

레이저 거리측정(SLR) 데이터를 사용한 GPS 기반 정밀궤도결정 시스템 결과의 검증

김영록¹, 박은서¹, 박상영^{1†}, 최규홍¹, 황유라², 김해연², 이병선², 김재훈²
¹연세대학교 천문우주학과 우주비행제어 연구실
²한국전자통신연구원 위성관제·항법연구팀

Validation of GPS Based Precise Orbits Using SLR Observations

Young-Rok Kim¹, Eunseo Park¹, Sang-Young Park^{1†}, Kyu-Hong Choi¹,
Yoola Hwang², Hae-Yeon Kim², Byoung-Sun Lee², and Jaehoon Kim²
¹Astrodynamics & Control Lab, Dept. of Astronomy, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea
²Electronics and Telecommunications Research Institute, Daejeon 305-350, Korea
E-mail: spark@galaxy.yonsei.ac.kr

(Received February 6, 2009; Accepted February 18, 2009)

요 약

이 연구에서는 SLR(Satellite Laser Ranging) NP(Normal Point) 데이터를 이용하는 인공위성 정밀궤도결정 시스템 YLPODS(Yonsei Laser-ranging Precision Orbit Determination System)를 개발하였다. 먼저, 개발된 YLPODS의 성능 검증을 위해서 저궤도 위성인 TOPEX/POSEIDON과 CHAMP의 SLR NP 데이터를 사용한 궤도결정 시험을 수행하였다. JPL에서 배포하는 정밀궤도력을 참값으로 가정하고, 거리측정잔차(range residual)의 RMS(Root Mean Square) 및 결정된 궤도의 반경(radial), 진행(along-track), 교차(cross-track) 방향 오차를 확인하였다. 그리고 거리측정잔차 확인을 통해 검증된 YLPODS의 거리계산 정밀도와 SLR NP 데이터의 높은 거리측정 정밀도를 이용하여, 관측된 값(O)과 계산된 값(C)을 비교하는 방법으로 GPS(Global Positioning System) 데이터를 이용하는 GPS 기반 POD 시스템 결과의 정밀도 검증을 수행하였다. 검증을 위한 GPS 기반 POD 시스템 결과는 YGPODS(Yonsei GPS-based Precision Orbit Determination System)의 TOPEX/POSEIDON 위성 POD 결과가 사용되었다. 관측된 값과 계산된 값의 비교(O-C)를 위해서 GPS 기반 POD 시스템 결과로부터 획득된 궤도 정보를 YLPODS의 초기 궤도로 사용하고, 첫 번째 반복 후 얻어진 거리측정잔차를 확인해 보았다. YLPODS의 궤도결정 수행 결과 TOPEX/POSEIDON과 CHAMP 위성 모두 거리측정잔차가 10cm 미만, 각 방향 오차가 1m 수준의 정밀도를 가지는 것을 확인하였다. GPS 기반 POD 시스템 결과에 대한 정밀도 검증 결과 TOPEX/POSEIDON 위성의 경우 거리측정잔차가 10cm 미만으로 나오는 것을 확인하였다. YLPODS의 궤도결정 수행 결과에 비추어볼 때 GPS 기반 POD 시스템 결과의 각 방향 궤도 정밀도가 1m 수준이 될 것을 예상해볼 수 있고, 실제로 JPL 정밀궤도력과 비교했을 때 1m 수준의 궤도 정밀도를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 결과적으로 이 연구를 통해서 개발된 YLPODS는 향후 수행될 과학기술위성 2호와 다목적 실용위성 5호와 같은 SLR 데이터 획득이 가능한 위성의 SLR 기반 POD 및 GPS 기반 POD 결과 검증에 활용될 수 있을 것이다.

[†]corresponding author

Abstract

In this study, the YLPODS (Yonsei Laser-ranging Precision Orbit Determination System) is developed for POD using SLR (Satellite Laser Ranging) NP (Normal Point) observations. The performance of YLPODS is tested using SLR NP observations of TOPEX/POSEIDON and CHAMP satellite. JPL's POE (Precision Orbit Ephemeris) is assumed to be true orbit, the measurement residual RMS (Root Mean Square) and the orbit accuracy (radial, along-track, cross-track) are investigated. The validation of POD using GPS (Global Positioning System) raw data is achieved by YLPODS performance and highly accurate SLR NP observations. YGPODS (Yonsei GPS-based Precision Orbit Determination System) is used for generating GPS based precise orbits for TOPEX/POSEIDON. The initial orbit for YLPODS is derived from the YGPODS results. To validate the YGPODS results the range residual of the first adjustment of YLPODS is investigated. The YLPODS results using SLR NP observations of TOPEX/POSEIDON and CHAMP satellite show that the range residual is less than 10 cm and the orbit accuracy is about 1 m level. The validation results of the YGPODS orbits using SLR NP observations of the TOPEX/POSEIDON satellite show that the range residual is less than 10 cm. This result predicts that the accuracy of this GPS based orbits is about 1m level and it is compared with JPL's POE. Thus this result presents that the YLPODS can be used for POD validation using SLR NP observations such as STSAT-2 and KOMPSAT-5.

