

다목적실용위성 5호 궤도정밀도 분석

정옥철*, 정대원**, 김은규***, 윤재철****, 황유라*****

Analysis on the Orbit Accuracy of KOMPSAT-5

Okchul Jung*, Deawon Chung**, Eunkyou Kim***, Jaechoul Yoon****, Yoola Hwang*****

Abstract

This paper describes the orbit accuracy of KOMPSAT-5, which has been in normal operations since the launch on Aug. 22, 2013. The analysis on the various GPS related data and the different methodologies for orbit estimation are carried out and compared with each other. The accuracy of precise orbit is confirmed to be 12.8cm(1 σ) on average using data from the in-flight dual frequency GPS receiver, GPS precise ephemeris, and IGS stations. In addition, the orbit estimation using single frequency GPS receiver provides the orbit solution around 2m level. And, the accuracy of orbit processing is 5m using on-board navigation solution, which has about 10m accuracy.

초 록

본 논문에서는 2013년 8월 22일 발사되어 정상 운영되고 있는 다목적실용위성 5호의 궤도정밀도를 기술하였다. 다목적실용위성 5호의 궤도결정을 위해 사용 가능한 다양한 GPS 자료에 대한 분석을 수행하였고, 궤도자료의 종류 및 처리방식에 따른 궤도정밀도를 비교하였다. 이중 주파수 GPS 수신기에서 제공되는 L1, L2 주파수에 대한 의사시선거리와 반송파 위상, GPS 위성의 정밀궤도력과 IGS 지상국 데이터를 이용하여 궤도결정을 수행한 결과 약 12.8cm(1 σ)의 위치정밀도를 확인하였다. 또한, 단일 주파수 GPS 수신기 데이터를 이용할 경우의 정밀도는 약 2m로 확인되었고, 10미터 수준의 정밀도를 갖는 GPS 항행해만을 이용할 경우, 지상 궤도결정 결과는 5m 수준임을 알 수 있었다.

키워드 : 다목적실용위성 5호(KOMPSAT-5), 궤도 결정(orbit determination), 궤도 관측자료(orbit measurement data), 궤도정밀도 (orbit accuracy), GPS 수신기(GPS receiver)

1. 서 론

국내 최초의 SAR 탑재체 위성인 다목적실용위

성 5호는 2013년 8월 22일 러시아 야스니 발사장에서 드네프르(DNEPR) 발사체에 의해 성공적으로 발사되어, 약 6개월 동안의 초기운행을 마치고

접수일(2014년 9월 15일), 수정일(1차 : 10월 22일),

* 저궤도위성관제팀/ocjung@kari.re.kr

*** 위성운영실/ekkim@kari.re.kr

***** 한국전자통신연구원/ylhwang@etri.re.kr

계재 확정일(2014년 11월 1일)

** 저궤도위성관제팀/dwchung@kari.re.kr

**** 다목적실용위성6호체제팀/yjch@kari.re.kr

임무궤도에서 정상운동을 수행하고 있다. 다목적 실용위성 5호의 임무궤도는 평균 고도 550km, 평균 승교점지방사가 06:00인 태양동기궤도이다. 다목적실용위성 5호는 2개의 GPS 수신기를 탑재하고 있는데, 단일 주파수 GPS 수신기인 TOPSTAR3000은 위성에서 필요한 기준 시각정보와 위치 및 속도정보를 제공하고, 이중 주파수 GPS 수신기인 IGOR(Integrated GPS and Occultation Receiver)는 위성의 부탑재체(Second Payload)로서 위성의 위치 및 속도정보와 더불어 GPS 전파암폐(Radio Occultation) 정보를 제공한다[1]. TOPSTAR3000 모델의 경우, 다목적실용위성 2호와 3호에서 사용되어 정밀도를 확인한 바 있으며[2,3], IGOR은 독일의 GRACE 위성 등에 탑재된 Blackjack 수신기의 후속 모델로 알려져 있다[4]. 지상국에서는 위성을 운영하는데 필요한 궤도정보를 제공해야 하는데, 이를 위해 궤도 관측자료를 토대로 궤도결정, 궤도예측, 궤도데이터 배포 등의 일련의 작업을 수행한다. 특히 궤도결정은 관측자료의 형태 및 요구정밀도에 따라 다양한 형태로 처리 가능하다. 예를 들어, 안테나 운영에 필요한 궤도정보는 수 킬로미터 수준의 궤도정보도 허용 가능하지만, 촬영계획이나 임무계획을 위해서는 하루 수백 미터 미만의 궤도예측 데이터를 제공해야 한다. 또한, 획득된 위성 영상을 정밀하게 처리하기 위해서는 수십 센티미터의 궤도정보가 필요하다. 다목적실용위성 5호의 위치 정밀도 요구사항은 이중 주파수 GPS 수신기 데이터를 이용할 경우 20cm (1σ)를 만족해야 한다.

