

GPS기반 준실시간 위치추적을 위한 IGS 예측궤도력 이상 검출

Anomaly Detection of IGS Predicted Orbits for Near-Real-Time Positioning Using GPS

하지현*, 허문범*, 남기욱*

Ji-Hyun Ha*, Moon-Beom Heo*, and Gi-Wook Nam*

요 약

IGS(International GNSS Service) 초신속궤도력에 포함된 예측궤도력은 실시간 혹은 준실시간 정밀 항법에 적합한 궤도력이다. 이 논문에서는 예측궤도력에서 발생할 수 있는 궤도 이상 발생 현황을 점검하고, NANU(Current Notice Advisories to NAVSTAR Users)와 IGS 방송궤도력(BRDC, Broadcast Ephemerides)를 이용하여 예측궤도력의 이상 검출 성능을 분석하였다. 그 결과 예측궤도력은 2010년 1년간 93회의 궤도 이상이 나타났으며, NANU를 이용할 경우 88%, NANU와 BRDC를 함께 사용할 경우 95%의 이상 검출이 가능함을 확인할 수 있었다.

Abstract

IGS (International GNSS Service) predicted orbits contained in IGS ultra-rapid orbits is suitable for real-time or near-real-time precise positioning. In this paper, we analyzed orbit anomalies of the IGS predicted orbits and detected the anomalies NANU (Current Notice Advisories to NAVSTAR Users) messages and IGS BRDC (Broadcast Ephemerides). As a results, the orbit anomalies of the predicted orbits were observed 93 times in 2010. In case of using the NANUs, we could get detection performance of 88% about the IGS predicted orbits's anomalies. And we could achieve 95% detection performance when the NANUs and BRDCs were used together.

Key words : GPS, Predicted Orbits, Orbit Anomaly, NANU, Broadcast Ephemerides

I. 서 론

미국의 GPS(Global Positioning System)으로 대표되는 위성항법시스템(GNSS, Global Navigation Satellite System)은 항공, 육상, 해상 등 위치 정보를 필요로 하는 다양한 분야에서 활용되고 있다. 민간항공기의 정밀 이착륙 지원 및 항행 경로 유지, 선박 항해 지원 및 항만 물류 관리, 공공 측지/측량, 그리고 차량용 항법 단말기 등이 대표적인 사례이다. 뿐만 아니라 국방, 경제, 농업 등 사회 전반에 걸쳐 GNSS의 활용

범위가 점차 확대되고 있다. 수요가 증가함에 따라 GNSS 항법 성능 향상에 대한 요구가 끊임없이 제기되고 있다. 대표적인 예로, 차량용 항법장치의 경우 과거에는 차량 주행 시 차로를 유지하는 수준의 정확도로 기능을 충족하였으나, 현재는 차로뿐만 아니라 차선을 구분하기 위한 연구가 진행되고 있다.

GNSS를 이용하여 위치 정보를 산출하기 위해서는 위치를 알고자하는 지점에서 수집된 관측데이터와 위성 궤도력이 필요하며, 분석 과정에서 항법 신호에 존재하는 다양한 오차 요인을 보정함으로써 보다 정

* 한국항공우주연구원 위성항법팀(Satellite Navigation Team, Korea Aerospace Research Institute)

- 제1저자 (First Author) : 하지현
- 투고일자 : 2011년 10월 17일
- 심사(수정)일자 : 2011년 10월 18일 (수정일자 : 2011년 12월 20일)
- 게재일자 : 2011년 12월 30일

확도가 높은 위치정보를 획득할 수 있다. 위성항법 신호의 오차는 위성 궤도력, 시계, 안테나 위상중심 변동 오차, 지구의 이온층과 대류층 등에 의한 신호 교란 오차, 그리고 수신기단의 시계, 안테나 위상 중심 변동 오차 등이 있으며, 이 중 궤도력을 제외한 대부분의 주요 신호 오차는 다양한 모델이 개발되어 있어 보정이 가능하다. 반면, 궤도력의 경우, 일반적으로 궤도력 이상 현상(orbital anomaly)이 발생하지 않는다는 가정 하에 사용하며, IGS(International GNSS Service)에서 제공하는 다양한 궤도력 중 필요한 정확도와 시간을 고려하여 선택하여 사용하고 있다.

