

GLONASS 위성 가시성 분석을 위한 방송궤도력 기반 궤도 예측

김혜인[†], 박관동
인하대학교 공과대학 지리정보공학과

Orbit Prediction using Broadcast Ephemeris for GLONASS Satellite Visibility Analysis

Hye-In Kim[†] and Kwan-Dong Park

Department of Geoinformatic Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea
E-mail: hikim0619@inha.edu

(Received February 16, 2009; Accepted March 23, 2009)

요 약

다양한 위성항법시스템이 개발 중이지만 현재 측위에 사용 가능한 것은 GPS와 GLONASS 뿐이다. 이 연구에서는 GLONASS의 궤도력 중에서 방송궤도력을 이용하여, 위성의 운동을 나타내는 미분방정식을 4차 Runge-Kutta 방법으로 수치적분하여 위성궤도를 예측하고, 그 정확도를 평가하였다. 생성한 예측궤도는 정밀궤도력과 비교하여 정확도를 검증하였는데, 1일간의 예측궤도와 7일간의 예측궤도의 3차원 최대오차는 각각 17.4km, 40.1km로 나타났으며, RMS 오차는 각각 14.3km, 15.7km로 나타났다. 또한 예측궤도를 이용하여 산출한 가시위성의 개수와 실제관측 결과를 비교하였다. 그 결과, 관측지점의 주변 건물에 의한 영향으로 발생하는 차이를 제외하고 결과가 일치하는 것을 확인하였다.

Abstract

Even though there are several Global Navigation Satellite Systems under development, only GPS and GLONASS are currently available for satellite positioning. In this study, GLONASS orbits were predicted from broadcast ephemeris using the 4th-order Runge-Kutta numerical integration. For accuracy validation, predicted orbits were compared with precise ephemeris. The RMS (Root Mean Square) and maximum 3-D errors were 14.3 km and 17.4 km for one-day predictions. In case of 7-day predictions, the RMS and maximum 3-D errors were 15.7 and 40.1 km, respectively. Also, the GLONASS satellite visibility predictions were compared with real observations, and they agree perfectly except for several epochs when the satellite signal was blocked by nearby buildings.

Keywords: GLONASS, orbit prediction, visibility, broadcast ephemeris

[†]corresponding author

1. 서 론

현재 전 세계적으로 운영되고 있는 위성항법시스템으로는 미국의 GPS(Global Positioning System)와 러시아의 GLONASS(GLObal NAVigation Satellite System)가 있으며, 추가적으로 유럽의 Galileo, 중국의 Beidou/Compass, 일본의 QZSS(Quasi-Zenith Satellite System)등이 개발되고 있다. 2010년대 중반 이후에는 추가적으로 개발되고 있는 위성항법시스템의 구축이 완료되어 통합 GNSS(Global Navigation Satellite System) 환경이 완성될 것이며, 이로 인해 다수의 가시위성이 확보되어 측위가용성 및 측위정확도가 향상될 것으로 예상된다. 그러나 도심지역의 경우 지물 및 층 건물 등에 의해 위성신호가 차단될 수 있으며, 이는 측위정확도 저하를 초래하게 된다. 따라서 위성항법시스템을 이용한 측량 계획을 수립할 때 다수의 가시위성이 확보되고 위성의 기하학적 배치가 양호한 최적의 시간과 측점을 예측하는 작업이 필요하다.

이러한 예측작업과 관련한 선행연구들을 살펴보면 다음과 같다. 이동락 외(2005)는 GPS/Galileo 결합 시스템의 측위 성능 분석을 수행하였으며, 서용철과 이양원(2007), 그리고 Suh & Shibasaki(2007)는 일본의 특정지역을 대상으로 GPS, Galileo, QZSS 결합측위의 가용성을 평가하였다. 유경호 외(2007)는 도심의 3차원 GIS 수치지형도를 이용하여 특정지역의 3차원 도심 모델을 생성하였으며, 직선-폴리곤 충돌검사 알고리즘을 통해 가시위성의 개수를 산출하였다. 또한 GPS와 Galileo의 단독 수신과 동시 수신의 경우에 대한 정밀도 저하율(DOP, Dilution of Precision) 분석을 수행하였다. 송종화 외(2008)는 GPS와 Galileo를 통합하는 항법 알고리즘을 구현하고 항법오차, 가시성, 그리고 정밀도 저하율 분석을 실시하였다.

위성의 측위가용성과 정확도를 예측하기 위해서는 기본적으로 위성의 위치정보가 필요하기 때문에 위성의 궤도예측이 필수적이다. 앞서 소개한 선행연구들에서는 알마나의 케플러 궤도요소와 궤도방정식을 이용하여 GPS 위성궤도를 예측하였으며, 현재 개발 중인 Galileo, QZSS 위성의 궤도는 초기 궤도 정보를 이용하여 예측궤도를 생성하였다. 그러나 GLONASS의 경우, GPS와 함께 현재 실질적으로 운영되고 있는 위성항법시스템임에도 불구하고 국내의 가시성 분석 연구들에서는 GLONASS 위성의 궤도예측은 수행한 바가 없다. 현재 개발 중인 차세대 위성항법시스템의 구축이 완료되는 2010년대 중반까지 사용자가 이용할 수 있는 위성항법시스템은 GPS와 GLONASS가 유일할 것이므로 이를 대상으로 하는 가시성 분석이 이루어져야 하며, 따라서 궤도예측이 필수적이다.