Keywords: satellite laser ranging, precision orbit determination, GPS, orbit validation

1. 서 론

레이저를 사용한 거리측정 시스템인 SLR(Satellite Laser Ranging) 시스템은 지상국과 인공위성 사이의 거리를 측정하는 가장 정밀한 방법으로 알려져 있다(Seeber 2003). 개별적인 관측값인 single shot의 경우에는 정밀도가 5-50mm 정도, 관측 데이터 분산을 막기 위해 2분 정도 데이터 범위에서 측정된 값을 평균한 NP(Normal Point) 데이터의 경우에는 그 정밀도가 1-12mm에 이른다(Montenbruck & Gill 2001). 이처럼 오차가 수 mm 수준에 이르는 거리측정 정밀도 때문에 SLR 데이터는 GPS(Global Positioning System)와 같은 다른 위성 추적 시스템 및 우주 감시 시스템 등의 관측 데이터를 독립적으로 보정할 수 있는 장점이 있다(Zhu, Reigber, & Kang 1997, Barlier et al. 2001, Schumacher et al. 2001, Urschl et al. 2005, 2007).

SLR에 관한 연구는 ILRS(International Laser Ranging Service)의 주도 하에 다양한 방향으로 진행되고 있다(Pearlman, Degnan, & Bosworth 2002). 최근에는 SLR 시스템의 성능을 최대화하기 위한 더 넓은 SLR 지상국 네트워크 구축, 정밀한 자료 산출을 위한 새로운 레이저 시스템 개발, 더 가볍고 성능이 좋은 레이저 반사경의 설계 및 제작 등을 위한 노력을 기울이고 있다(Pearlman et al. 2007). 한반도 주변국인 미국, 러시아, 중국, 일본의 경우는 다수의 SLR 시스템을 보유하고 세계

수준의 기술을 유지하고 있다. 우리나라는 아직 독립된 SLR 시스템을 구축하지 못한 상태이지만 현재 한국천문연구원을 주축으로 관련 연구가 진행되고 있으며(<http://www.slr.re.kr>), 과학기술위성 2호와 다목적 실용위성 5호와 같은 레이저 반사경을 장착한 위성이 발사되고 임무가 시작되면 본격적인 연구가 수행될 것으로 기대된다(Lee et al. 2005).

SLR 데이터의 높은 거리측정 정밀도는 인공위성의 위치를 정밀하게 결정하기 위한 정밀궤도결정(Precision Orbit Determination, POD)에도 유리하게 작용한다. 이러한 장점을 활용하는 SLR 데이터 기반 POD에 관한 연구도 진행되고 있다(Noomen 2001, 임형철 외 2002, 배금숙 2006). 하지만, SLR 시스템은 대기상태, 지상국의 상황에 따라 정밀도 및 활용도의 편차가 크고, 지상국의 개수 및 분포가 전지구적인 네트워크를 이루고 있지 못하기 때문에 GNSS(Global Navigation Satellite Systems), DORIS(Doppler Orbitography by Radiopositioning Integrated on Satellite), VLBI(Very Long Baseline Interferometry) 같은 다른 시스템에 비해 관측 데이터가 시간적으로나 공간적으로 균일하게 분포하지 못한다는 단점이 있다(Seeber 2003). 그리고 전파 추적 시스템보다 레이저의 빔 폭이 작기 때문에 위성을 추적하기 위해서 사전에 미리 궤도를 정밀하게 알고 있어야 하는 단점이 있다(윤재철 외 2005). 이러한 특성 때문에 SLR 데이터만을 단독으로 사용하는 POD는 결과가 수렴하지 않거나 기대하는 정밀도의 결과를 얻지 못할 가능성이 있다. 따라서 최근에는 SLR 데이터의 높은 거리측정 정밀도를 최대한 활용하기 위해, SLR 데이터와 GNSS, DORIS 등의 추적 시스템의 데이터를 함께 사용해서 POD를 수행하거나, SLR 데이터 중 고도각이 높은 데이터 등 일부만을 이용해서 거리측정잔차(range residual)를 시험하고 이를 통해 다른 추적 시스템 기반의 POD 결과를 보완하는 연구가 주로 수행되고 있다(Andersen, Aksnes, & Skonnord 1998, Choi 2003, Kang, Nagel, & Pastor 2003, Urschl et al. 2005, 2007, Kang et al. 2006).