GNSS 국제 공동연구의 모체 역할을 하는 IGS에서는 CODE(Center for Orbit Determination in Europe), JPL(Jet Propulsion Laboratory) 등 전 세계에 10곳의 IGS 자료 분석센터(Analysis Center)를 두어 전 세계에 분포한 IGS 상시관측소의 자료를 수집하고 이를 분석하여 최적의 궤도력을 생성하고 있다[3]. GNSS 궤도력은 사용자에게 제공되기까지 소요되는 시간과 궤도 정밀도에 따라 구분되며, 정밀궤도력(Precise Orbits), 신속궤도력(Rapid Orbits), 초신속궤도력(Ultra-Rapid Orbits), 그리고 방송궤도력(Broadcast Ephemerides)으로 총 4 종류로 구분하고 있다. 정밀궤도력은 최종궤도력(final orbits) 혹은 최종정밀궤도력 명명되기도 하며[8], sp3 형식[4]으로 제공된다. 정밀궤도력의 궤도 정밀도는 2.5cm 이하로 다른 궤도력에 비해 가장 높은 정확도를 달성할 수 있다. 그러나 궤도력이 생성되기까지 12일에서 18일 정도가 소요되기 때문에 준실시간, 혹은 실시간 자료 처리에는 부적합하다. 신속궤도력은 관측자료가 수집된 후 17시간 후에 제공되는 궤도력으로, 최종궤도력에 비해 보다 신속한 자료 처리에 이용할 수 있다. 최근 들어 신속궤도력의 궤도 정밀도는 정밀궤도력과 비슷한 수준까지 향상되었다. 신속궤도력은 해당날짜의 전날 21시부터 다음날 3시까지 총 30시간의 궤도력을 포함하고 있으나 하루에 한번 제공되므로 준실시간 응용에는 부적합한 것으로 알려져 있다[8]. 초신속궤도력은 UTC(Universal Time Coordinated)를 기준으로 하루에 4번(03시, 09시, 15시, 21시) 제공되며, 궤도력 생성시간으로부터 과거 24시간에 해당하는 궤도력과 24시간 후까지 추정된 예측궤도력(Predicted Orbits)을 포함하고 있다[3]. 초신속궤도력의 궤도 정밀도는

3cm 수준이며, 예측궤도력은 5cm 수준으로 비교적 정확하다. 따라서 초신속궤도력은 실시간 혹은 준실시간 정밀 항법 응용에 적합하다[8, 9]. 방송궤도력은 GPS 위성으로부터 방송되는 궤도력으로 흔히 항법 메시지(Navigation Message)라고 불린다. 방송궤도력은 GPS 수신 장비만 있으면 전 세계 어디에서든 실시간 수신 가능하기 때문에 실시간 항법 분야에서 널리 사용되고 있다. 방송궤도력은 부관제국(Monitor Station)에서 관측한 위성 추적데이터를 기반으로 주 관제국(Master Control Station)에서 계산되며, 매 8시간 마다 GPS 위성으로 전달된다[8]. 방송궤도력의 궤도 정밀도는 1m 수준으로 GNSS 궤도력 중 가장 낮다. 따라서 실시간 혹은 준실시간 응용분야에서 높은 정밀도 달성을 위해서는 방송궤도력 보다는 초신속궤도력이 비교적 적합하다.

초신속궤도력을 실시간(준실시간) 응용에 사용하기 위해서는 예측궤도력을 이용한다. 이 논문에서는 초신속궤도력에 포함된 예측궤도력을 임의로 URO-P로 표기한다. URO-P는 전세계 IGS 관측망으로부터 매 시간 수집된 관측데이터를 분석하여 각 위성에 대한 향후 24시간 동안의 궤도를 예측한 것이다. 따라서 갑자기 발생할 수 있는 위성 고장이나 유지/보수 상황이 발생하였을 경우 실제 상황을 반영하지 못할 수 있다. 실제로 2008년 1월 30일 PRN 10번 위성이 정상궤도에서 최대 40km 가량 벗어났으며, 이는 수 m 수준의 위치 오차를 유발하였다[9]. 이때 PRN 10번 위성은 유지보수를 위한 정전이 발생하였다. 이와 같이 URO-P는 예기치 못한 상황에서 궤도 이상이 발생할 수 있으며, 따라서 궤도 이상을 신속하게 검출하여 사용자에게 해당 위성 궤도력을 사용 시 주의가 필요함을 알릴 필요가 있다.

이 논문에서는 URO-P의 궤도 이상 검출을 위하여 2010년 1년간의 IGS 정밀궤도력과 URO-P를 이용하여 궤도 이상 발생 현황을 점검하였으며, NANU(Current Notice Advisories to NAVSTAR Users)와 방송궤도력을 이용하여 궤도 이상 검출 성능을 분석하였다. 제 II장에서 URO-P의 궤도 이상 검출 기법을 설명하고, 제 III장에서 검출 성능 분석 결과를 기술하였다. 그리고 제 IV장에서 결론을 맺는다.

II. IGS 예측궤도력 이상 감시 기법

2-1 NANU

NANU는 미공군과 미해양경비대에서 제공하는 GPS 위성의 운영 현황 및 상태에 관한 보고서로서, 군용서비스는 미공군 홈페이지[6]를 통해, 일반 사용자는 미국 해양경비대 홈페이지[5]를 통해 하루에 한번 제공받을 수 있다. NANU는 GPS 위성의 궤도 조정이나 정비를 위한 일시적 운영 정지, 새로운 위성 발사 등에 대한 이벤트 사항에 대한 메시지를 담고 있다.