이 논문에서는 GLONASS 위성궤도를 예측하고 정밀궤도력과 비교하여 정확도를 검증하였다. GLONASS 궤도예측에는 방송궤도력을 이용하였는데, 위성의 운동을 표현한 미분방정식의 4차 Runge-Kutta 수치적분법을 이용하여 위성의 위치를 계산하였다. 예측된 위성좌표를 정밀궤도력상의 위성좌표와 비교하여 X, Y, Z 성분별 좌표오차와 3차원 좌표오차, RMS(Root Mean Square) 오차를 산출하였으며, 이를 정확도 평가의 지표로 사용하였다. 또한 계산한 위성좌표와 관측지점 좌표를 이용하여 위성의 방위각, 고도각을 계산하고 이를 통해 가시위성의 개수를 산출한 후, 실제 관측된 가시 위성 개수와 비교하여 가시성 분석에의 활용 가능성 여부를 파악하였다.

2. GLONASS 개요

GLONASS는 러시아에서 개발하여 운영하고 있는 위성항법시스템으로써 GPS와 마찬가지로 초기에는 군사적 목적으로 1970년대 중반부터 개발되기 시작하였다. 1982년 첫 번째 위성을 발사하

표 1. PZ-90과 WGS84 좌표계 파라미터의 차이.

파라미터	표기	PZ-90	WGS84
지구 중력 상수	μ	$3.9860044 \times 10^{14} \text{m}^3/\text{s}^2$	$3.986005 \times 10^{14} \text{m}^3/\text{s}^2$
지구 반경	a_E	6378136 m	6378137 m
지구 편평률	f	1 / 298.257839303	1 / 298.257223563

고 초기에는 총 24개의 위성 운영을 계획하여 1996년 24개의 위성이 모두 정상적으로 가동되었을 때가 있었지만 러시아의 경제적인 이유와 관리 부실 등의 이유로 인해 위성의 수가 점점 줄게 되었다(남두희 외 2005, 남기욱 외 2007). 그 후 러시아는 GLONASS의 정상화와 시스템 개선을 위해 GLONASS-M 프로그램을 계획하여 2011년 마무리를 목표로 추진하고 있으며, 그 첫 번째 위성이 2003년 12월에 발사되었다. 2008년 12월 25일 발사된 GLONASS-M 3기 위성 R03(727), R02(728), R08(729)의 데이터를 사용할 수 있음을 2009년 2월에 확인하면서 GLONASS-M 위성은 총 19기가 되었다. GLONASS-M 19기, 기존의 GLONASS 위성 1기로 현재는 총 20기의 위성으로 다시 그 수가 증가하여 운용되고 있으나, R06(701)은 2009년 1월 12일 문제가 발생하여 현재 정비 중에 있으며, R09(722)는 운용은 되고 있지만 데이터 이상으로 사용이 불가능한 실정이다. 러시아에서는 GLONASS의 경쟁력을 더욱 향상시키기 위해 총 24기 위성 운용을 목표로 하는 GLONASS-K 프로그램을 현재 준비 중에 있다.

GLONASS의 위성부문은 21기의 위성과 3기의 예비위성으로 구성되어 있다. 각각 120° 간격의 3개의 궤도면에 각각 7기의 위성과 예비위성 1기가 배치되어 있으며, 궤도 경사각은 64.8° 이다. 위성의 고도는 GPS보다 약간 낮은 19,100km이고 공전 주기는 11시간 15분 44초이다. 제어부문은 모스크바에 위치한 시스템제어센터(SCC, System Control Center), 중앙 동기국(Central Synchronizer), 4개의 TT&C(Telemetry, Tracking and Control)로 구성되어 있으며, 5개의 레이저 관측소(Laser Station)에서 TT&C의 역할을 추가적으로 보완하고 있다. 시스템제어센터에서 GLONASS 시스템을 통제, 관리하며, 중앙 동기국에서는 위성시계와 위상 오차(phase offset)를 산출하고 예측하는 작업을 한다. 그리고 TT&C에서는 위성을 추적, 모니터링하고 위성으로 데이터를 전송하는 역할을 수행한다(Hofmann-Wellenhof et al. 2007, 김혜인 2009).