이 논문에서는 이러한 최신 연구동향에 맞추어서 먼저 SLR NP 데이터를 이용하는 POD 시스템을 개발한 뒤, GPS 데이터를 이용한 저궤도 위성의 POD 결과를 거리측정 정밀도가 높은 SLR NP 데이터를 통해서 검증해 보는 연구를 수행하였다. POD를 수행하고 난 뒤 결정된 궤도의 정밀도를 검증하는 것은 POD 시스템의 성능과 신뢰도를 확인하는 중요한 작업이다. 일반적으로 POD 과정을 통해서 결정된 궤도의 정밀도를 검증하는 가장 유용하고 효과적인 방법은 다른 추적 시스템을 사용하거나 다른 궤도 추정방법, 동역학 모델을 사용하는 등, 독립된 방법으로 개발된 다른 POD 시스템의 결과와 비교해 보는 것이다(Choi 2003). TOPEX/POSEIDON이나 CHAMP와 같이 오랜 기간 다양한 연구 기관에서 관측 데이터가 분석되고 POD가 수행된 인공위성의 경우는 각 기관에서 정밀궤도력의 형태로 결과를 배포하기 때문에 결정된 궤도의 정밀도를 비교하기가 쉽다. 하지만 우리나라가 발사할 예정인 과학기술위성 2호와 다목적 실용위성 5호와 같이 임무가 처음 시작되고 전세계적인 관측에 어려움이 있는 경우는 POD 과정을 통해서 결정된 궤도의 정밀도를 검증하는 것이 쉽지 않다. 일반적으로 POD를 수행하기 위해서 GPS 데이터를 사용하는 경우가 많은데, 이 때 확보 가능한 SLR 관측 데이터가 있다면 이는 좋은 정밀도 검증 도구로 활용될 수 있다. SLR 관측 데이터를 통해서 계산된 거리측정값(O)과 GPS 데이터 기반 POD 결과를 통해서 계산된 거리측정값(C)을 비교하면 거리측정잔차(O-C)를 얻을 수 있는데, 이것이 결정된 궤도의 정밀도를 나타내는 간접적인 지표가 된다. 이러한 방법으로 정밀도를 검증하기 위해서는 먼저 SLR 관측 데이터의 거리측정값을 정밀하게 모델링할 수 있는 SLR 데이터 기반 POD 시스템 구축이 선행되어야 한다.

표 1. YLPODS에서 고려된 동역학 모델 및 관측 모델.

구분	설명
동역학 모델	지구 중력포텐셜 JGM-2(Nerem et al. 1994)
	태양과 달, 태양계 행성들의 중력 DE405(Standish et al. 1998)
	지구 지각 및 해양 조석력(Colombo 1984)
	지구 극축운동
	일반상대성 이론(Huang et al. 1990)
	지구 대기항력 box-wing macro(Marshall & Luthcke 1994), MSISE-90(Hedin 1991)
관측 모델	태양 복사압 box-wing macro(Marshall & Luthcke 1994), 지구 복사압(Knocke & Ries 1987)
	경험적 일반가속도(Colombo 1989)
	위성체 열복사(경험적 일반화 가속도 적용)
	대류층 지연(Mendes et al. 2002)
	레이저 반사경의 offset 오차(ILRS 제공)

이를 위해서 이 연구에서는 먼저 SLR NP 데이터를 이용해서 저궤도 위성의 POD를 수행하는 YLPODS(Yonsei Laser-ranging Precision Orbit Determination System)를 개발하고 성능 검증을 위한 궤도결정 시험을 수행하였다. 궤도결정 시험을 위해서 TOPEX/POSEIDON과 CHAMP 위성의 SLR NP 데이터를 사용하였고, 성능 검증을 위해서 JPL에서 배포하는 정밀궤도력(ftp://podaac.jpl.nasa.gov/pub, ftp://sayatnova.jpl.nasa.gov/pub)을 참값으로 가정하고, 궤도결정 수행 후 얻어지는 관측값(O)과 계산값(C)의 거리측정잔차(range residual)의 RMS(Root Mean Square) 및 결정된 궤도의 반경(radial), 진행(along-track), 교차(cross-track) 방향 오차의 RMS를 계산해보았다. GPS 기반 POD 시스템 결과의 정밀도 검증을 위해서는 기존에 개발된 GPS 기반 POD 시스템의 TOPEX/POSEIDON 위성의 POD 결과 획득된 궤도 정보를 위성의 초기 궤도로 사용하여 궤도결정 수행 후 첫 번째 반복 후 얻어진 거리측정잔차의 RMS를 확인하였다. 검증을 위한 GPS 기반 POD 시스템 결과는 YGPODS(Yonsei GPS-based Precision Orbit Determination System)의 결과가 사용되었다(윤재철 2002). 이를 통해서 개발된 YLPODS가 향후 레이저 반사경을 장착하고 임무를 수행하는 저궤도 위성의 SLR 기반 POD 및 GPS 기반 POD 시스템 결과 검증에 활용될 수 있음을 확인해보았다.