그림 1에 2011년 1월 1일의 NANU 메시지를 나타

내었다. NANU의 1번 항목에는 GPS 위성의 상태를, 2번 항목에는 해당일로부터 이전 일주일과 이후 일주일 동안 예정된 이벤트 정보가 기록되어 있다. 위성 상태 정보는 운영 중인 위성 번호와 종류, 그리고 궤도면상의 위치를 나타내는 슬롯(slot) 번호와 현재 사용 중인 시계의 종류가 기록되어 있으며, 이벤트 정보는 NANU번호와 해당 위성 번호, 이벤트 종류, 그리고 이벤트 실시 예정 시간이 기록되어 있다. NANU에 기록되는 이벤트 종류는 표 1과 같이 정의된다[5]. 예를 들어, 그림 1의 PRN 24의 경우 2010년 DOY(Day of Year) 362일 22시 정각부터 DOY 363일 11시 정각까지 유지보수를 위한 궤도 조정이 예보된 것이다.

```

GPS OPERATIONAL ADVISORY 001.
SUBJ: GPS STATUS 01 JAN 2011

1. SATELLITES, PLANES, AND CLOCKS (CS=CESIUM RB=RUBIDIUM):
A. BLOCK I : NONE
B. BLOCK II: PRNS 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14
PLANE : SLOT B11, D1, C2, D4, E3, C5, A4, A3, A1, E6, D2, B4, F3,
F1
CLOCK : RB, RB, CS, RB, RB, RB, RB, CS, CS, CS, RB, RB, RB, RB
BLOCK II: PRNS 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28
PLANE : SLOT F2, B1, C4, E4, C3, E1, D3, E2, F4, D21, B2, F21, A6,
B3
CLOCK : RB, RB, RB, RB, RB, RB, RB, RB, RB, CS, RB, RB, CS, RB
BLOCK II: PRNS 29, 30, 31, 32
PLANE : SLOT C1, B21, A2, E5
CLOCK : RB, CS, RB, RB
2. CURRENT ADVISORIES AND FORECASTS :
A. FORECASTS: FOR SEVEN DAYS AFTER EVENT CONCLUDES.
NANU MSG DATE/TIME PRN TYPE SUMMARY (JDAY/ZULU TIME START - STOP)

2010152 152001Z DEC 2010 24 FCSTDV 362/2200-363/2200
2010153 152005Z DEC 2010 06 FCSTMX 006/1600-007/0400
2010156 231746Z DEC 2010 04 FCSTMX 004/1300-005/0100
2010157 290442Z DEC 2010 24 FCSTSUMM 362/2212-363/0424
B. ADVISORIES:
NANU MSG DATE/TIME PRN TYPE SUMMARY (JDAY/ZULU TIME START - STOP)

C. GENERAL:
NANU MSG DATE/TIME PRN TYPE SUMMARY (JDAY/ZULU TIME START - STOP)

2009025 061455Z APR 2009 GENERAL /-/
2010144 271409Z NOV 2010 GENERAL /-/
3. REMARKS:
A. THE POINT OF CONTACT FOR GPS MILITARY OPERATIONAL SUPPORT IS THE GPS
OPERATIONS CENTER AT (719)567-2541 OR DSN 560-2541.
B. CIVILIAN: FOR INFORMATION, CONTACT US COAST GUARD NAVCEN AT
COMMERCIAL (703)313-5900 24 HOURS DAILY AND INTERNET
HTTP://WWW.NAVCEN.USCG.GOV
C. MILITARY SUPPORT WEBPAGES CAN BE FOUND AT THE FOLLOWING
HTTPS://GPS.AFSPC.AF.MIL/GPS OR HTTP://GPS.AFSPC.AF.MIL/GPSOC

This is the GPS Status Message one-way mailing list.

Subscribe/Unsubscribe: http://cgls.uscg.mil/mailman/listinfo/gps

If you would like to report abuse of the CGLS listserv please send an email to: CGLSAdmin@uscg.mil
    
```

그림 1. 2011년 1월 1일의 NANU 메시지
 Fig. 1. NANU message on Jan. 1, 2011

이 논문에서는 NANU 메시지의 2번 항목에 실린 이벤트 정보를 이용하여 URO-P에서 발생할 수 있는 궤도 이상 감시 성능을 분석하였다. 먼저 IGS 정밀궤도력과 URO-P를 비교하여 위성별 궤도력 이상 발생 현황을 분석하였으며, 임의의 위성에서 궤도력 이상이 발생했을 때 해당 날짜의 NANU를 이용하여 이벤트 여부를 점검하였다. 궤도력 이상이 발생한 위성의 이벤트 정보가 NANU 메시지에 기록되어 있는 경우 NANU를 이용한 궤도 이상 점검이 가능한 것으로 판단하였다. 반면, 임의의 위성이 궤도력 이상이 발생하였음에도 불구하고 NANU 메시지에 포함되지 않은 경우 방송궤도력을 이용하여 궤도 이상 검출을 실시하고 성능을 분석하였다. 방송궤도력기반 URO-P 궤도 이상 검출 방법을 다음 절에 기술하였다.