GLONASS는 GPS와 측위 원리는 동일하지만 기준좌표계와 표준시간계가 다르기 때문에 함께 사용하기 위해서는 그 차이를 고려해 주어야 한다. GLONASS의 기준좌표계는 PZ-90(Parametry Zemli 1990) 좌표계이며, GPS는 WGS84(World Geodetic System 1984) 좌표계 기준이다. 두 좌표계의 파라미터는 지구 자전 속도 ω_E 는 $7.292115 \times 10^{-5} \text{rad/s}$, 중력장 J_2 는 -1.0826310^{-3} 으로 동일하지만 지구 중력 상수, 지구 반경, 지구 편평률에 차이가 있다(표 1). PZ-90 좌표계를 WGS84 좌표계로 변환하는 방법은 식 (1)에 나타낸 바와 같으며 단위는 m이다(Bazlov et al. 1999).

$$\begin{bmatrix} X_{WGS84} \\ Y_{WGS84} \\ Z_{WGS84} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.1 \\ -0.3 \\ -0.9 \end{bmatrix} + (1 - 0.12 \times 10^{-6}) \begin{bmatrix} 1 & -0.82 \times 10^{-6} & 0 \\ 0.82 \times 10^{-6} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{PZ-90} \\ Y_{PZ-90} \\ Z_{PZ-90} \end{bmatrix} \quad (1)$$

GLONASS의 기준 시간은 BIH(Bureau International de l'Heure)에 의해 설정된 것으로 세습 133

표 2. GLONASS 방송궤도력 파라미터.

표기	내용	단위
ID	위성의 PRN 번호	-
$Health$	위성상태	-
t_b	기준시각	-
γ_n	위성 주파수 오차	-
τ_n	위성 시계 오차	sec
x_n, y_n, z_n	위성 좌표	km
$\dot{x}_n, \dot{y}_n, \dot{z}_n$	위성 속도	km/sec
$\ddot{x}_n, \ddot{y}_n, \ddot{z}_n$	위성 가속도	km/sec ²

위자의 주파수에 근거하고 있다. GLONASS의 시각과 협정 세계시(UTC, Universal Time Coordinated) 사이의 관계는 식 (2)와 같다(Roβbach 2000, Hofmann-Wellenhof et al. 2007, ICD-GLONASS 2002¹), Coordinational Scientific Information Center Russian Space Forces, Moscow). GLONASS의 시간이 UTC보다 3시간 빠르기 때문에 GLONASS 시간을 UTC로 변환하기 위해서는 항법 메시지에 포함되어 있는 시계 보정항 τ_c 을 가산하고, 3시간을 감산해야 한다.

$$t_{UTC} = t_{GLONASS} + \tau_c - 3h \quad (2)$$

3. GLONASS 위성궤도 예측

GLONASS 궤도력에는 정밀궤도력, 신속궤도력, 방송궤도력, 그리고 알마낙이 있다. 궤도력 파일은 러시아의 Information-Analytical Center(IAC) 홈페이지(<http://www.glonass-ianc.rsa.ru/>)에서 다운받아 사용할 수 있으며, 정밀궤도력 파일의 경우에는 국제 GPS 기구인 IGS(International GNSS Service) 홈페이지(<http://igsb.jpl.nasa.gov/>)에서도 제공하고 있다. 이 연구에서는 GLONASS 궤도 예측을 위해 방송궤도력을 사용하였다.

GLONASS 방송궤도력이 포함하고 있는 내용은 GPS 방송궤도력의 내용과 다르다. GPS 방송궤도력은 위성의 케플러 궤도요소와 섭동량, 보정항 계수 등을 포함하고 있는 반면, GLONASS의 방송궤도력에는 각 위성의 위치, 속도, 그리고 가속도 등이 30분 간격으로 기록되어 있다. 표 2는 GLONASS 방송궤도력에 포함된 파라미터를 나타낸 것이며, 그림 1은 GLONASS 방송궤도력 파일의 예시이다(ICD-GLONASS 2002). 그림 1에서 보듯이 각 예측(epoch)의 첫째 줄은 위성의 PRN(Pseudo Random Noise) 번호, 기준시각, 위성 주파수 오차(SV relative frequency bias), 위성시계오차 등을 나타내며, 둘째 줄은 위성의 X 좌표, 속도, 가속도, 그리고 위성상태를 나타낸다. 그리고 셋째 줄은 위성의 Y 좌표, 속도, 가속도, 주파수 번호를, 마지막 넷째 줄은 Z 좌표, 속도, 가속도 등을 나타낸다.

이 논문에서는 ICD-GLONASS에서 제안하고 있는 4차 Runge-Kutta 방법을 사용하여 GLONASS 위성의 궤도를 예측하였다(ICD-GLONASS 2002). 이 방법은 $f(x, y)$ 의 도함수들을 요구하지 않으면서도 정밀도에 있어서 고차 Taylor 공식과 동등한 결과를 제공하며, 단지 한 개의 초기값만을 가지고 계산과정을 시작한다는 장점이 있다. 이 논문에서는 방송궤도력에 주어진 특정시각의 위성좌표

¹ICD-GLONASS 2002, GLONASS Interface Control Document (version 5.0), Coordinational Scientific Information Center Russian Space Forces, Moscow