2. SLR 관측 모델

SLR 시스템을 이용한 거리측정의 원리는 간단하다. 지상국에서 발사된 레이저가 인공위성의 반사경까지 도달했다가 다시 지상국으로 돌아오는 시간을 측정하면 지상국과 인공위성 사이의 거리를 계산할 수 있다. 여기에는 여러 가지 요인에 의한 오차가 포함되는데 SLR 시스템은 레이저를 사용해서 관측을 수행하기 때문에 다른 관측 시스템에 비해서 오차요인이 적어 관측 모델이 비교적 간단하다. SLR 시스템을 이용해서 측정된 지상국의 레이저 송수신 기준점과 인공위성의 레이저 반사경과의 거리(ρ)는 아래와 같은 수식으로 표현할 수 있다(Tapley, Schutz, & Eanes 1985).

$$\rho = \frac{c\Delta t}{2} - \Delta\rho_{trop} - \Delta\rho_{grel} - \Delta\rho_{c.m.} - b + \epsilon \quad (1)$$

여기서 c 는 빛의 속도, Δt 는 레이저의 왕복시간, $\Delta\rho_{trop}$ 는 대류층 지연오차, $\Delta\rho_{grel}$ 은 일반 상대론에 기초한 오차, $\rho_{c.m.}$ 은 레이저 반사경의 offset 오차, b 는 검증 및 보정에 의해 결정된 시스템 지연

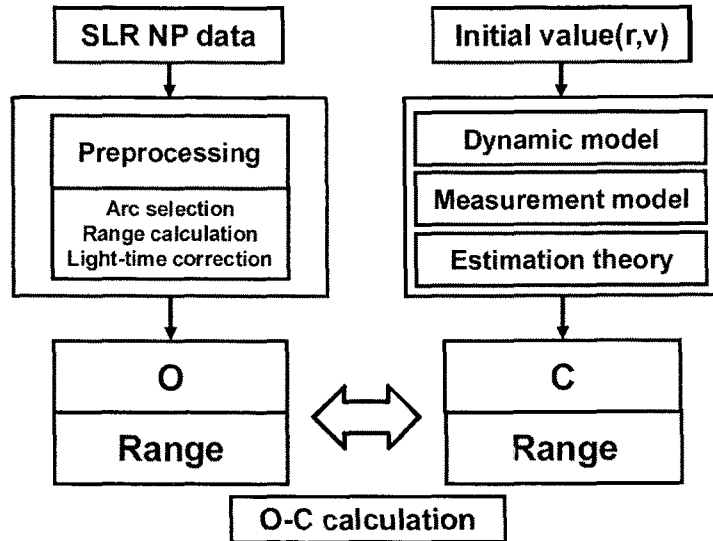


그림 1. YLPODS 알고리즘.

오차, ϵ 은 모델링되지 못한 관측오차이다. 대부분의 SLR 시스템에는 Nd:YAG 레이저가 사용되는데 이는 파장이 532nm로 가시광선 영역에 해당한다. 따라서, 주파수의 제공에 반비례하는 특성을 가지는 이온층에 의한 지연오차는 무시할 수 있는 장점이 있다. 하지만, 가시광선 영역이기 때문에 SLR 시스템을 이용한 관측은 대기의 기상상태에 큰 영향을 받게 되고 대류층 지연오차를 정밀하게 계산하는 것이 중요하다. NP 데이터의 경우는 각 지상국에서 시스템 지연오차를 보정해서 배포하기 때문에 관측 모델에서 따로 고려하지 않아도 된다. 모델링되지 못한 관측오차의 경우 특별히 해당 지상국의 공지사항이 없는 경우에는 POD를 수행하고 나서 발생하는 바이어스를 통해서 확인할 수 있다. 일반 상대론에 기초한 오차는 관측 모델을 단순시키기 위해서 고려하지 않았다. 이 연구에서는 대류층 지연오차, 레이저 반사경의 offset 오차를 포함하여 SLR 관측 모델을 구성하였다.

3. SLR NP 데이터를 사용한 POD 시스템

인공위성의 궤도를 정밀하게 결정하는 POD 시스템은 크게 인공위성의 운동 및 관측 데이터를 모델링하는 동역학 및 관측 모델, 새로운 궤도 값을 추정하고 갱신하는 추정 이론 부분으로 구성된다. YLPODS에 적용된 동역학 모델 및 관측 모델은 표 1과 같다. 동역학 모델은 기존에 개발된 GPS 기반 POD 시스템인 YGPODS에 적용된 모델들을 기반으로 구성하였다(윤재철 2002). 관측 모델은 SLR 관측 데이터의 특성을 모델링 하기 위해 Mendes et al.(2002)의 대류층 지연모델을 중심으로 새롭게 구성하였다. 레이저 반사경의 offset은 ILRS의 center-of-mass offset 정보를 통해 획득하였다(http://ilrs.gsfc.nasa.gov/satellite_missions/center_of_mass/). 각 관측 시간에서 위성들의 위치 및 속도 그리고 변화편미분(variational partials)을 계산하기 위해서는 Adams-Cowell 11차 예측자-수정자 수치적분방법을 사용하였다(윤재철 2002). 추정을 위해서는 후처리 가중치 최소자승법을 이용한

표 2. YLPODS 성능 검증을 위해 사용된 SLR NP 데이터.