2-2 방송궤도력

방송궤도력은 사용자가 실시간으로 수집하는 것

과 IGS에서 제공하는 것으로 구분할 수 있다. 이 논문에서는 특정 관측소에서 생성된 방송궤도력이 아닌 IGS에서 제공하는 방송궤도력을 이용하였다. IGS 방송궤도력은 일반적으로 BRDC라고 명명된다[8]. BRDC는 IGS 홈페이지를 통해 하루에 한번 제공되며, 운영 중인 모든 GPS 위성에 대하여 케플러 궤도 요소와 섭동 정보 등 등 궤도 보정 계수가 포함되어 있다[2]. IGS BRDC를 실시간(준실시간)으로 사용하기 위해서는 궤도력 기준시각으로부터 위성의 위치를 알고자 하는 시각까지 경과시간을 연산함으로써 위성의 위치를 예측한다. 이 논문에서는 IGS BRDC 기반 예측궤도를 임의로 BRDC-P라고 명명한다. BRDC-P는 시간이 경과함에 따라 오차가 증가하여 00시~06시 사이에는 500m, 06시~12시 사이에는 1km, 12시~자정까지는 1.5km 수준의 오차를 가진다[9]. 이 논문에서는 IGS BRDC를 이용하여 BRDC-P를 생성한 후 해당 시간의 URO-P와 비교함으로써 각 위성별 궤도 이상을 검출하였다. 궤도 이상 검출 시 시간에

표 1. NANU 이벤트 종류

Table 1. NANU event types

메시지 종류	정의
Forecast Outages	
FCSTDV	Forecast Delta-V gives scheduled outage times for Delta-V maneuvers. The satellite is moved during this maintenance and the user may be required to download a new almanac.
FCSTMX	Forecast Maintenance gives scheduled outage times for Ion Pump Operations or software tests.
FCSTEXTD	Forecast Extension extends the scheduled outage time "Until Further Notice"; references the original NANU.
FCSTSUMM	Forecast Summary gives the exact outage times for the scheduled outage including the FCSTEXTD; sent after the maintenance is complete and the satellite is set healthy to users; references the original NANU.
FCSTCANC	Forecast Cancellation cancels a scheduled outage; new maintenance time not yet determined; references the original NANU.
FCSTRESCD	Forecast Rescheduled reschedules a scheduled outage; references the original NANU.
Unscheduled Outages	
UNUSUFN	Unusable Until Further Notice notifies users that a satellite will be Unusable to all users until further notice.
UNUSABLE	or UNUSABLE with a reference NANU closes out an UNUSUFN NANU and gives the exact outage times for the outage; references the UNUSUFN NANU.
UNUNOREF	UNUSABLE with no reference NANU gives times for outages that were resolved before a UNUSUFN NANU could be sent.
Other	
USABINIT	Initially Usable notifies users that a satellite is set healthy for the first time.
LEAPSEC	Leap Second is used to notify users of an impending Leap Second and all data after the subject line is free flowing text.
GENERAL	informs the user of general GPS information and is written using free flowing text.
LAUNCH	is used to notify users of a recent GPS launch.

따른 BRDC-P의 평균 오차를 고려하여 오차 중간값 으로부터 500m 이상의 오차가 발생한 경우에 대하여 궤도 이상이 발생한 것으로 간주하였다.

III. 예측궤도력 이상 검출

3-1 예측궤도력 이상 발생 현황 분석

이 논문에서는 URO-P의 궤도 이상 발생 현황을 분석하고, 이를 바탕으로 NANU와 BRDC-P 기반 궤도 이상 검출 기법의 성능을 분석하였다. URO-P의 이상 발생 현황을 분석을 위하여 2010년 1월 1일부터 12월 31일까지, 1년간 생성된 IGS 정밀궤도력과 URO-P를 이용하였다. 서론에서 기술한 바와 같이 초신속궤도력은 6시간 간격으로 하루에 4번 제공되며, 정밀궤도력은 하루에 1번 제공된다. 따라서 이 논문에서는 정밀궤도력 365개, 초신속궤도력 1,460개를 이용하였으며, 6시간 주기로 구분하여 각 위성별 좌

표를 비교하였다. 일반적으로 예측궤도력은 정밀궤도력에 대하여 평균 5~10cm, 최대 1m 수준의 3차원 좌표 오차를 보이는 것으로 알려져 있다[1,7]. 따라서 이 논문에서는 정밀궤도력을 기준으로 예측궤도력의 위성별 좌표 오차가 1m 이상인 경우를 궤도 이상이 발생한 경우로 간주하였다.