TABLE A12 GLONASS NAVIGATION MESSAGE FILE - EXAMPLE							
2.10		GLONASS NAV DATA			RINEX VERSION / TYPE		
ASRINEXG V1.1.0 VM		A1UB			PGM / RUN BY / DATE		
STATION ZIMMERWALD					COMMENT		
1998	2	16	0.379979610443D-06			CORR TO SYSTEM TIME	
END OF HEADER							
3	98	2	15	0	15	0.0	0.163525342941D-03
							0.363797880709D-11
							0.108000000000D+05
							0.106275903320D+05
							0.348924636841D+00
							0.931322574615D-09
							0.000000000000D+00
							0.944422070313D+04
							0.288163375854D+01
							0.931322574615D-09
							0.210000000000D+02
							0.212257280273D+05
							0.144599342346D+01
							0.186264514923D-08
							0.300000000000D+01
4	98	2	15	0	15	0.0	0.179599039257D-03
							0.636646291241D-11
							0.122400000000D+05
							0.562136621094D+04
							0.269074897756D+00
							0.931322574615D-09
							0.000000000000D+00
							0.236819248047D+05
							0.102263259888D+01
							0.931322574615D-09
							0.120000000000D+02
							0.762532910156D+04
							0.339257907867D+01
							0.000000000000D+00
							0.300000000000D+01
11	98	2	15	0	15	0.0	0.559808686376D-04
							0.272848410532D-11
							0.108600000000D+05
							0.350348437500D+04
							0.255325126648D+01
							0.931322574615D-09
							0.000000000000D+00
							0.106803754883D+05
							0.182923507690D+01
							0.000000000000D+00
							0.400000000000D+01
							0.228762856445D+05
							0.447064399719D+00
							0.186264514923D-08
							0.300000000000D+01
12	98	2	15	0	15	0.0	0.199414789677D-04
							0.181898940355D-11
							0.108900000000D+05
							0.131731816406D+05
							0.143945598602D+01
							0.372529029846D-08
							0.000000000000D+00
							0.171148715820D+05
							0.118937969208D+01
							0.931322574615D-09
							0.220000000000D+02
							0.135737919922D+05
							0.268976097107D+01
							0.931322574615D-09
							0.300000000000D+01

그림 1. GLONASS 방송케도력 파일 예시.

x_n, y_n, z_n , 그리고 위성속도 $\dot{x}_n, \dot{y}_n, \dot{z}_n$ 을 초기값으로 이용하여 수치적분 하였다. 일반적으로 위성궤도 계산시 고려해야 하는 섭동에는 J_2 , 태양과 달의 인력, 태양복사압, 대기항력 등이 있지만, 이 논문에서는 중력장 J_2 에 의한 섭동량만을 고려하였다. 위성의 운동을 나타내는 미분 방정식은 식 (3), (4)와 같다(Roßbach 2000, ICD-GLONASS 2002).

$$\frac{dx}{dt} = \dot{x}, \quad \frac{dy}{dt} = \dot{y}, \quad \frac{dz}{dt} = \dot{z} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} \frac{d\dot{x}}{dt} &= -\frac{\mu}{r^3}x + \frac{3}{2}c_{20}\frac{\mu a_E^2}{r^5}x\left(1 - 5\frac{z^2}{r^2}\right) + \ddot{x}_{LS} + \omega_E^2x + 2\omega_E\dot{y} \\ \frac{d\dot{y}}{dt} &= -\frac{\mu}{r^3}y + \frac{3}{2}c_{20}\frac{\mu a_E^2}{r^5}y\left(1 - 5\frac{z^2}{r^2}\right) + \ddot{y}_{LS} + \omega_E^2y + 2\omega_E\dot{x} \\ \frac{d\dot{z}}{dt} &= -\frac{\mu}{r^3}z + \frac{3}{2}c_{20}\frac{\mu a_E^2}{r^5}z\left(1 - 5\frac{z^2}{r^2}\right) + \ddot{z}_{LS} \end{aligned} \tag{4}$$

여기서 x, y, z 는 위성좌표, $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ 는 위성의 속도, $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ 은 지구중심과 위성간의 거리, $-\frac{\mu}{r^3}$ 은 지구와 위성의 상대운동을 나타내는 미분방정식, $\frac{3}{2}c_{20}\frac{\mu a_E^2}{r^5}\left(1 - 5\frac{z^2}{r^2}\right)$ 는 중력장 J_2 에 의한 섭동량, 그리고 $\ddot{x}_{LS}, \ddot{y}_{LS}, \ddot{z}_{LS}$ 은 태양과 달의 인력에 의한 섭동량을 나타낸다. 마지막으로 $\omega_E^2x + 2\omega_E\dot{y}$ 와 $\omega_E^2y + 2\omega_E\dot{x}$ 는 지구자전에 의한 전향력(Coriolis force)을 보정해 주는 역할을 한다. 이는 지구자전이 지구고정좌표계(ECEF, Earth Centered, Earth Fixed)와 관성좌표계(inertial system) 간의 차이를 발생시키는 원인이 되기 때문에 필요하다. 식 (4)의 각 상수들은 앞서 설명한 2장에 그 값을 기술