본 논문에서는 다목적실용위성 5호의 다양한 관측자료에 대한 분석을 토대로 처리방식에 따른 궤도 정밀도를 살펴보았다. 첫째, 동일 구간에 대하여 각 수신기의 GPS 위성 추적 특성을 비교하였다. 둘째, 이중 주파수 수신기의 원시 데이터와 GPS 위성의 정밀궤도력(Precise Ephemeris), 그리고 세계 각지에 분포된 IGS(International GNSS Service) 지상국 데이터를 이용하여 일괄처리기법을 적용한 정밀 궤도결정(Precise Orbit Determination)을 통해 다목적실용위성 5호의 궤도정밀도를 확인하였다. 셋째, 정밀궤도결정 결과 데이터를 기준 정보로 이용하여 다른 궤도정보 간의 차이를 살펴보았다.

2. 본 론

2.1 수신기별 GPS 위성 추적 특성

다목적실용위성 5호는 두 개의 GPS 수신기를 탑재하고 있으며 두 수신기 모두 위성의 천정(Zenith) 방향에 장착되어 있다. GPS 수신기의 성능은 여러 가지 인자로 표현되는데, GPS 위성을 추적하는 특성도 성능지수 중의 하나이다. 단일 주파수 GPS 수신기는 최대 8개의 GPS 위성을 동시에 추적이 가능[5]한데 비해, 이중 주파수 GPS 수신기는 최대 12개의 GPS 위성을 동시 추적 가능(운영 상 10개로 제한)하다[6]. 이를 확인하기 위해 2013년 12월 23일부터 25일까지 3일간 동일 구간에 대하여 두 GPS 수신기가 추적하는 GPS 위성의 개수를 원격측정데이터(Telemetry)를 확인하여 그림 1과 2에 각각 나타내었다.

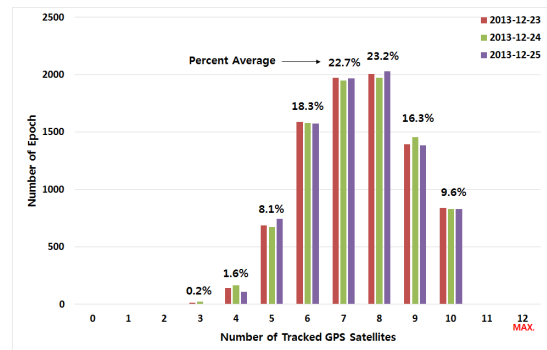


그림 1. 이중 주파수 GPS 수신기의 추적 특성

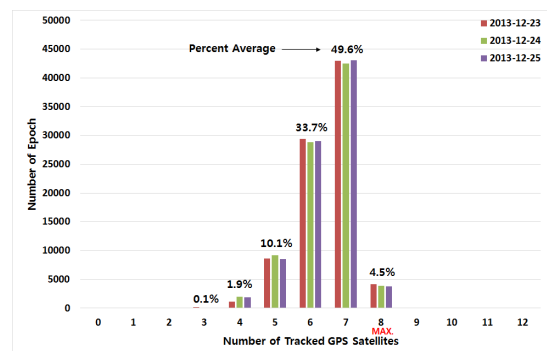


그림 2. 단일 주파수 GPS 수신기의 추적 특성

그림 1과 2에서 Y축에 나타난 Number of Epoch는 원격측정데이터의 샘플 개수로, 단일 주파수 GPS 수신기와 이중 주파수 GPS 수신기의 출력 주기가 각각 1Hz, 0.1Hz로 서로 달라 값에 차이가 있다. 그림의 안쪽에 나타난 숫자는 하루 총 데이터 샘플을 기준으로 해당 샘플의 비율을 구한 후 3일에 대한 평균값을 나타낸 것이다. 그림을 통해 이중 주파수 GPS 수신기의 경우에는 전체 구간의 98.3%가 GPS 위성을 5개 이상 추적함을 알 수 있고, 단일 주파수 GPS 수신기의 경우에는 97.9%가 5개 이상을 추적하고 있다.

