$PR = R + I_d + T_d - c(B - b) + w \quad (2)$$

다음으로 위성으로부터 전달받은 항법메시지 및 이주파 원시정보를 이용하여 다음과 같은 수신시 시계오차 추정 연산식을 이용하였다.

$$g = PR - (R + I_d + T_d - cB) = -cb + w \quad (3)$$

위성시계 이상위성은 1개라고 가정하였으며, 이를 기반으로 위성시계 고장발생 가능지수( $B_{FD}$ )를 이용하여 고장발생 유무를 판정하였다. 그리고 고장발생이 확인되면 위성별 고장식별 지수( $B_{FI}$ )를 이용하여 고장위성을 식별할 수 있도록 구성하였다. 그림 5는 위성이상 검출 및 식별을 위한 순서도를 나타낸다[6].

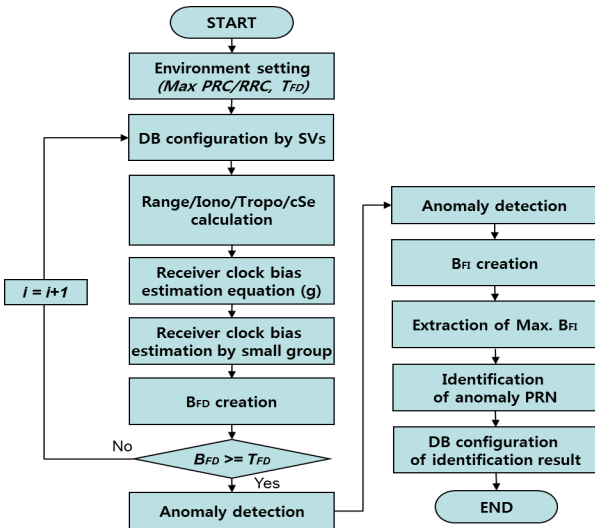


그림 5. 위성이상 검출 및 식별 순서도

Fig. 5. Flowchart for SV anomaly detection and identification

## 6. 시뮬레이션

### 6.1 실험방법

위성시계 이상 검출 및 식별 기법의 성능을 검증하기 위하여, 이상현상 재현 시나리오 생성을 위한 GPS 시뮬레이터(GSS7700), 시뮬레이터와 연동한 위성 수신기(Novatel DL-V3), 소프트웨어 기반 성능검증 플랫폼을 그림 6과 같이 구성하였다[4]. 시뮬레이터 운영 소프트웨어(SimGen)를 통해 위성시계 이상 시나리오를 생성하면 시뮬레이터는 이상신호가 적용된 위성신호를 출력하고, GNSS 수신기의 원시계측정보 출력을 위성시계 이상 검출 및 식별 시스템에서 분석하여 그 성능검증을 수행하였다.

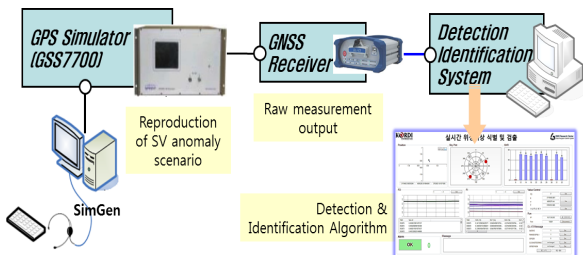


그림 6. 시스템 구성

Fig. 6. Experimental setup

### 6.2 위성시계 이상 재현 시나리오

위성시계 이상현상 검출 및 식별 기법의 성능검증을 위하여 위성시계 이상 시나리오를 생성하였다. 2004년 1월 1일 발생한 PRN 23 위성시계 이상 사례를 분석하여 GPS 시뮬레이터 상에 PRN 23의 의사거리 오차를 재현하였다. 그림 7은 본 실험에서 적용된 사례로서 위성시계 이상에 따른 의사거리 오차를 나타낸 것이다[7].