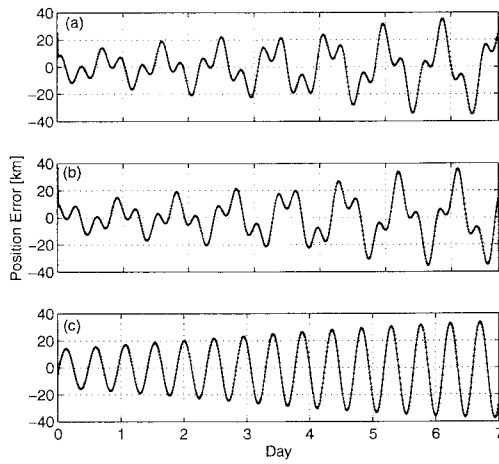


그림 2. 방송궤도력을 이용한 GLONASS 7일 예측궤도 성분별 오차-PRN 13. (a) X 좌표오차, (b) Y 좌표오차, (c) Z 좌표오차

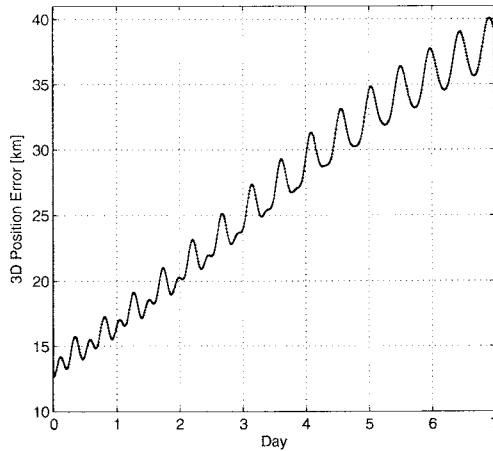


그림 3. 방송궤도력을 이용한 GLONASS 7일 예측궤도 3차원 오차-PRN 13.

하였다. 이 논문에서는 태양과 달의 인력에 의한 섭동은 고려하지 않았으며, 적분 간격은 10초로 하였다.

4. GLONASS 위성의 예측궤도 정확도 평가

GLONASS 예측궤도의 정확도 평가는 아래와 같은 방법으로 진행하였다. 먼저 2008년 9월 17일 방송궤도력을 이용하여 9월 18일부터 24일까지 총 7일간의 예측궤도를 생성하였다. 정밀궤도력 데이터가 15분 간격으로 주어지기 때문에 동일한 시점에서의 좌표 비교가 가능하도록 해당 데이터에

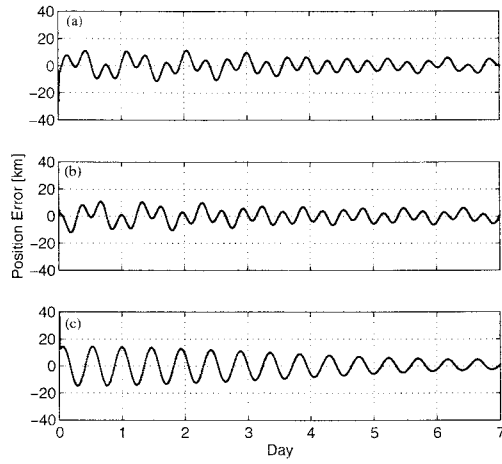


그림 4. 방송궤도력을 이용한 GLONASS 7일 예측궤도 성분별 오차-PRN 20. (a) X 좌표오차, (b) Y 좌표오차, (c) Z 좌표오차.

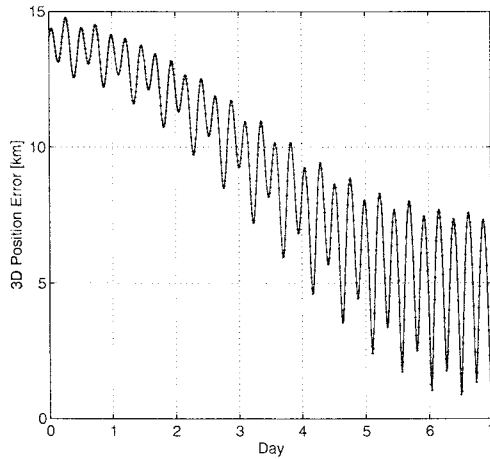


그림 5. 방송궤도력을 이용한 GLONASS 7일 예측궤도 3차원 오차-PRN 20.

포함된 12개 위성의 좌표를 10초 간격으로 적분하고, 그 결과 중에서 15분마다의 결과값을 비교대상으로 사용하였다. 생성한 예측궤도 결과를 동일한 시점의 정밀궤도력과 비교하여 PZ-90 좌표계 상의 X, Y, Z 성분별 좌표오차와 3차원 좌표오차, RMS 오차를 산출하였다.