표 2에 2010년, 1년간 발생한 URO-P의 궤도 이상 발생 현황을 나타내었다. 표 2는 날짜(DOY)와 초신속궤도력의 생성 주기(6시간)로 구분하여 궤도 이상이 발생한 위성의 PRN 번호를 나타낸 것이다. 표 2를 보면 궤도 이상이 발생한 위성은 연속적인 이상이 나타나는 경우가 많은 것을 알 수 있다. 이는 위성 궤도 조정이나 유지/보수와 같은 이벤트가 단시간 종료되지 않고 수시간에서 며칠에 걸쳐 이루어 졌기 때문인 것으로 판단된다. 그림 2의 1월 13일(DOY 013)의 NANU 메시지를 보면, PRN 29 위성은 DOY 14일에서 DOY 15일에 걸쳐 FCSTDV 이벤트가 진행되는 것을 볼 수 있다.

표 2. 2010년 기준 PRN 별 IGS 예측궤도력 이상 발생 현황
Table 2. Status of IGS predicted orbits anomalies in 2010

DOY	시간 구분(시)				DOY	시간 구분(시)			
	00	06	12	18		00	06	12	18
013			24	24	239	3	3		
014	24	24		29	254			21	
015	29	29			255	21			
019			30	30	264			19	19
020	30	30			265	19			
033		17	17	17	266	20	20	20	
034	17				267	20			
039				26	270				5
040	26	26			271	5	5		
075				32	273				30
076	32	32			274	30	30		
082				9	287			11	11
099		2	2	2	288	11			
127	9	9	9	9	320			27	27
131			13	13	321	27	27		
132	13	13	13		323		31	31	31
134		22	22	22	344	32	32		
169	25				348	32	32	32	
210			16	16	351		4	4	4
211	16	16			352	4			
215			26	26	356			25	
216	26	26			357	25			
236		14	14	14	362				24
238			3	3	363	24	24	24	

*FORECASTS: FOR SEVEN DAYS AFTER EVENT CONCLUDES.

PRN	START-END(DOY/HHMM)	TYPE
29	014/1830-015/0630	FCSTDV
24	013/1630-014/1630	FCSTDV
24	013/1652-014/0036	FCSTSUMM

그림 2. 2010년 1월 13일(DOY 013)의 NANU 메시지에 실린 GPS 위성 이벤트 정보

Fig. 2. Event messages of GPS satellites in the NANU on Jan. 13, 2010 (DOY 013)

2010년 연간 URO-P의 궤도 이상은 총 93회로 총 48일간 발생하였으며, 이는 연간 생성 주기를 고려하였을 때 6%, 생성일을 고려하였을 때 연간 13% 수준이다. 그림 3에 DOY 034일 00시의 URO-P와 정밀궤도력을 비교한 결과를 나타내었다. 그림 3의 가로축은 시간이며, 세로축은 위성별 좌표 오차로 cm 단위로 나타내었다. 그림 3(a)는 궤도 이상이 발생한 PRN 17번이 포함된 결과이며, 그림 3(b)는 PRN 17번을 제외한 URO-P 좌표 오차를 나타낸 것이다. 그림 3을 보면, DOY 034일 00시 URO-P에 실린 PRN 17 위성은 수 만km 수준의 궤도 이상이 나타났으며, PRN 17

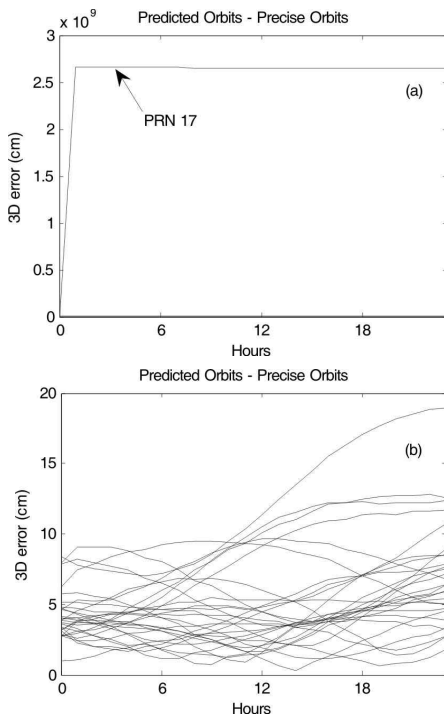


그림 3. 2010년 2월 3일(DOY 034) 00시의 예측궤도력과 정밀궤도력 사이의 3차원 좌표 차이

Fig. 3. 3D differences between IGS predicted orbits (00h) and precise orbits on Feb. 3rd, 2010.

위성을 제외한 나머지 위성은 최대 20cm 이내인 일반적인 오차 범위에서의 오차를 보였다.

이 논문에서는 표 2의 2010년 URO-P의 궤도 이상 발생 현황 결과를 바탕으로 NANU와 BRDC-P를 활용한 궤도 이상 검출 성능을 분석하였다. 3-2절에서 NANU를 이용한 URO-P의 궤도력 이상 성능 분석 결과를, 3-3절에서 BRDC-P를 이용한 성능 분석 결과를 기술하였다.