2.2 정밀궤도결정

본 절에서는 이중 주파수 GPS 수신기를 이용한 정밀궤도결정 방식을 기술하였다. 정밀궤도결정을 위한 입력 데이터로는 세 가지가 필요한데, 첫째 이중 주파수 GPS 수신기에서는 L1 및 L2 주파수에 대하여 의사시선거리(pseudo-range)와 반송파 위상(carrier phase)을 10초마다 제공해준다. 둘째, GPS 위성의 정밀 궤도력은 표 1에 나타난 IGS에서 제공하는 궤도 중에서 요구 정밀도 및 데이터 제공시점[7]을 고려하여 하나를 선택할 수 있는데, 본 논문에서는 가장 정밀도가 높은 Final Product를 사용하였다. 셋째, 다목적 실용위성 5호가 수신한 GPS 위성의 신호를 이중 차분(Double Difference)를 적용할 수 있도록 세계 각지에 분포된 IGS 지상국에서 수신한 GPS 데이터가 필요하다. 이 때, IGS 지상국은 데이터 가용도 및 기하학적 배치 형상을 고려하여 그림 3과 같이 20개를 선정하였다.

표 1. Product Table of GPS Satellite Ephemerides

GPS 궤도 데이터 종류	정확도 (cm)	데이터 지연시간	제공시점 (UTC)
Broadcast	~100	실시간	실시간
Ultra-Rapid	~3	3-9시간	하루 4회 03,09,15,21시
Rapid	~2.5	17-41시간	하루 1회 17시
Final	~2.5	12-18일	매주 목요일

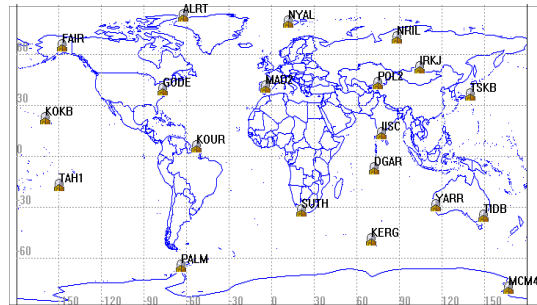


그림 3. 정밀궤도결정에서 고려한 IGS 지상국

정밀궤도결정은 NASA GSFC(Goddard Space Flight Center)의 GEODYN 기반의 상용 소프트웨어인 MicroCosm[8]을 이용하였고, 입출력 및 데이터 포맷 변환, 정밀궤도결정 실행절차 정의는 Matlab[9]을 이용하여 프로그램을 작성하였다. MicroCosm은 베이시안 최소 자승법(Bayesian Least Square) 방식과 코웰(Cowell) 수치적분기법을 이용하여 위성의 위치 및 속도정보를 추정한다. 이에 비해 Matlab 코드는 윈도우즈 운영체제에서 총 14단계로 구성된 전체 프로그램의 실행을 관장하면서, 필요에 따라 궤도결정 주 엔진 역할을 담당하는 MicroCosm의 기능을 호출하여 사용하는 구조이다. 각 단계에 따른 실행내역은 다음과 같고, 정밀궤도결정에 사용한 교란력 및 파라미터 정보는 표 2와 같다.

- 1 단계: GPS 위성의 초기정보 획득
 - GPS broadcasting orbit으로부터 초기 궤도 정보를 획득
- 2 단계: GPS 위성의 궤도정보 포맷 변환(A)
 - GPS final product 파일을 읽어 궤도데이터 처리가 가능한 포맷(아스키)으로 변환
- 3 단계: GPS 위성의 궤도정보 포맷 변환(B)
 - 이전 2 단계에서 생성된 아스키 파일을 바이너리 파일로 변환하여 관측자료로 저장
- 4 단계: GPS 위성의 정밀 궤적 생성
 - 이전 3 단계에서 저장된 관측자료(원본파일: final product)를 이용하여 GPS 위성의 정밀 궤적 생성
- 5 단계: IGS 지상국 데이터 시각 보정