그림 2는 9월 17일 방송궤도력에 포함된 12개 위성 중 PRN 13 위성의 X, Y, Z 성분별 좌표오차를 나타낸 것이다. 그림 2에서 보듯이 X, Y, Z 성분별 좌표오차가 $\pm 40\text{km}$ 범위 내로 나타났다. 1일 경과 후에는 $\pm 20\text{km}$ 의 좌표오차가 나타났으며, 7일 경과 후에는 $\pm 40\text{km}$ 까지 좌표오차가 점차 증가하는 것을 확인할 수 있었다. Z방향의 좌표오차가 X, Y 방향의 좌표오차보다 다소 큰 것을 확인할

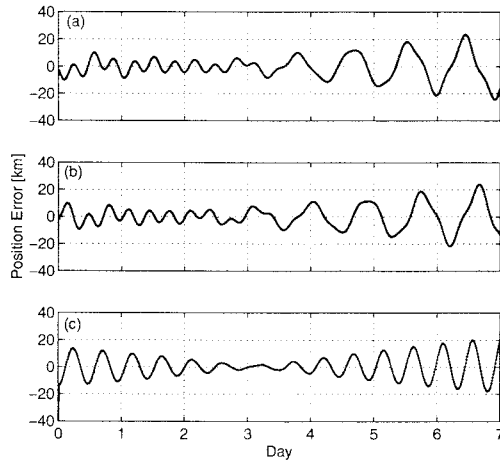


그림 6. 방송궤도력을 이용한 GLONASS 7일 예측궤도 성분별 오차-PRN 23. (a) X 좌표오차, (b) Y 좌표오차, (c) Z 좌표오차.

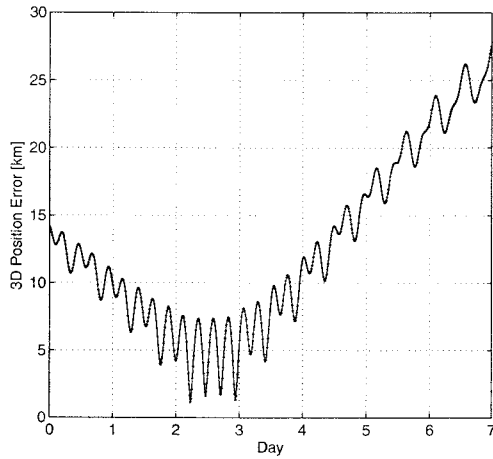


그림 7. 방송궤도력을 이용한 GLONASS 7일 예측궤도 3차원 오차-PRN 23.

수 있으며, X, Y 좌표오차의 경우 유사한 패턴으로 주기성이 발견되는 것을 확인할 수 있었다. 그림 3은 PRN 13의 방송궤도력을 이용한 GLONASS 7일 예측궤도의 3차원 오차를 나타낸 것이다. X, Y, Z 성분별 오차와 마찬가지로 3차원 오차도 시간이 지날수록 점차 증가하는 경향이 나타났다.

그러나 9월 17일 방송궤도력 파일에 포함된 12개 모든 위성에서 일관적으로 오차가 증가하는 경향이 나타나는 것은 아니었다. 오차가 감소하기도 하고, 감소하다가 다시 증가하는 경향이 나타나기도 했다. 그림 4는 오차가 감소하는 현상이 나타났던 PRN 20의 7일 예측궤도 X, Y, Z 성분별 좌표 오차이며, 그림 5는 3차원 오차이다. 또한 그림 6과 7은 오차가 감소하다가 다시 증가하는 경향이 나

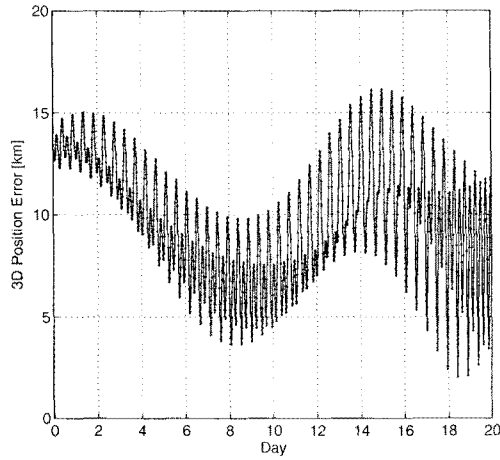


그림 8. 방송궤도력을 이용한 GLONASS 20일 예측궤도 3차원 오차-PRN 24.

표 3. 방송궤도력을 이용한 GLONASS 예측궤도 3차원 오차 통계.

경과날짜	최대(km)	RMSE(km)
1	17.4	14.3
2	21.0	13.9
3	25.1	13.8
4	29.3	14.0
5	34.4	14.5
6	37.7	15.1
7	40.1	15.7

타난 PRN 23 위성의 X, Y, Z 성분별 좌표오차와 3차원 오차를 나타낸다. 이 연구에서 사용한 9월 17일 방송궤도력에 포함된 12개 위성 중에서 3차원 오차가 증가하는 경향을 나타낸 위성의 개수는 6개, 감소하는 경향을 나타낸 위성의 개수는 4개, 그리고 감소하다가 증가하는 경향을 나타낸 위성의 개수는 2개로 불규칙적으로 나타났다.

이러한 현상에 대한 자세한 분석을 위해 오차가 감소하는 경향을 보였던 PRN 24번의 20일 예측궤도를 생성하고 3차원 오차를 산출하였다(그림 8). 그 결과, 궤도오차가 감소하는 경향이 지속적으로 나타나는 것이 아니라 일시적인 현상임을 확인하였다. 이러한 변화는 일정한 주기성을 나타내는 것이 아닌 가변적인 것으로 판단된다.

