

GPS 방송궤도력 오차의 장기간 변화 분석

An Analysis on the Long-Term Variation of the GPS Broadcast Ephemeris Errors

김민규·김정래*

한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

Mingyu Kim · Jeongrae Kim*

School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Gyeonggi-do 412-791, Korea

[요 약]

GPS 위성의 궤도는 GPS에서 송신하는 항법메시지를 이용하여 계산할 수 있는데, 본 논문에서는 미국 NGA 정밀궤도력을 실제 궤도로 가정하고 방송궤도력으로 계산한 위성궤도 및 시계와의 차이를 계산하였다. 2004년부터 2013년까지 전 세계와 한반도에 서의 궤도오차를 파악하기 위해 한반도에서 관측되는 위성을 별도로 계산하였다. 그 결과 한반도에서 궤도오차가 4 cm, 의사거리 오차가 3 cm 더 작았다. 10년간 GPS 위성의 종류별 궤도오차를 계산하였는데, Block IIA와 IIF의 SISRE 오차가 2.8배 차이가 나는 것을 확인하였다. 위성의 궤도오차와 그림자조건의 상관관계를 분석하였으며 그림자 내부에 있을 때 궤도오차가 2.1% 더 크게 나타났다. 태양활동 및 지자기활동과의 상관관계 분석도 수행하였는데, 2004년부터 2008년까지는 F10.7과 궤도오차가 큰 상관관계를 가지고 있지만 2009년부터 상관관계가 낮아지는 것으로 나타났다.

[Abstract]

GPS satellite positions can be obtained from the navigation message transmitted from the GPS satellite. In this paper, the accuracy of broadcast orbit and clock are analyzed by comparing with the NGA precise ephemeris. For analyzing global and local orbit errors in 2004 to 2013, GPS satellite visibilities are calculated in Korea. Local RMS of 3D orbit error and SISRE are 4 cm and 3 cm less than global RMS of 3D orbit errors and SISRE. Orbit and clock errors are calculated for each GPS satellite Block for 10 years. SISRE of Block IIA satellites are 2.8 times greater than Block IIF satellites. The correlation between orbit errors and shadow condition is analyzed. The orbit errors in shadow is 2.1% higher than that in sunlight. Correlation analysis between the orbit errors and solar/geomagnetic index shows that orbit errors has a high correlation with from 2004 to 2008. However, the correlation became low since 2009.

Key word : Broadcast ephemeris, NGA precise ephemeris, Orbit and clock error, SISRE.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2014.18.5.421>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 8 September 2014; Revised 23 October 2014

Accepted (Publication) 7 October 2014 (30 October 2014)

*Corresponding Author; Jeongrae Kim

Tel: +82-2-300-0110

E-mail: jrkim@kau.ac.kr

I. 서론

GPS (global positioning system) 위성의 궤도는 GPS에서 송신하는 항법메시지의 방송궤도력 (broadcast ephemeris)을 이용하여 계산할 수 있다. 하지만 이러한 방법은 수 미터의 오차를 유발한다고 알려져 있어 정밀측위에는 부적합한 면이 있다. 방송궤도력에는 궤도정보가 케플러 궤도요소 및 섭동항으로 저장되어 있으며 이를 이용하여 위성의 궤도를 계산할 수 있다.

GPS위성의 궤도를 계산하는 다른 방법으로는 IGS (international GNSS service) 또는 NGA (national geospatial-intelligence agency)에서 제공하는 정밀궤도력을 이용하는 방법이 있다. IGS는 정밀한 GNSS 궤도력을 제공하기 위해 전 세계 기관이 연합한 단체로, 400여개의 관측소가 참여하여 GPS 위성의 위치데이터를 수신하고 종합하여 정밀도가 최대 5cm인 정밀궤도를 생산한다[1]. IGS 이외에 정밀궤도력을 제공하는 기관으로 미국의 NGA가 있다. NGA는 미공군 및 국방부에 지리 공간 정보를 제공하는 기관으로, 전 세계 16개 관측소에서 수신된 GPS 데이터를 종합하여 5cm 수준의 정밀도를 가지는 정밀 궤도력을 제공한다[2]. NGA는 현대화 계획의 일환으로 L-AII (legacy accuracy improvement initiative), OCX (operational control system), 그리고 AEP (architecture evolution plan)를 수행하였다. GPS 데이터 수신량 증가 및 수신 범위 증가를 도모하기 위해 L-AII 계획에 따라 2008년까지 관측소를 6개에서 16개로 확장하였으며 2008년부터 OCX 계획이 진행되어 Block IIR과 IIR-M을 본격적으로 사용하기 시작하였다. AEP는 Block IIF 위성을 위성군에 포함하고 다른 대안의 MCS를 설치하여 기존의 MCS를 보조하는 계획으로 2011년에 완료되었다. 현재는 2019년까지 발사될 GPS 위성군에 대한 제어 및 위성군 포함 계획이 진행되고 있다.