3-2 NANU 기반 IGS 예측궤도력 이상 검출

이 논문에서는 URO-P의 궤도 이상 검출을 위하여 미해양경비대에서 제공하는 NANU 메시지를 이용하였다. 표 2에 나타난 궤도력 이상 발생 현황에 대한 검출 성능 분석을 위하여 해당 48일 간의 NANU 메시지를 분석하였다. 그 결과 93회 중 82회에 대하여 NANU 예보가 사전에 발표된 것을 확인할 수 있었으며, 이는 전체 궤도 이상 발생 건수 중 88% 수준에 달하는 것이다. 검출이 되지 않은 11건은 궤도 이상이 있음에도 불구하고 NANU에 예보되지 않았거나, 예보된 시간을 초과하여 지속적인 궤도 이상이 발생된 경우이다.

*FORECASTS: FOR SEVEN DAYS AFTER EVENT CONCLUDES.

PRN	START-END(DOY/HHMM)	TYPE
29	014/1830-015/0630	FCSTDV
24	013/1630-014/1630	FCSTDV
24	013/1652-014/0036	FCSTSUMM
30	019/1445-020/0245	FCSTDV
29	014/1837-015/0053	FCSTSUMM
30	019/1455-019/2150	FCSTSUMM
04	026/1400-027/0200	FCSTMX
07	028/0530-028/1730	FCSTMX
04	026/1412-027/0013	FCSTSUMM
07	028/0616-028/1000	FCSTSUMM
17	033/1015-033/2215	FCSTDV
21	035/1800-036/0600	FCSTMX
17	033/1026-033/1656	FCSTSUMM

그림 4. 2010년 2월 3일(DOY 034)의 NANU 메시지에 실린 GPS 위성 이벤트 정보

Fig. 4. Event messages of GPS satellites in the NANU on Feb. 3, 2010 (DOY 034)

그림 4에 DOY 034일의 NANU 메시지를 도식하였다. 그림 4를 보면, 그림 3에 나타난 PRN17번 위성의 궤도 이상에 대한 이벤트 정보가 DOY 033일 10시 15분~22시 15분, DOY 035일 18시~DOY 36일 06시까지 예보되어 있다. 이 기간 동안 실시간(준실시간) 사용자가 이용하게 되는 URO-P는 DOY 033일 00시~18시에 생성되는 궤도력과 DOY 035일의 06시~12시에 생

성되는 궤도력이다. 그러나 PRN 17번은, 그림 3에 나타난 바와 같이 DOY 034일 00시의 궤도력에서도 이상 현상이 나타났으며, 이는 NANU에 예보된 이벤트가 예정된 시간과 달리 이틀에 걸쳐 지속되었음을 의미하는 것이다. 즉, 이와 같이 NANU에 예보된 시간 이외의 이벤트가 발생하거나 NANU에 예보되지 않은 갑작스런 이상 현상이 발생할 경우 NANU 이외의 방법을 이용하여 이상 현상을 검출해야 한다. 이 논문에서는 NANU를 이용했을 때 검출이 불가능한 경우에 대하여 BRDC-P를 이용하여 궤도 이상 검출을 실시하고, 그 성능을 분석하였다.

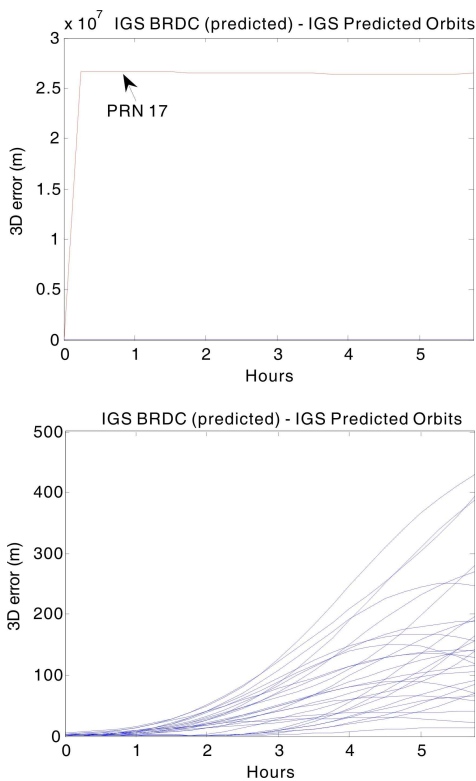


그림 5. 2010년 2월 3일(DOY 034) 00시의 예측궤도력과 BRDC 예측궤도 사이의 3차원 좌표 차이
 Fig. 5. 3D differences between IGS predicted orbits (00h) and BRDC-based predicted orbits on Feb. 3rd, 2010 (DOY 034)