표 3은 방송궤도력을 이용하여 만든 12개 위성의 예측궤도에 대한 3차원 오차의 통계를 나타낸 것이다. 12개 위성에 대한 3차원 오차의 최대값과 RMS 오차를 1일부터 7일까지 누적하여 나타내었으며, 이를 통해 시간이 경과함에 따라 오차가 변화하는 정도를 확인하였다. 표 3에서 보듯이 1일 경과 후와 7일 경과 후 12개 위성의 예측궤도에서 나타난 최대오차가 각각 17.4km, 40.1km로 나타났으며, RMS 오차의 평균값은 14.3km, 15.7km로 나타났다. 앞서 살펴본 바와 같이 모든 위성에서 오차를 증가하는 경향이 나타난 것이 아니기 때문에, 시간이 경과함에 따라 RMS 오차의 크기가 일관

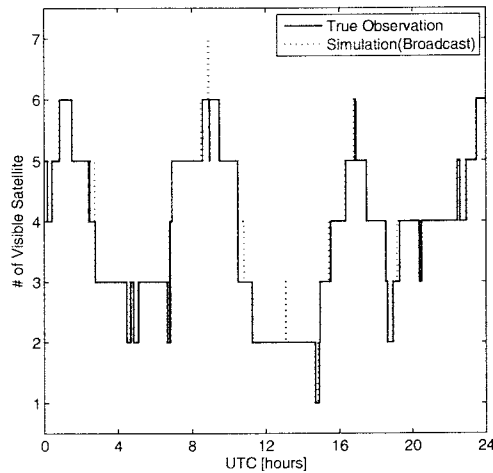


그림 9. 실제관측과 예측결과 산출된 가시위성 개수 비교.

적으로 증가하지는 않는 것을 알 수 있다.

5. GLONASS 위성의 가시성 분석

방송궤도력으로 생성한 예측궤도의 추가적인 정확도 검증과 가시성 평가를 수행하기 위하여, 예측궤도를 통해 계산한 가시위성의 개수와 실제 관측된 가시위성의 개수를 비교하였다. 관측지점은 GLONASS 위성신호의 수신이 가능한 장비가 설치되어 있는 IHU2 관측소로 선정하였다. IHU2는 인하대학교 4호관 옥상에 위치하고 있으며, 인하대학교 지리정보공학과 GPS 연구실에서 연구 목적으로 설치한 상시관측소이다. Trimble NetR5 수신기와 TRM41249.00 안테나로 구성되어 있으며, 1초 간격으로 매시간 관측자료를 생성하고, 임계고도각 10°를 사용하고 있다. IHU2 주변에는 신호차폐 요소가 거의 없기 때문에 시야각 확보는 양호한 편이지만, 몇몇 건물들이 낮은 고도각에 위치하고 있다.

먼저 9월 17일 방송궤도력 데이터를 이용하여 18일 24시간의 위성좌표를 1초 간격으로 수치적 분하여 PZ-90 좌표계의 위성좌표 X, Y, Z를 계산한 후, WGS84 좌표계 기준의 좌표로 변환하였다. 그리고 위성과 관측지점 IHU2의 좌표차이인 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 를 계산하였다. 관측지점의 경위도 좌표를 이용하여 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 를 남북, 동서 그리고 수직좌표계(NEU: North, East, and Up)로 변환하였으며, $\Delta N, \Delta E, \Delta U$ 를 이용하여 각 위성의 방위각, 고도각을 산출하였다. 방위각, 고도각을 이용하여 산출한 매초의 가시위성의 개수를 실제 관측된 가시위성 개수와 비교하였으며, 그 결과를 그림 9에 나타내었다. 그림 9에서 실선은 라이넥스(RINEX, Receiver Independent Exchange Format) 관측파일에 기록된 실제 가시위성의 개수를 나타내며, 점선은 방송궤도력을 이용하여 생성한 예측궤도를 통해 산출한 가시위성의 개수를 의미한다. 또한 가로축은 시간(UTC)을 의미하며 세로축은 가시위성의 개수를 나타낸다. 그림 9에서 보듯이 실제 관측된 가시위성의 개수와 방송궤도력을 이용하여 생

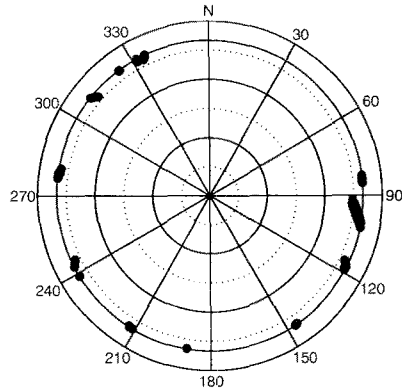


그림 10. 실제관측과 예측결과가 일치하지 않는 위성의 궤적(skyplot).

성한 예측궤도로 계산한 가시위성의 개수가 거의 일치하는 것을 확인할 수 있으며, 이를 통해 이 연구에서 생성한 예측궤도가 가시성 분석에는 문제가 없을 수준의 정확도를 달성했음을 알 수 있다. 실제로 3장에서 수행한 예측궤도의 정확도 평가 결과 산출된 최대오차인 40km를 시야각으로 환산했을 때, 방위각 $1'9''$, 고도각 $22''$ 로 나타났으며, 이와 같은 수치는 가시성 분석에 크게 영향을 미치지 않는 수준임을 알 수 있다.