- IGS 지상국 데이터 시각 보정 및 안테나 오프셋 값 적용
- 6 단계: IGS 지상국간의 이중차분 수행
 - 이전 5 단계에서 보정된 IGS 지상국 데이터를 이용하여 반송파 위상에 대한 이중차분(DD) 계산 (아래 식 1 참고)

$$DD=[(S1-T1)-(S2-T1)]-[(S1-T2)-(S2-T2)] \quad (1)$$

where S:GPS Satellite, T:IGS tracking station

- 7 단계: 대류층 굴절 지연 바이어스 추정
 - 이전 4 단계에서 생성된 GPS 위성의 정밀 궤적과 이전 6 단계에서 계산된 이중차분 값을 이용하여 대류층 굴절 지연에 대한 바이어스 추정
- 8 단계: 다목적실용위성 궤도정보 변환(A)
 - 다목적실용위성에 탑재된 GPS 수신기의 항행해(Navigation Solution)를 처리 가능한 포맷(아스키)으로 변환
- 9 단계: 다목적실용위성 궤도정보 변환(B)
 - 이전 8 단계에서 생성된 아스키 파일을 바이너리 파일로 변환하여 관측자료로 저장
- 10 단계: 다목적실용위성 예비 궤적 생성
 - 다목적실용위성 GPS 수신기 항행해를 이용하여 궤도를 추정후 예비 궤적 생성
- 11 단계: 다목적실용위성 데이터 시각 보정
 - 다목적실용위성의 GPS 원시데이터를 이용하여 시각 보정 수행
- 12 단계: 다목적실용위성과 IGS 지상국 간의 이중차분 수행
 - 이전 11 단계에서 보정된 다목적실용위성 GPS 원시데이터와 IGS 지상국 데이터(5 단계)를 이용하여 반송파 위상에 대한 이중차분 계산
- 13 단계: 다목적실용위성 정밀궤도결정
 - 이전 4, 7, 11 단계의 정보를 이용하여 다목적실용위성에 대한 정밀궤도결정
- 14 단계: 정밀궤도결정 품질 평가
 - 정밀궤도결정을 통해 얻은 잔차(Residual)의 RMS 확인 및 중첩법(Overlapping Method)을 이용한 궤도 정밀도 평가

표 2. Information on Perturbations and Parameters

Categories	Description
Geo-potential	GGM03 (180x180)
Atmospheric Density	Jacchia 1971
Third Body Attraction	Sun/Moon, 7 Planets
Solar Radiation Pressure	Box-wing model
Reference Coordinate	True of Date (TOD)
Ground Coordinate	ITRF2008
Earth Orientation	IERS Bulletin
Spacecraft Mass	1,300 kg
Cross Sectional Area	5.1 m ²

2.3 정밀궤도결정 검증

정밀궤도결정 결과의 정밀도를 판단하는 방법은 아래와 같이 크게 5가지로 구분된다[10].

- 1) GPS residuals
 - : 관측자료와 계산 값의 차이 확인
- 2) Overlap Analysis
 - : 일부 구간이 중첩되는 두 개의 독립된 시점의 데이터로 궤도를 결정하여 서로 비교
- 3) Comparisons with respect to Science Orbit
 - : 최종 정밀궤도정보와 비교
- 4) SLR Residuals
 - : 센티미터 수준의 정밀도를 갖는 것으로 알려진 SLR(Satellite Laser Ranging) 값과 비교
- 5) Inter-Agency comparison
 - : 동일한 입력데이터로 서로 다른 기관에서 서로 다른 툴을 이용하여 궤도를 결정하여 비교

상기 방식들 중에서 본 논문에서는 중첩법과 기관 간 비교분석을 통해 궤도 정밀도를 확인하였다. 2014년 5월 1일부터 7월 31일까지 총 93일간의 데이터를 매일 30시간(2일전 18시부터 당일 00시까지) 분량을 처리하여 중첩구간(4시간)에 대한 궤도를 서로 비교하였다. 그림 4는 두 궤도의 차이를 반경방향(Radial), 진행방향(In-track), 수직방향(Cross-track), 3차원 거리방향(Range)에 대하여 각각 나타낸 것이다. 표 3은 각 방향에 대한 RMS를 월 평균값으로 환산하여 정리하였다.