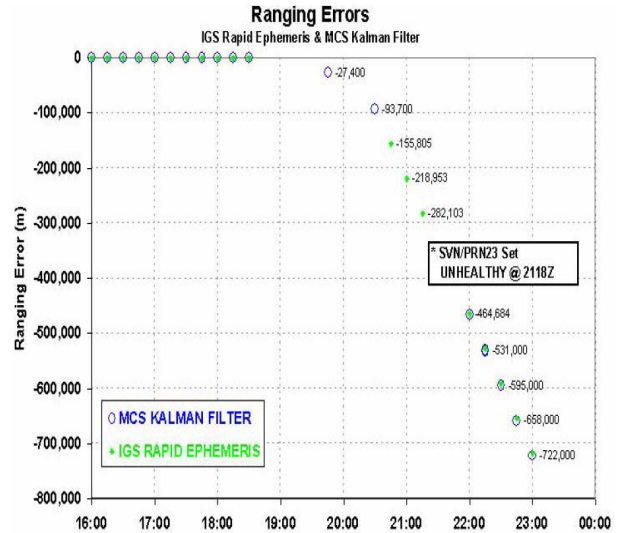


그림 7. 위성시계 이상사례(PRN23)

Fig. 7. Pseudorange error on the PRN 23

### 6.3 실험 결과

GPS 시뮬레이터 상에 PRN 23 위성시계 오차를 부가한 시나리오를 작성하여 GNSS 수신기를 이용하여 측정한 결과는 그림 8과 그림 9에 각각 나타낸다. 시나리오 적용 결과 PRN 23의 오차증가는 의사거리 보정정보(PRC)의 오차를 증가시키고 결론적으로 측위정확도를 감소시킨다는 것을 확인할 수 있다.

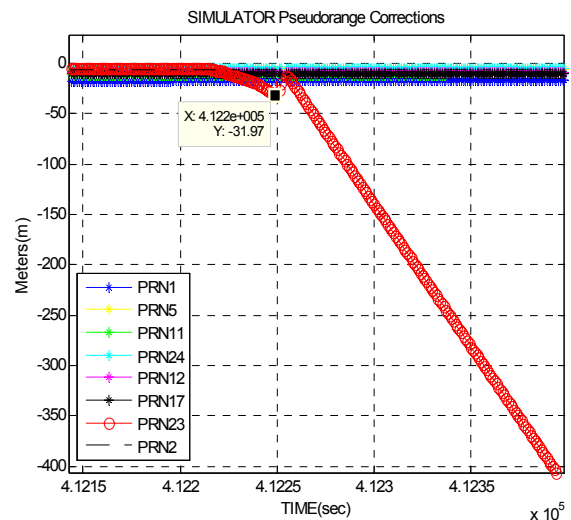


그림 8. 시뮬레이터 상의 보정정보(PRC)

Fig. 8. PRCs of GSS7700 Simulator

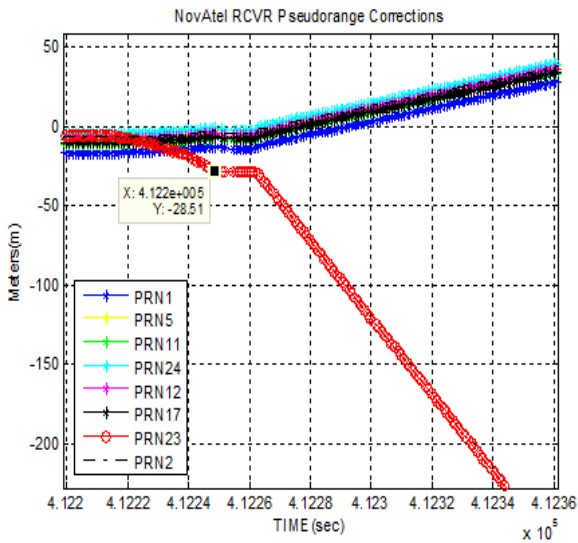


그림 9. 수신기(DL-V3)의 보정정보(PRC) 출력  
Fig. 9. PRC output of DL-V3 receiver

그림 8의 시나리오를 그림 5와 같은 위성시계 이상 검출 및 식별 기법에 적용한 결과를 살펴보면 다음과 같다. 원시정보를 취득한 위성번호 배열을 기반으로 소그룹의 수신기 시계오차 추정을 위한 연산 벡터(G)를 생성하고, 벡터의 평균을 구한다. 그림 10은 추정 연산벡터(G)의 평균 결과를 나타낸다.