그러나 예측한 가시위성의 개수보다 실제 관측된 가시위성이 1개 작게 관측되는 시간대가 존재하는 것을 그림 9에서 확인할 수 있으며, 이에 대한 원인을 파악하기 위하여 차이가 나는 위성의 궤적을 그림 10에 나타내었다. 그림 10에 나타낸 관측되지 않은 위성의 방위각과 고도각은 IHU2 관측소 주변의 낮은 고도각에 위치하고 있는 건물들의 위치와 일치한다. 방위각 약 $90 \sim 100^\circ$ 에 위치한 인하대학교 하이테크센터 15층 건물, 약 $270 \sim 330^\circ$ 에 위치한 5층 건물의 3호관에서 약 5m 더 높이 올라온 건물의 일부, 그리고 2, 4호관 옥상의 구조물들이 영향을 미친 것으로 판단된다. 따라서 실제 관측과 예측결과가 다른 이유는 위성의 예측궤도의 정확도가 낮기 때문이 아니라, 건물 등에 의해 고도각 15° 이하의 위성신호가 차폐되었기 때문인 것으로 판단된다.

6. 결론

이 연구에서는 GLONASS 방송궤도력을 이용하여 예측궤도를 생성하고, 그 정확도를 평가하였다. 예측궤도는 위성의 운동을 나타내는 미분방정식을 제 4차 Runge-Kutta 방법으로 수치적분함으로써 생성하였다. 7일간의 예측궤도를 생성한 결과를 정밀궤도력 좌표와 비교하였으며 X, Y, Z 성분별 좌표오차와 3차원 좌표오차를 산출하였다. 그 결과 7일 경과 후 최대오차는 40.1km로 나타났으며 12개 위성에 대한 RMS 오차의 평균값은 15.7km로 나타났다. 그러나 위성에 따라서 오차가 증가하는 경향과 감소하는 경향, 감소하다가 증가하는 경향 등이 불규칙적으로 나타났으며, 오차의 증가량과 감소량도 위성에 따라 다르게 나타나 일관성이 낮은 것을 확인할 수 있었다. 예측궤도의 추가적

인 정확도 검증과 가시성 분석에의 활용 가능성을 타진하기 위하여 실제관측과의 비교를 수행하였다. 예측궤도와 관측지점의 위치를 이용하여 방위각, 고도각을 계산하고 가시위성의 개수를 산출하였으며, 이를 실제 관측된 위성의 개수와 비교하였다. 그 결과, 관측지점 주변의 낮은 고도각에 위치하는 건물들에 의한 영향을 제외하고 예측궤도를 이용하여 산출한 가시위성의 개수와 실제 관측된 위성의 개수가 일치하는 것을 확인하였다.

이 연구에서는 GPS를 제외하고 현재 이용할 수 있는 유일한 위성항법시스템인 GLONASS의 위성궤도를 예측하고 그 정확도를 검증하여 이를 다양한 연구에 활용할 수 있는 가능성을 제시하였다. 4개 이상의 GPS 위성신호 수신이 어려운 중고층 건물이 밀집한 도심공간에서는 GLONASS 위성신호를 동시에 수신할 경우 측위가 가능하게 될 것이다. 따라서 이 연구에서 수행한 궤도모델을 통해 가시성의 개수와 위성의 기하학적 배치 상황을 미리 예측하고 최적의 측정점과 시간을 선정할 수 있을 것이며, 그 활용성이 매우 높을 것으로 예상된다.

감사의 글: 이 연구는 2008년 기초기술연구회 협동연구사업비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 김혜인 2009, 석사학위논문, 인하대학교
- 남기욱, 허문범, 심주영 2007, 항공우주산업기술동향, 5, 65
- 남두희, 최윤수, 유기운, 황호현, 박관동, 조성길, 김재열, 김광호, 양성철, 이정호, 김정옥, 허용, 변영기, 천향선, 사석재, 이상준 2005, 건설교통부 연구보고서, 22-1500000-001487-01
- 서용철, 이양원 2007, 한국측량학회지, 25, 231
- 송종화, 지규인, 정성균, 이상욱, 김재훈 2008, 한국항공우주학회지, 36, 171
- 유경호, 강태삼, 성상경, 이은성, 정성균, 신천식, 이상욱, 이영재 2007, 한국항공우주학회지, 35, 1095
- 이동락, 이홍규, 배경호 2005, 한국측량학회지, 23, 283
- Bazlov, Y., Galazin V., Kaplan B., Maksimov, V., & Roguzin, V. 1999, GPS World, 10, 54
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. 2007, GNSS-Global Navigation Satellite Systems (New York: Springer-Verlag), p.341
- Roßbach, U. 2000, Schriftenreihe der Universität der Bundeswehr München
- Suh, Y. -C. & Shibasaki, R. 2007, IEICE Transactions on Communications, E90-B, 1816