ARC	TIME(UTC)	지상국	NP 개수
TOPEX A	2002/01/02 16:13:28 - 16:16:23	METL, HERL	25
TOPEX B	2002/01/02 16:14:08 - 16:16:38	RIGL, HERL	22
TOPEX C	2002/01/03 18:32:52 - 18:36:53	ZIML, HERL	30
TOPEX D	2002/01/03 22:34:52 - 22:37:07	BORL, ZIML	17
CHAMP A	2001/06/06 19:48:23 - 19:53:57	RIGL, GRSL	63
CHAMP B	2001/06/07 20:43:09 - 20:48:08	HERL, GRSL	20
CHAMP C	2001/06/24 07:07:03 - 07:08:53	ZIML, HERL	23
CHAMP D	2001/07/28 03:44:43 - 03:48:02	ZIML, POTL	31

batch least-square filter를 사용하였다(Tapley, Schutz, & Born 2004).

이 연구에서 개발된 YLPODS의 알고리즘은 그림 1과 같다. 전처리 부분은 arc 선택, 거리측 정값 계산, light-time correction을 수행하고 최종적으로 관측된 거리값(O)을 계산한다. Light-time correction은 레이저가 인공위성의 반사경에 도착하는 시각과 레이저가 다시 반사경에서 지상국으로 돌아오는 시각이 다르기 때문에 왕복시간을 계산할 때 발생하는 오차의 보정을 의미한다(Tapley, Schutz, & Born 2004). 궤도결정 부분은 동역학 모델, 관측 모델을 통해서 원하는 시각의 위성의 궤도(위치와 속도)를 예측하고 이를 이용해서 계산된 거리값(C)을 구한다. 그러면 관측된 값과 계산된 값의 차이인 거리측정잔차(O-C)를 구할 수 있고, 이를 통해 수렴 여부를 판단한 뒤 batch least-square filter를 통해 새로운 값을 추정하고 같은 과정을 반복하게 된다.

YLPODS의 동역학, 관측 모델링 및 POD 결과 정밀도를 확인하기 위해서 이 연구에서는 저궤도 위성인 TOPEX/POSEIDON과 CHAMP의 SLR NP 데이터를 사용해서 성능 검증을 수행하였다. YLPODS에서 모델링된 거리값의 정밀도를 확인하기 위해서는 POD 수행 후에 얻은 거리측정잔차 값을 확인해 보았고, YLPODS를 통해 결정된 궤도의 정밀도를 확인하기 위해서는 참값으로 가정한 정밀궤도력과 반경, 진행, 교차 방향의 오차를 계산해 보았다. 위성의 초기 궤도정보 계산 및 궤도 정밀도 비교를 위해서는 JPL의 TOPEX/POSEIDON과 CHAMP 위성의 정밀궤도력을 참값으로 가정하였는데 그 정밀도는 다음과 같다. SLR과 DORIS 관측 데이터를 사용하여 GEODYNII를 통해 결정된 TOPEX/POSEIDON의 정밀궤도력은 반경 방향 오차 약 2-3cm, 진행 방향 및 교차 방향 오차 약 15cm RMS의 정밀도를 가지고 있고(Tapley et al. 1994), CHAMP 위성의 SLR 관측 데이터를 처리한 정밀 궤도력은 위치 정밀도가 약 10-15cm RMS 정도로 알려져 있다(<http://nng.esoc.esa.de/gps/slr.html>). POD를 수행하기 위한 위성의 초기 궤도정보(위치와 속도)는 JPL의 정밀궤도력에 X,Y,Z 방향 10m의 위치 오차를 준 뒤 사용하였다.

표 2는 YLPODS의 성능을 검증하기 위해 사용된 SLR NP 데이터들이다. TOPEX/POSEIDON과 CHAMP 위성 모두 지상국 2개로 관측된 4개의 arc를 사용하였다. SLR NP 데이터는 NASA의 GSFC에서 제공되는 것을 사용하였다(<ftp://cdis.gsfc.nasa.gov/slr>). 각 arc에 배포되는 모든 SLR NP 데이터를 사용하지 않고, 각 arc에서 정밀도가 높은 점을 위주로 구성하였다. 각 관측점의 정밀도는 동역학 모델과 관측 모델을 통해서만 추정된 거리값과 SLR NP 관측 데이터를 통해 계산된 거리값을 직접 비교해서 잔차를 계산하는 SLR residual test를 수행해서 확인하였다. 정밀도 검증 결과는 표 3, 그림 2, 3과 같다. 그림 2와 3은 YLPODS의 필터 반복에 따른 거리측정잔차 값의 변화를 나

표 3. YLPODS 정밀도 검증 결과.