GPS 현대화 계획으로 방송궤도력의 정밀도가 지속적으로 증가하였으며 방송궤도력의 정밀도 변화 연구도 2000년도 초반까지 활발히 진행되었다. 과거에 수행된 연구로 Langley는 1999년부터 2000년까지 방송궤도력으로 계산한 궤도의 오차를 분석하였으며[3], Warren는 1994년부터 2002년까지 방송궤도력의 연간 궤도오차 및 의사거리 오차의 경향성을 분석하였다[4]. Starr는 1994년부터 2003년까지 GPS 및 GLONASS 위성의 방송궤도력을 이용하여 연간 궤도오차를 분석하였다[5]. 위성 종류별, 그림자 조건에 따른 궤도오차 분석을 수행하고 전 세계 지역별 의사거리 오차도 계산하여 분석하였다. Cohenour는 2005년부터 2012년까지 항법메시지의 고장을 검출하여 분석하였다[6]. Montenbruck은 GNSS 시스템 및 위성 종류별 PCO (phase center offset)를 분석한 후 방송궤도력에 적용하여 2013년 한 해 GNSS 시스템의 궤도와 의사거리 오차를 분석하였다[7].

앞서 연구된 논문은 2000년도 초반까지 방송궤도력의 오차 변화 분석이 수행되었으나 이후에는 고장 검출 및 통계 변화 분석에 치중하여 궤도오차 분석이 수행되지 않았다. 따라서 본 연

구에서는 2004년부터 2013년까지 NGA 정밀궤도력을 기준으로 방송궤도력으로 계산한 위성궤도 및 시계의 차이를 비교하였다. 궤도오차에 대한 PSD (power spectral density) 분석도 수행하였다. 장기간 오차분석은 한반도에서 신호가 수신되는 위성에 대한 오차 통계값과 전체 위성의 오차 통계값을 구분하여 계산하였다. 이는 GPS 위성의 궤도오차가 위성 위치에 따라 다르기 때문에 사용자의 위치에 따라 궤도오차 통계값이 다르게 나타날 수 있기 때문이다. 이를 위해 전 세계에서 관측되는 GPS 위성과 한반도에서 관측되는 GPS위성을 분리하여 궤도오차를 계산하고 분석하였다. 위성의 종류에 따른 궤도오차 분석도 수행하였다. GPS위성의 궤도와 시계오차의 크기에 기여하는 요인을 분석하기 위해 위성의 그림자영역 및 태양활동, 지자기 활동에 따른 궤도오차를 분석하였다. 그림자 조건은 위성이 그림자의 내/외부에 있을 때로 분류하여 각 경우의 궤도오차를 계산하였다. 태양활동 및 지자기활동에 따른 궤도오차 분석을 위해 F10.7 및 Ap 지수에 따른 궤도오차도 계산하였다.