3-3 BRDC 기반 IGS 예측궤도력 이상 검출

이 논문에서는 NANU를 이용하여 궤도 이상이 검출이 되지 않는 11건에 대하여 BRDC-P를 이용하여 이상 검출을 시도하였다. 2절에서 기술한 바와 같이 BRDC-P는 시간이 경과함에 따라 오차가 증가하므로

BRDC-P와 URO-P를 비교하였을 때, 위성별 3차원 좌표 차이가 중간값으로부터 500m 이상 발생한 경우를 궤도 이상으로 간주하였다. 그림 5에 DOY 034일의 00시~06시, 그림 6에 DOY 254일의 12시~18시의 BRDC-P와 URO-P의 위성별 좌표오차를 나타내었다. 그림 5와 그림 6의 가로축은 시간이며, 세로축은 좌표 차이로 m 단위로 나타내었다. 그림 5(a)는 PRN 17번 위성이 포함된 결과이며, 그림 5(b)는 그림 5(a)에서 PRN 17번을 제외한 나머지 위성의 궤도오차를 나타낸 것이다. 그림 5(a)를 보면 정밀궤도력에 대한 URO-P의 궤도 오차(그림 3)와 비슷한 경향을 보임을 알 수 있으며, PRN 17번 위성이 수만 km 수준의 오차가 발생함을 알 수 있다. 그림 5(b)의 PRN 17번을 제외한 나머지 위성의 좌표 차이는 시간이 경과함에 따라 증가하면서 500m 이내에서 오차를 보인다. 그림 6은 그림 5와 달리 모든 위성이 1km 이하의 오차를 보인다. 그러나 PRN 21 위성이 좌표 차이의 중간값에서 500m 이상의 좌표 이상이 발생하였으며, 오류가 발생한 것으로 관측되었다. PRN 21번 위성의 좌표 차이 중간값은 393m, 최대오차 903m이다. 이 시각의 URO-P의 궤도력 오류 발생 현황(표 2)을 살펴 보면 PRN 21번 위성은 DOY 254일 12시에 생성된 URO-P에서 궤도 이상이 발생한 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 BRDC-P를 이용할 경우 수만 km 이상의 궤도력 이상뿐만 아니라 1km 이내의 이상 발생 시에도 검출이 가능함을 확인할 수 있다.

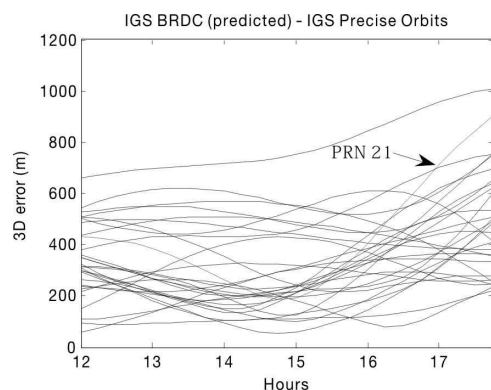


그림 6. 2010년 9월 11일(DOY 254) 12시의 예측궤도력과 BRDC 예측궤도의 3차원 좌표 차이
 Fig. 6. 3D differences between IGS predicted orbits (12h) and BRDC-based predicted orbits on Sep. 11th, 2010 (DOY 254)

표 3에 NANU를 이용할 때 검출되지 않은 11건에 대하여 BRDC-P를 이용한 궤도 이상 검출 결과를 나타내었다. 표 3을 보면, BRDC-P를 이용할 경우 11건 중 6건에 대하여 궤도 이상 검출이 가능한 것을 알 수 있으며, 이는 NANU로 검출이 되는 않는 경우에 대하여 50% 이상의 검출 성능을 보이는 것이다. NANU와 BRDC-P를 동시에 적용할 경우 연간 발생하는 총 궤도 이상 발생 건수(93회)에서 88건을 검출할 수 있는 것이며, 이는 95% 수준의 궤도 이상 검출 성능을 보이는 것이다. BRDC-P를 이용한 경우에도 궤도 이상 검출이 되지 않는 5건에 대하여 최대오차를 표 3에 나타내었다. 5건에 대한 최대 오차를 보면 모두 500m 이내의 좌표 차이를 보였으며, 작게는 40m에서 최대 320m 수준의 오차가 나타났다. 이는 BRDC-P의 오차 범위에 포함되는 수준으로 검출이 되지 않은 것으로 판단된다. 향후 NANU와 BRDC-P를 이용할 경우에도 검출되지 않은 5% 수준의 궤도 이상을 검출하기 위한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

표 3. BRDC 예측궤도를 이용한 IGS 예측궤도력 궤도 이상 검출
Table 3. Anomaly detection of IGS predicted orbits using BRDC-based predicted orbits.