ARC	거리측정잔차(cm, RMS)	반경 방향(m, RMS)	진행 방향(m, RMS)	교차 방향(m, RMS)
TOPEX A	5.4	0.617	0.132	0.475
TOPEX B	7.8	0.511	0.088	0.562
TOPEX C	3.9	0.354	0.146	0.460
TOPEX D	6.5	0.944	0.135	0.237
CHAMP A	1.6	0.169	0.198	0.159
CHAMP B	4.3	0.532	0.118	0.461
CHAMP C	1.6	0.224	0.062	0.088
CHAMP D	1.9	0.038	0.057	0.252

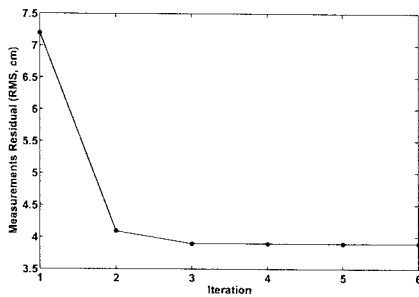


그림 2. 필터 반복에 따른 거리측정잔차 값(TOPEX arc C).

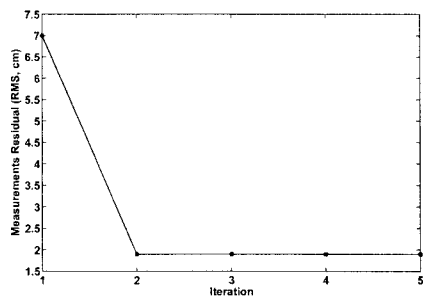


그림 3. 필터 반복에 따른 거리측정잔차 값(CHAMP arc D).

타내는 것으로 구성된 필터를 통해 잔차가 최소화되는 방향으로 추정이 잘 진행되고 있음을 보여준다. 표 3은 구체적인 정밀도 검증 결과를 보여준다. 먼저 YLPODS에서 모델링된 거리값의 정밀도를 나타내는 거리측정잔차의 RMS 값이 TOPEX/POSEIDON과 CHAMP 위성 모두 10cm 미만으로 나온 것을 확인할 수 있다. 다음으로 POD 결과의 궤도 정밀도를 나타내는 반경, 진행, 교차 방향 오차의 RMS 값이 두 위성 모두 각 방향 1m 수준으로 나온 것을 확인할 수 있다. 이를 통해서 YLPODS를 통해서 SLR NP 데이터만을 이용하여 저궤도 위성의 POD를 수행했을 때 거리측정잔차는 10cm, JPL 정밀궤도력 대비 궤도 정밀도는 반경, 진행, 교차 방향으로 1m 수준의 오차를 가지는 결과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

4. GPS 기반 POD 시스템 결과의 검증

이 연구에서는 위성이 GPS 수신기와 레이저 반사경을 장착하고 임무를 수행하는 경우를 가정하여, GPS 기반 POD 시스템의 결과를 같은 관측 시각의 SLR NP 데이터와 거리측정잔차를 비교하는 방법으로 정밀도를 검증해 보았다. 이를 위해서 먼저 SLR NP 데이터가 존재하는 시각에 해당하는 GPS 기반 POD 결과를 위성의 초기 위치와 속도값으로 입력하고 YLPODS를 실행하였다. 그리고 추정 과정을 통해 궤도 정보가 갱신되기 전에 SLR 관측값과 GPS 기반 POD 결과를 통해 계산된 거리값의 차이만을 보기 위해 첫 번째 반복 후의 거리측정잔차를 확인하였다. GPS 기반 POD 시스

표 4. GPS 기반 POD 결과 거리측정잔차 시험 결과(TOPEX/POSEIDON).

ARC	TIME(UTC)	지상국	정규점 개수	거리측정잔차(cm, RMS)
A	1993/11/17 01:21:10 - 01:31:51	AREL	44	6.1
B	1993/11/17 02:40:37 - 02:44:02	YARL	9	0.4
C	1993/11/17 07:22:08 - 07:26:48	MONL	20	0.4
D	1993/11/17 09:06:26 - 09:13:06	HALL	28	0.4
E	1993/11/17 10:38:26 - 10:42:01	YARL	16	0.2
F	1993/11/17 12:30:54 - 12:40:15	YARL	39	3.5
G	1993/11/17 13:28:28 - 13:32:31	MDOL	18	1.1
H	1993/11/17 13:44:57 - 13:52:37	AREL	22	2.2
I	1993/11/17 15:19:13 - 15:30:18	MDOL	45	2.8
J	1993/11/17 15:19:40 - 15:28:37	MONL	27	3.8
K	1993/11/17 20:29:14 - 20:30:37	WETL	7	0.3
L	1993/11/17 22:21:54 - 22:29:46	HERL	33	3.5
M	1993/11/17 22:23:32 - 22:33:23	BORL	36	5.6

표 5. YGPODS 결과 궤도 정밀도(TOPEX/POSEIDON).