II. 데이터 분석방법

IGS와 NGA에서 제공하는 정밀궤도력에서 정의되는 위성의 위치는 약간의 차이가 존재한다. IGS 정밀궤도력은 ITRF2008 좌표계를 기준으로 위성의 질량중심에서 결정된 15분 간격의 궤도정보를 제공한다. 하지만 방송궤도력은 안테나 위상중심에서 결정된 궤도정보가 저장되어 있기 때문에 IGS 정밀궤도력을 이용하여 위치오차를 계산할 경우 PCO 보정을 수행해야 한다. 안테나 위상중심은 GPS 위성의 안테나 위상의 평균 지점으로, 위성의 질량중심과 안테나 위상중심과의 거리를 PCO라고 한다. 과거에 수행된 연구들은 각각 다른 PCO 보정을 수행하였는데, Langley는 IGS 정밀궤도력을 기준으로 2006년 이전까지 IGS에서 권고하는 PCO 값을 사용하였으며, Warren은 radial 방향의 PCO만 보정하였다. Cohenour는 PCO 보정이 수행된 NGA 데이터를 이용하였으며 Montenbruck은 위성 종류별로 연구된 PCO 값을 사용하였다. NGA에서는 GPS 위성의 질량중심에서 결정된 정밀궤도력과 위성의 안테나 위상중심에서 결정된 정밀궤도력을 제공하는데, 안테나 위상중심에서 결정된 NGA 정밀궤도력의 궤도 기준점과 방송궤도력의 궤도 기준점이 동일하다. NGA 정밀궤도력은 SP3 형식으로 위성 위치뿐만 아니라 속도정보도 제공하며 2012년 2월 이전까지는 15분 간격으로, 이후에는 5분 간격으로 위성의 궤도정보를 받을 수 있다. 본 논문에서는 NGA에서 제공하는 정밀궤도력을 이용한다.

GPS의 궤도오차는 물리적 특성이 잘 나타나는 R, A, C (radial, along-track, cross-track) 좌표로 변환하여 계산할 수 있다. R 방향은 지구중심에서 위성을 향하는 벡터로 정의되며 C 방향은 궤도면과 수직인 벡터로 정의된다. A 방향은 R과 C 방향의 외적으로 정의된다. 위성 궤도의 3D range 오차 및 SISRE

(signal-in-space range error) 오차도 계산하였다. Warren과 Cohenour은 R, A, C 방향 궤도오차를 계산할 때 ECEF→RAC로 변환하는 DCM (direction cosine matrix)을 이용하였지만, Langley, Montenbruck은 ECEF→ECI (Earth centered inertia)→RAC으로 변환하는 DCM을 사용하였다. 본 논문에서는 ECEF→ECI→RAC으로 변환하는 DCM를 계산한 후 ECEF 좌표계로 계산한 궤도오차에 곱하여 RAC 오차를 계산하였다. SISRE는 방송궤도력의 궤도와 시계오차로 발생하는 의사거리 오차를 나타내며 계산식은 다음과 같다.

$$SISRE = \sqrt{(w_R \Delta R - \Delta C \Delta t)^2 + w_{A,C}^2 (\Delta A^2 + \Delta C^2)} \quad (1)$$

여기서 ΔR , ΔA , ΔC 는 각각 R, A, C 방향 궤도오차이다. 가중치 w_R , $w_{A,C}$ 는 GNSS 위성의 고도에 종속된 함수로 radial 방향에서 1로 설정할 수 있으며, MEO 위성군에서는 1/7, GEO 위성군에서는 1/11로 설정할 수 있다[7]. GPS 위성군에 대하여 w_R , $w_{A,C}$ 는 각각 0.98, 1/7로 설정한다.

방송궤도력의 궤도 및 시계오차 크기에 기여하는 요인을 파악하기 위해 그림자영역에 따른 궤도오차 분석을 수행하였다. 이는 GPS 위성이 그림자 영역에 진입할 경우 태양입사량의 급격한 변화로 궤도결정 정확도에 영향을 주기 때문이다. 그림자 조건은 반그림자(penumbra)와 본그림자(umbra)로 나눌 수 있는데, 반그림자는 태양빛이 일부 들어가는 영역이며 본그림자는 빛이 완전하게 차단되어 있는 영역이다. 본 논문에서는 반그림자와 본그림자 조건일 경우 모두 그림자 내부에 존재하는 것으로 간주하였다. 태양반지름과 지구반지름의 합에 대한 1AU (astronomical unit)의 비를 반그림자 영역 각도로 정의하고, 태양 위치와 지구 위치를 계산한 후 위성과 태양의 외부가 이루는 각을 계산했을 때 반그림자 영역 각도보다 작을 경우 그림자 조건에 포함하였다. 모든 위성을 그림자영역 내부와 외부에 있을 때로 분류하였으며 각 경우에 대하여 궤도오차를 계산하고 상관관계를 분석하였다.