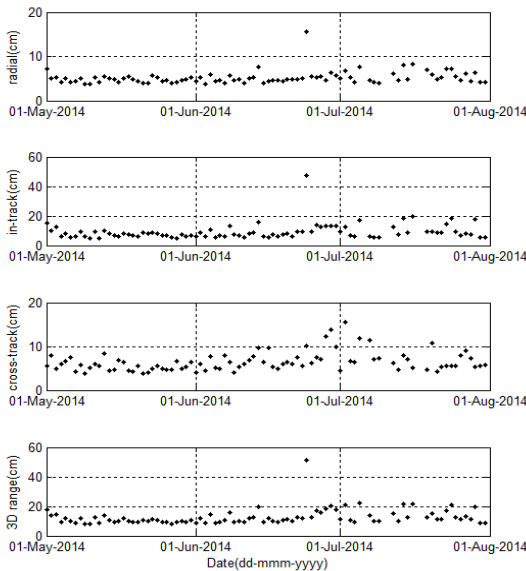


그림 4. 중첩법을 이용한 궤도결정 정밀도

표 3. Average of Position RMS using Overlapping Method

Date	R(cm)	I(cm)	C(cm)	Range(cm)
May, 2014	4.772	7.625	5.472	10.627
June, 2014	5.336	10.098	7.026	13.662
July, 2014	5.630	10.220	7.095	14.010

(Note) R: Radial, I: In-track, C: Cross-track

그림 4와 표 3에서 알 수 있듯이 다목적실용 위성 5호의 이중 주파수 GPS 수신기 정보를 이용하여 궤도결정을 수행한 후 중첩법으로 평가한 결과, 평균 12.766cm(3D range 방향)의 궤도 정밀도를 확보할 수 있었다. 20cm를 초과하는 경우는 6회이고 재처리가 필요한 경우는 4회로, 이를 제외한 83회가 20cm 미만의 정밀도를 나타내고 있는데 이는 3개월 전체 93회(일) 중 89%에 해당하므로, 당초 요구되는 궤도정밀도 20cm(1 σ , 68.3%)를 만족함을 확인할 수 있다. 20cm를 초과하거나 프로그램 실행 과정에서 오류가 발생하여 재처리가 필요한 경우, IGS 지상국 추가 또는 파라미터 변경 등의 작업을 수행할 예정이다.

중첩법과는 별개로 서로 다른 기관에서 서로 다른 툴을 이용하여 궤도를 결정한 후 비교하는 방식으로 정밀도를 확인하기 위해 비행역학서브시스템(FDS, Flight Dynamics Subsystem)에서 계산된 궤도[11]와 MicroCosm(MC)에서 계산한 궤도와와의 차이의 RMS를 표 4(2013년 12월 23일)와 표 5(2013년 12월 24일)에 각각 나타내었다. 중첩법을 적용한 결과는 비행역학서브시스템이 조금 더 큰 값을 나타내고 있으며, 두 궤도의 차이는 약 30cm 수준이다. 이러한 차이는 궤도 모델링 및 파라미터, 추정방식에 기인한 것으로 두 궤도 중에서 어느 결과가 실제 궤도에 더 근접한지에 대해서는 수 센티미터 수준의 정밀도를 갖는 것으로 알려진 SLR 값과 비교를 통해 확인할 예정이다. 또한, 두 개의 정밀궤도결정 소프트웨어에서 적용하고 있는 모델링 방식이나 파라미터 변경 등을 통해 추가 비교 분석이 필요하다.

표 4. 서로 다른 툴을 이용한 궤도차이-1 (2013년 12월 23일)

Method	Overlapping		Ephemeris Difference
	FDS	MC	
Radial(cm)	6.49	3.98	10.70
In-track(cm)	19.75	5.52	25.55
Cross-track(cm)	4.44	3.93	14.60
3D Range(cm)	21.26	7.85	31.32

표 5. 서로 다른 툴을 이용한 궤도차이-1 (2013년 12월 24일)

Method	Overlapping		Ephemeris Difference
	FDS	MC	
Radial(cm)	6.51	3.91	17.93
In-track(cm)	22.81	4.84	35.47
Cross-track(cm)	5.13	5.49	13.28
3D Range(cm)	24.27	8.29	41.90

2.4 궤도 데이터 종류에 따른 정밀도 확인

앞 절에서 살펴본 바와 같이, 이중 주파수 GPS 수신기를 이용하여 궤도결정을 수행할 경우

20cm 미만의 정밀도를 얻을 수 있었으므로, 실제 궤도에 가까운 기준 궤도로 간주할 수 있다. 본 절에서는 다른 형태의 관측자료를 이용하여 얻을 수 있는 여러 가지 궤도 데이터와 앞 절에서 구한 기준궤도의 차이를 비교하여, 관측자료 종류 및 처리방식에 따른 정밀도를 확인하였다.