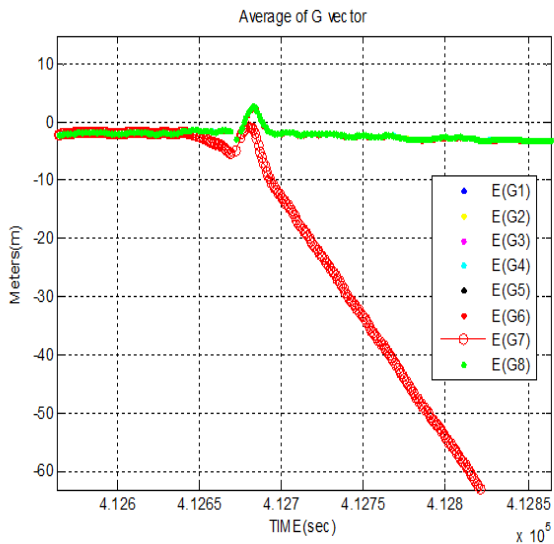


그림 10. 추정연산벡터(G) 평균  
Fig. 10. Average of estimated operation vector(G)

추정 연산벡터의 평균 결과를 기반으로 고장발생지수( $B_{FD}$ )를 생성하여 고장발생지수가 허용치 이상이면 고장이 발생하였음을 알리고, 다시 위성별 고장발생 식별지수( $B_{FI}$ )를 생성하여 해당 그룹 내에서 가장 큰 값을 고장위성으로 판별하도록 하였다. 그림 11은 고장발생 허용치( $T_{FD}$ )가 0.01일 경우의 고장발생지수 결과를 나타내고, 그림 12는 고장발생 식별지수의 결과를 나타낸다.

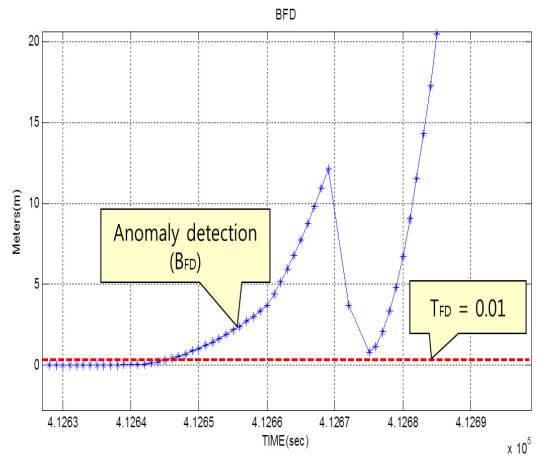


그림 11. 고장발생지수( $B_{FD}$ )  
Fig. 11. Fault detection index ( $B_{FD}$ )

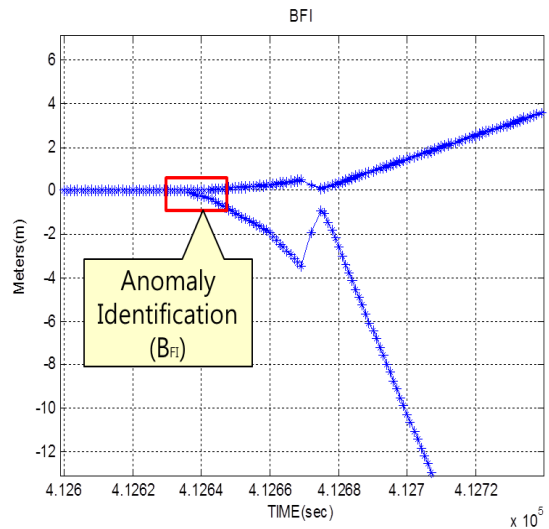


그림 12. 고장식별지수( $B_{FI}$ )  
Fig. 12. Fault identification index ( $B_{FI}$ )