TIME(UTC)	반경 방향(m, RMS)	진행 방향(m, RMS)	교차 방향(m, RMS)
1993/11/17 00:00:00 - 1993/11/18 00:00:00	0.053	0.170	0.122

템의 결과 검증 을 위해서는 TOPEX/POSEIDON 위성의 1993년 11월 17일 하루에 대해서 이중 주파수 L1, L2 반송파 위상 데이터를 이용해서 YGPODS의 POD를 통해 결정된 결과를 사용하였다.

표 4는 1993년 11월 17일 하루에 대한 GPS 기반 POD 결과를 SLR NP 데이터와 비교해서 거리 측정잔차 값을 계산한 결과이다. 1993년 11월 17일에 대해 배포된 모든 SLR NP 데이터를 사용하였으며 다만, 현재 ILRS에서 지상국 정보를 얻지 못하거나, SLR NP 데이터에 대류층 지연을 계산할 수 있는 기상 정보가 없는 경우, 사용 레이저의 파장이 다른 경우, 지상국의 바이어스가 심한 경우의 관측 데이터는 제외하였다. 표 4를 통해 거리측정잔차를 계산해본 결과 GPS 기반 POD 시스템을 통해 결정된 궤도가 모든 SLR arc에 대해서 10cm 미만의 거리측정잔차를 보이는 것을 알 수 있다. SLR NP 데이터는 관측값의 거리측정 정밀도가 매우 높은 것으로 알려져 있기 때문에 거리측정 잔차를 비교하는 것만으로 POD 결과의 정밀도를 유추해볼 수 있다. 3장에서 YLPODS의 성능 검증 결과, 거리측정잔차가 10cm 미만으로 나타났을 때 JPL 정밀궤도력 대비 반경, 진행, 교차 방향으로 1m 수준의 궤도 정밀도를 가지는 것을 확인하였다. SLR NP 데이터의 높은 정밀도를 생각하면 GPS 기반 POD 시스템의 결과를 사용해서 얻은 거리측정잔차가 10cm 미만으로 나타났을 때 이 결과도 각 방향 1m 수준의 궤도 정밀도를 가질 가능성이 있음을 예상해 볼 수 있다. 위성의 정밀궤도력이 배포되지 않는 경우에는 결과가 정말 1m 수준의 궤도 정밀도를 가지는 지 확인하기 어렵지만, 이 연구에서는 여러 기관에서 정밀궤도력을 배포하는 TOPEX/POSEIDON 위성을 사용했기 때문에 GPS 기반 POD 시스템 결과의 정밀도를 직접 확인해볼 수 있다. 이를 위해서 1993년 11월 17일의 GPS 데이터를 사용해서 POD를 수행한 YGPODS 결과를 직접 JPL의 정밀궤도력과 비교해보았다. 궤도 정밀도 비교 결과는 표 5와 같다.

표 5를 통해서 검증 대상으로 가정했던 YGPODS를 통해 결정된 궤도가 1993년 11월 17일 하루

에 대해서 반경, 진행, 교차 방향으로 1m 이하의 궤도 정밀도를 가지는 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 SLR NP 데이터를 사용하는 GPS 기반 POD 결과의 거리측정잔차 분석이 1m 수준의 POD 결과 궤도 정밀도 예측에 사용가능하다는 것을 말해준다. 결과적으로 이를 통해 이 연구에서 개발한 YLPODS가 SLR NP 데이터를 통해 GPS 기반 POD 시스템 결과의 궤도 정밀도를 검증하는 도구로 사용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

이 연구에서는 SLR NP 데이터를 사용한 POD 시스템인 YLPODS를 개발하고 이를 이용해서 거리측정잔차 값을 비교하는 방법으로 GPS 기반 POD 시스템 결과를 검증하는 연구를 수행하였다. YLPODS의 정밀도 검증 결과 거리측정잔차 10cm 미만, JPL 정밀궤도력 대비 반경, 진행, 교차 방향 1m 수준의 결과를 얻을 수 있음을 확인하였고, GPS 기반 POD 시스템 결과를 해당 시각의 SLR NP 데이터와 비교한 결과 거리측정잔차 10cm 미만의 결과를 얻을 수 있었다. 그리고 이를 통해서 검증된 GPS 기반 POD 시스템 결과가 반경, 진행, 교차 각 방향 궤도 정밀도가 1m 수준이 된다는 것을 예측할 수 있었다. 그리고 검증에 사용한 YGPODS의 결과 궤도를 실제 배포되는 정밀궤도력을 통해서 비교했을 때, 각 방향으로 궤도 정밀도가 1m 미만이 되는 것을 확인함으로써 이 방법이 실제로 적용 가능함을 확인하였다. 결론적으로, 이 연구를 통해서 개발된 SLR NP 데이터를 사용해서 POD를 수행하는 YLPODS가 거리측정잔차 10cm 미만, JPL 정밀궤도력 대비 각 방향 1m 수준의 궤도 정밀도를 가지는 결과를 얻을 수 있고, 이러한 성능을 기반으로 GPS 기반 POD 시스템 결과를 검증하는 도구로 사용될 수 있음을 확인하였다. 이 연구를 통해서 개발된 YLPODS는 향후 수행될 과학 기술위성 2호와 다목적 실용위성 5호와 같은 SLR 데이터 획득이 가능한 위성의 SLR 기반 POD 및 GPS 기반 POD 결과 검증에 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- 배금숙 2006, 석사학위논문, 연세대학교
윤재철 2002, 박사학위논문, 연세대학교
윤재철, 신재민, 문홍열, 이진호, 천용식, 최해진 2005, 항공우주산업기술동향, 3(1), 58
임형철, 박관동, 박필호, 박종욱, 조정호 2002, 한국우주과학회지, 19, 385
Andersen, P. H., Aksnes, K., & Skonnord, H. 1998, Journal of Geodesy, 72, 421
Barlier, F., Berger, C., Bonnefond, P., Exertier, P., Laurain, O., Mangin, J. F., & Torre, J. M. 2001, Journal of Geodesy, 75, 600
Choi, K.-R. 2003, PhD Thesis, University of Texas at Austin
Colombo, O. L. 1984, NASA Technical Memorandum / Altimetry, Orbits and Tides, NASA-TM-86180
Colombo, O. L. 1989, JGR, 94, 9167
Hedin, A. E. 1991, JGR, 96, 1159
Huang, C., Ries, J. C., Tapley, B. D., & Watkins, M. M. 1990, Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 48, 167