DOY	HR	PRN	검출여부	최대오차(m)
034	00	17	O	
169	00	25	X	42.9
211	06	16	O	
239	06	03	O	
254	12	21	O	
255	00	21	O	
267	00	20	X	129.5
270	18	05	O	
352	00	04	X	180.6
356	12	25	X	321.5
357	00	25	X	157.5

IV. 결 론

이 논문에서는 NANU와 BRDC를 이용하여 IGS 예측궤도력(URO-P)의 궤도 이상 검출 가능성을 확인하고 성능을 분석하였다. 먼저, URO-P의 궤도 이상 발생 현황 점검을 위하여 2010년 1월 1일부터 12월 31일까

지, 1년간 생성된 IGS 정밀궤도력과 URO-P를 서로 비교하였으며, 그 결과 연간 48일간동안 총 93회의 궤도 이상이 발생하였다. 이는 연간 생성되는 예측궤도력 대비 6% 수준이며, 관측일자 대비 13% 수준이다. URO-P의 궤도 이상 검출을 위하여 궤도 이상이 발생한 날의 NANU 메시지를 이용하여 해당 위성의 궤도 조정, 유지보수 등의 이벤트 기록을 점검하였으며, 그 결과 93회 중 82건에 대하여 검출이 가능한 것을 확인할 수 있었다. 즉, NANU를 적용할 경우 URO-P의 궤도 이상 발생을 88% 수준으로 검출 가능한 것이다. 궤도 이상이 검출되지 않은 11건에 대하여 BRDC기반 예측궤도(BRDC-P)를 생성하여 URO-P와 서로 비교하였다. 그 결과, NANU를 이용하였을 때 검출되지 않은 11건 중 6건에 대하여 궤도 이상 검출이 가능하였으며, 이는 NANU만 이용한 경우에 대하여 7% 수준의 검출 성능을 향상시킨 것이다. 따라서 URO-P의 궤도 이상 검출을 위하여 NANU와 BRDC-P를 함께 이용할 경우 95% 수준의 이상 검출이 가능하며, 이는 향후 실시간(준실시간) 위성항법 응용에 있어 URO-P 궤도 이상 발생에 대한 사전 경보시스템 구축에 활용이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 기초기술연구회의 “재난예방 및 국민안전체고를 위한 위성기반 위치추적기술 연구” 과제의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] L. P. Kruse, B. Sierk, T. Springer, and M. Cocard, "GPS-meteorology: Impact of predicted orbits on precipitable water estimates", *Geophysical Research Letters*, Vol. 26, No. 14, pp. 2045-2048, 1999. 7.

[2] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and E. Wasle, *GNSS-Global navigation satellite systems GPS, GLONASS, Galileo and more*, Springer WienNewYork, Strauss GmbH, Mörlenbach, Germany, 516pp., 2008.

- [3] <http://igsbc.jpl.nasa.gov>
- [4] <http://igsbc.jpl.nasa.gov/components/formats.html>
- [5] <http://www.navcen.uscg.gov>
- [6] <http://www.schriever.af.mil/GPS>
- [7] 김혜인, *위성측위 가용성 및 정확도 향상 평가를 위한 통합 GNSS 시뮬레이터 개발*, 석사학위논문, 인하대학교, 103pp. 2009.
- [8] 박관동, 조정호, 하지현, 임형철, “초신속케도력을 이용한 신속한 고정밀 GPS 데이터 처리”, 한국측량학회지, 제 21권, 제 4호, pp. 309-316, 2003. 12.
- [9] 하지현, *준실시간 3차원 수증기 분포도 결정을 위한 고정밀 GPS 자료처리 전략*, 박사학위논문, 인하대학교, 162pp. 2009.

하지현 (河知賢)



2003년 2월 : 충북대학교 천문우주학과(이학사)
 2005년 2월 : 충북대학교/한국천문연구원 천문우주/우주측지전공(이학석사)
 2009년 2월 : 인하대학교 지리정보공학과(공학박사)
 2010년 2월~현재 : 한국항공우주연구원 선임연구원
 관심분야 : GNSS, 위성항법, 정밀항법 등

허문범 (許文範)



1992년 2월 : 경희대학교 기계공학과(공학사)
 1997년 12월 : Illinois Institute of Technology 항공기계공학과(공학석사)
 2004년 12월 : Illinois Institute of Technology 항공기계공학과(공학박사)
 2005년 10월 ~ 현재 : 항공우주연구원 선임연구원
 관심분야 : GNSS, 위성항법, 항행시스템 등

남기욱 (南基旭)



1983년 2월 : 한국항공대학교 항공운항학과(공학사)
 1988년 2월 : 한국항공대학교 항공운항학과(공학석사)
 1996년 6월 : Cranfield Univ. 항공공학과(공학박사)
 1988년 7월 ~ 1989년 7월 : 한국과학기술연구원 연구원
 1989년 8월 ~ 1992년 7월 : 한국항공우주연구원 선임연구원
 1996년 12월 ~ 현재 : 항공우주연구원 책임연구원
 관심분야 : GNSS, 위성항법, 항행시스템 등