첫째, 2.3절에서 적용한 처리 로직을 그대로 사용하되, 관측자료로 이중 주파수 GPS 수신기 데이터 대신에 단일 주파수 GPS 수신기를 사용했을 때의 결과를 구한 후 기준 궤도와와의 차이를 확인하였다. 표 6은 2014년 7월 29일부터 31일까지 하루에 대한 두 궤도의 차이를 나타낸 것이다. 20cm 정밀도를 갖는 기준 궤도와와의 차이가 약 1.5m 수준임을 볼 때, 단일 주파수 GPS 수신기 데이터(L1 주파수에 대한 의사시선거리와 반송파 위상)를 이용할 경우 위치 정밀도는 2m 수준임을 알 수 있다.

둘째, 단일 주파수 GPS 수신기에서 제공하는 항행해(Navigation Solution)를 관측자료로 이용하고, 지구비대칭중력장, 대기항력, 태양과 달의 인력, 태양복사압을 고려한 동역학 모델을 이용하여 상대적으로 간단한 형태의 궤도결정을 수행한 결과와 기준 궤도를 비교하였다. 여기서 항행해란 우주 공간상의 GPS 수신기 레벨에서 실시간으로 추정된 위성의 위치 및 속도이다. 비교 결과는 표 7에 나타내었는데, 2014년 7월 29일의 경우 약 5미터까지 차이가 있었다. 이는 관측자료가 가지고 있는 부정확성과 간단한 형태의 궤도결정 처리 로직, 그리고 갑작스런 우주환경 변화 등에 기인한 것으로 판단된다. 따라서 간단한 형태의 궤도결정은 처리시간이 짧은 이득은 있으나, 정밀도는 저하된다고 할 수 있다.

셋째, 단일 주파수 GPS 수신기에서 제공하는 항행해(Navigation Solution)와 기준 궤도를 비교하였다. 즉, 우주공간 상에서 추정된 궤도와 지상에서 후처리를 통해 추정된 궤도를 서로 비교한 것으로, 그 결과는 그림 5에 나타내었다. GPS 항행해는 2014년 7월 29일에 대한 원격측정데이터를 이용하였고, 데이터 간격은 4초로 하루 21,600개의 샘플이 존재한다. 그림 5에서 알 수 있듯이 대부분의 샘플이 $\pm 10\text{m}$ 이내의 값을 나타내고 있

지만 2,592개의 샘플은 크기가 10m를 초과하였다. 이는 전체 샘플 수(21,600)에서 12%에 해당하는 값으로, 나머지 88%는 위치 정밀도 10m 이내에 있으므로 GPS 수신기의 요구조건인 10m (1σ)를 충분히 만족하는 것으로 판단된다.

표 6. 단일 주파수 GPS 데이터 사용 시 결과 비교(RMS)

Date(2014년)	7월 29일	7월 30일	7월 31일
Radial(m)	0.55	0.64	0.53
In-track(m)	0.97	1.21	1.16
Cross-track(m)	0.59	0.56	0.58
3D Range(m)	1.26	1.48	1.40

표 7. 간단한 형태의 궤도결정 로직 적용 시 결과 비교(RMS)

Date(2014년)	7월 29일	7월 30일	7월 31일
Radial(m)	0.31	0.19	0.33
In-track(m)	5.26	1.49	1.31
Cross-track(m)	0.54	0.46	0.49
3D Range(m)	5.30	1.57	1.44