방송궤도력과 정밀궤도력을 이용하여 위성 궤도오차와 시계오차의 통계 분석을 실시할 때 오류 데이터로 인해 통계값 계산결과가 왜곡될 수 있다. 오류 데이터는 잘못된 궤도력이 수신될 때, 그리고 위성의 health 상태가 나쁠 때 발생하는데, health 상태는 궤도조정을 수행하거나 점검할 때 나빠진다. 본 논문에서는 모든 GPS 위성의 health를 검사하여 값이 0을 초과할 때 그에 부합하는 데이터를 제거하였다. 위성의 점검 및 기동이 아닌 다른 요인으로 발생한 오류 데이터 제거를 위해서 SISRE를 사용하였다. 각 데이터에 대한 SISRE를 계산한 뒤 평균과 표준편차를 계산하고 SISRE 값이 3σ (99%)를 초과한 데이터를 분석에서 제외하였다.

III. 궤도 및 시계오차 분석

3-1 단기간 오차 분석

하루 동안 전 세계에서 관측되는 GPS 위성의 방송궤도력과 NGA 정밀궤도력을 이용하여 궤도 및 시계오차를 계산하였다. 2013년 9월 20일 PRN 20번의 ECEF X, Y, Z 방향 궤도오차를 계산하여 그림 1에 제시하였다. 각 궤도의 RMS 오차는 0.39 m, 0.37 m, 0.38 m로 비슷하게 나타났다. 궤도오차는 12시간 주기를 가지며 변화하는 경향이 있는데, 이는 GPS 위성의 궤도주기가 12시간이기 때문이다. 그림 2는 R, A, C 방향 궤도를 계산한 것인데, 각각의 RMS 오차는 0.06 m, 0.59 m, 0.29 m로 R 방향이 가장 작게 나타났다. 이는 방송궤도력을 결정할 때 GPS의 의사거리(pseudorange)를 측정하는데, 의사거리 민감도가 R 방향에서 더 크기 때문이다. PRN 20번 위성의 3D 궤도와 시계오차는 그림 3에 제시되어 있는데, 3D 궤도오차의 RMS 오차는 0.66 m, 시계의 RMS 오차는 0.28 m으로 궤도오차가 시계오차보다 더 크게 나타났다. 모든 GPS 위성에 대한 궤도 및 시계의 RMS 오차를 계산하여 그림 4에 제시하였다. 궤도의 RMS 오차는 R, A,

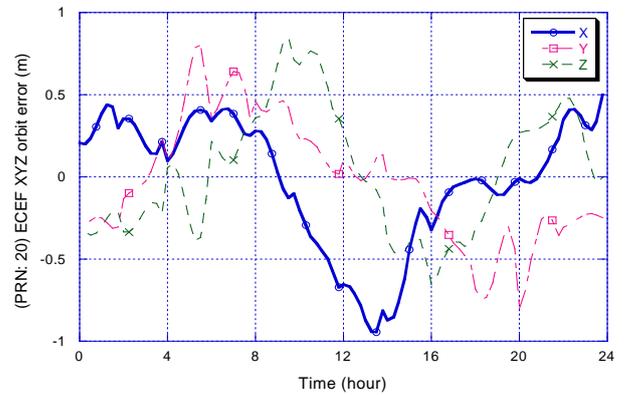


그림 1. PRN 20번의 ECEF XYZ 궤도오차 및 시계오차 변화 (2013년 9월 20일)

Fig. 1. ECEF XYZ broadcast orbit and clock error time series of PRN 20 (September 20, 2013).