## 7. 결론

본 논문에서는 위성시계 이상현상 발생을 검출하고 식별하기 위한 기법의 성능검증을 위하여, 먼저 해양 DGPS 기준국 시스템의 구성과 기능에 대해 살펴보았고, 위성시계 이상에 따른 DGPS 기준국에 미치는 영향에 대해 분석하였다. GPS 시뮬레이터를 이용하여 실제 PRN 23 위성시계 이상 시나리오를 재현하였고, 이상 재현 시나리오를 적용하여 위성시계 이상 검출 및 식별 기법의 성능검증을 수행하였다. 해당 위성이상 시나리오 상에서 위성신호 이상 판별 및 이상위성 식별이 가능함을 확인하였다. 그러나 실제 기준국 환경에서의 성능검증이 아닌 시뮬레이터 기반의 실험이었으므로 실제 DGPS 기준국 환경을 고려한 이상신호 검출 및 식별 기술로의 확대가 필요하며, 특히 위성신호 이상검출을 위한 최적 임계치의 결정 방법이 추가 고려가 되어야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] Radio Technical Commission for Maritime Services (2006), "RTCM Standard 10401.2 for Differential NAVSTAR GPS Reference Stations and Integrity Monitors (RSIM)," *RTCM Paper 221-2006-SC104-STD*.
- [2] Radio Technical Commission for Maritime Services (2001), "RTCM Recommended Standards for Differential GNSS Version 2.3," *RTCM Paper 136-2001/SC104-STD*.
- [3] K.Y. Seo, S.H. Park, H.C. Jeong, and S.H. Suh, "Analysis on the Limitation of Integrity Monitoring Functions for Maritime DGPS," *Proceedings of International GNSS*, 2009.
- [4] K.Y. Seo and S.H. Park, "Detection and Identification Methods of Satellite Anomalies for Maritime DGPS RSIM," *Proceedings of European Navigation Conference (ENC)*, 2011.
- [5] K.Y. Seo, S.H. Park, W.S. Jang, and S.H. Suh, "Performance Analysis of Software Reference Station and Integrity Monitor for Maritime DGPS," *Proceedings of European Navigation Conference (ENC)*, 2009.
- [6] S.H. Park, K.Y. Seo, D.J. Cho, and S.H. Suh, "AParity Space Approach for Satellite Anomaly Monitoring of Maritime DGPS," *Proceedings of the Institute of Navigation (ION)*, 2011.
- [7] Anne-Laure Vogel, Christophe Macabiau, and Norbert Suard, "Effect of a GPS Anomaly on Different GNSS Receivers," *ION GNSS 18th International Technical Meeting of the Satellite Division*, 13-16 September 2005, LongBeach, CA.

## 저 자 소 개



### 서기열(Kiyeol Seo)

1995년 : 동신대학교 전자공학과 공학사  
 1998년 : 동 대학원 제어계측전공  
 공학석사  
 2003년 : 목포해양대학교 대학원  
 해사정보계측전공 공학박사  
 2006년 ~ 현재 : 한국해양연구원  
 선임연구원

관심분야 : 위성항법보정, 해양전파항법, 지능기법 및 응용  
 Phone : 042-866-3684  
 E-mail : kyseo@kordi.re.kr



### 박상현(Sanghyun Park)

1994년 : 충남대학교 전자공학과 공학사  
 1996년 : 동 대학원 제어전공 공학석사  
 2002년 : 동 대학원 제어전공 공학박사  
 2005년 ~ 현재 : 한국해양연구원  
 선임연구원

관심분야 : 해양전파항법, 정밀측위, 지능기법 및 응용  
 Phone : 042-866-3681  
 E-mail : shpark@kordi.re.kr



### 장원석(Wonseok Jang)

2004년 : 인제대학교 컴퓨터공학과 공학사  
 2012년 : 충남대학교 컴퓨터공학과  
 공학석사  
 2007년 ~ 현재 : 한국해양연구원 연구원

관심분야 : 위성항법보정, 지능제어시스템, 컴퓨터 공학  
 Phone : 042-866-3693  
 E-mail : cws0714@kordi.re.kr



### 김영기(Youngki Kim)

2004년 : 목포해양대학교  
 해상운송시스템학과 공학사  
 2011년 : 목포해양대학교 대학원  
 해양정보시스템학전공 공학석사  
 2011년 ~ 현재 : 한국해양연구원

관심분야 : GNSS, 지능시스템, 해양정보시스템  
 Phone : 042-866-3676  
 E-mail : ykkimkorean@kordi.re.kr