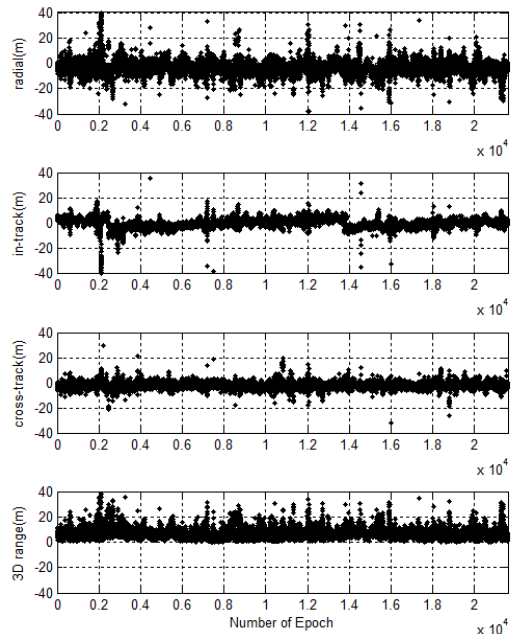


그림 5. GPS 항행해의 궤도 정밀도

3. 결 론

본 논문에서는 다목적실용위성 5호의 다양한 관측자료에 대한 분석을 토대로 처리방식에 따른 궤도 정밀도를 살펴보았다. 동일 구간에 대하여 단일 주파수 GPS 수신기는 97.9%가 이중 주파수 GPS 수신기는 98.3%가 GPS 위성을 5개 이상 추적함을 확인하였다. 이중 주파수 수신기에서 제공되는 10초 간격의 L1 및 L2 주파수에 대한 의사선거리와 반송파 위상을 관측자료로 이용하고, GPS 위성의 정밀궤도력과 IGS 지상국 데이터를 정밀궤도결정을 수행하여 중첩법을 통해 궤도 정밀도를 살펴보았다. 2014년 5월 1일부터 7월 31일까지 총 93일간의 처리한 결과를 확인한 결과, 평균 12.766cm (1 σ , 3D range 방향)의 궤도 정밀도를 확보할 수 있었다. 20cm 미만의 정밀도를 갖는 궤도정보를 기준으로, 다른 형태의 관측자료를 이용하여 얻을 수 있는 여러 가지 궤도 데이터를 비교하여 궤도 데이터 종류에 따른 정밀도를 확인하였다. 단일 주파수 수신기의 의사선거리와 반송파 위상 데이터를 이용할 경우 위치 정밀도는 2m 수준이었고, 항행해를 관측자료로 이용하여 간단한 형태의 궤도결정을 수행할 경우에는 약 5m 수준까지도 커지게 됨을 알 수 있었다. 마지막으로 항행해 자체의 정밀도는 하루 구간 중에서 88%의 데이터가 위치 정밀도 10m 이내를 만족하였다. 향후 연구로는 SLR 데이터와 정밀궤도결정 값의 상호 비교, 모델링 및 파라미터 분석에 따른 궤도결정 결과 변화, IGS 지상국 개수 및 배치에 따른 정밀도 변화 등을 살펴볼 예정이다. 또한, IGS에서 제공하는 궤도 중에서 요구 정밀도 및 데이터 제공시점을 고려하여 가장 빠른 시점에 요구되는 정밀도를 만족시킬 수 있는 방안 등을 분석할 계획이다.

참 고 문 헌

1. 이우경, 정종균, 조성기, 박종욱, 조정호, 윤재철, 이진호, 천용식, 이상률, "아리랑위성 5호의 GPS 전파 엄폐 자료처리시스템 개발을 위한 전리층 전자밀도 산출", 한국우주과학회지 제24권 제4호. 2007.
2. 김해동, 정옥철, 김은규, "아리랑위성 2호 초기 운용 및 임무기간 중 궤도 분석", 한국항공우주학회지 제38권 제9호, 2010.
3. 정옥철, 임현정, 정대원, 김은규, 김학정, "다목적실용위성 3호 발사 후 초기 궤도 운영결과 분석", 한국항공우주학회지 제 41권 4호, 2013.
4. O. Montenbruck, et al., "Precise Orbit Determination for the Terrasar-X Mission", Proceedings of 19th International Symposium on Space Flight Dynamics, 2006
5. KOMPSAT-5 GPS Receiver Operation Manual, Thales Alenia Space, 2008.
6. KOMPSAT-5 Spacecraft Bus Operation Handbook, KARI, 2013.
7. <http://www.igs.org/products>
8. MicroCosm(v.2013) Operations Description Document, Van Martin Systems, 2013.
9. <http://www.mathworks.com>
10. Martin Wermuth, et al., "Terrasar-X Rapid and Precise Orbit Determination", Proc. of 21st International Symposium on Space Flight Dynamics, 2009.
11. Yoola Hwang, Byoung-Sun Lee, Young-Rok Kim, Kyoung-Min Roh, Okchul Jung, Haedong Kim, "GPS-Based Orbit Determination for KOMPSAT-5 Satellite", ETRI Journal, Vol. 33, Issue 4, 2011