- Kang, Z., Nagel, P., & Pastor, R. 2003, *Advances in Space Research*, 31, 1875
- Kang, Z., Tapley, B., Bettadpur, S., Ries, J., Nagel, P., & Pastor, R. 2006, *Journal of Geodesy*, 80, 322
- Knocke, P. C. & Ries, J. C. 1987, Center for Space Research Technical memorandum / Earth Radiation Pressure Effects on Satellites, CSR-TM-87-01
- Lee, J. H., Kim, S. B., Kim, K. H., Lee, S. H., Im, Y. J., Fumin, Y., & Wanzhen, C. 2005, *Acta Astronautica*, 56, 547
- Marshall, J. A. & Luthcke, S. B. 1994, *Journal of Spacecraft and Rockets*, 31, 99
- Mendes, V. B., Prates, G., Pavlis, E. C., Pavlis, D. E., & Langley, R. B. 2002, *Geophysical Research Letters*, 29, 1414
- Montenbruck, O. & Gill, E. 2001, *Satellite Orbits*, 2nd Ed. (NewYork: Springer), pp.202-203
- Nerem, R. S., Lerch, F. J., Marshall, J. A., Pavlis, E. C., Putney, B. H., Tapley, B. D., Eanes, R. J., Ries, J. C., Schutz, B. E., Shum, C. K., Watkins, M. M., Klosko, S. M., Chan, J. C., Luthcke, S. B., Patel, G. B., Pavlis, N. K., Williamson, R. G., Rapp, R. H., Biancale, R., & Nouel, F. 1994, *JGR*, 99, 24421
- Noomen, R. 2001, *Surveys in Geophysics*, 22, 473
- Pearlman, M., Noll, C., McGarry, J., Gurtner, W., & Pavlis, E. 2007, *Advances in Geosciences*, submitted
- Pearlman, M. R., Degnan, J. J., & Bosworth, J. M. 2002, *Advances in Space Research*, 30, 135
- Schumacher, P. W., Jr., Gilbreath, G. C., Davis, M. A., & Lydick, E. D. 2001, *JGCD*, 24, 925
- Seeber, G. 2003, *Satellite Geodesy*, 2nd Ed. (NewYork: Walter de Gruyter), pp.404-406
- Standish, E. M. 1998, *JPL Planetary and Lunar Ephemerides, DE405/LE405* (California: JPL), pp.1-6
- Tapley, B. D., Ries, J. C., Davis, G. W., Eanes, R. J., Schutz, B. E., Shum, C. K., Watkins, M. M., Marshall, J. A., Nerem, R. S., Putney, B. H., Klosko, S. M., Luthke, S. B., Pavlis, D., Williamson, R. G., & Zelensky, N. P. 1994, *JGR*, 99, 24383
- Tapley, B. D., Schutz, B. E., & Born, G. H. 2004, *Statistical Orbit Determination* (Burlington: Academic Press), pp.103-107, pp.173-178
- Tapley, B. D., Schutz, B. E., & Eanes, R. J. 1985, *Celestial Mechanics*, 37, 247
- Urschl, C., Beutler, G., Gurtner, W., Hugentobler, U., & Schaer, S. 2007, *Advances in Space Research*, 39, 1515
- Urschl, C., Gurtner, W., Hugentobler, U., Schaer, S., & Beutler, G. 2005, *Advances in Space Research*, 36, 412
- Zhu, S. Y., Reigber, C., & Kang, Z. 1997, *Journal of Geodesy*, 71, 423