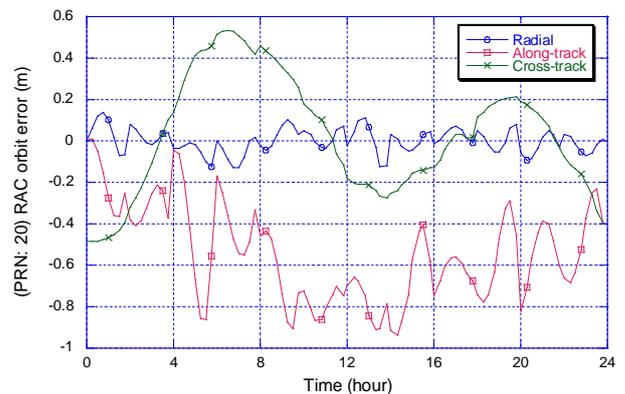


그림 2. PRN 20번의 궤도오차 변화 (2013년 9월 20일)

Fig. 2. Broadcast orbit error time series of PRN 20 (September 20, 2013).

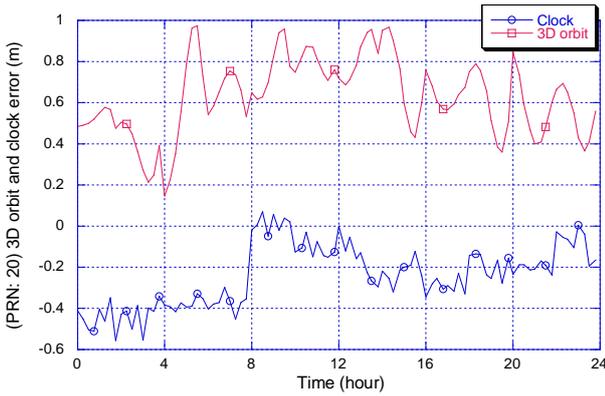


그림 3. PRN 20번의 3D 궤도 및 시계오차 변화 (2013년 9월 20일)

Fig. 3. 3D orbit and clock error time series of PRN 20 (September 20, 2013).

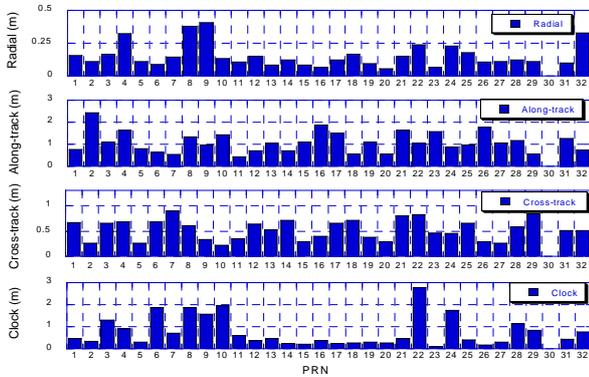


그림 4. 모든 PRN의 R, A, C 방향 궤도 및 시계의 RMS 오차 (2013년 9월 20일)

Fig. 4. Broadcast orbit and clock RMS errors (20 September 2013), all PRN.

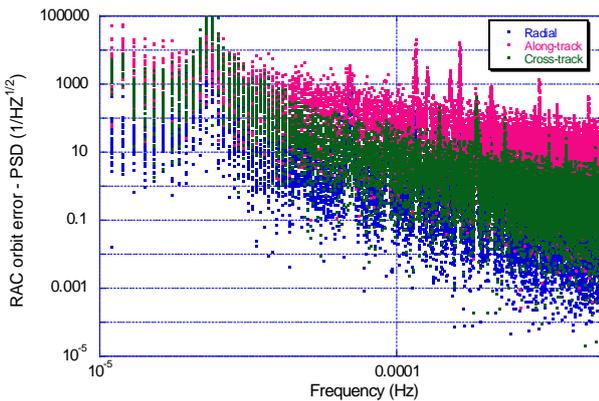


그림 5. 모든 위성의 궤도 및 시계오차의 PSD (2013년 9월 20-30일)

Fig. 5. PSD of broadcast orbit and clock error (September 20-30, 2013), all PRN.

C 방향에서 각각 0.16 m, 1.08 m, 0.53 m이며, 시계오차는 0.73 m이다. R 방향과 시계에서 위성간 오차가 크게 나타났는데, PRN 11-21까지 위성의 R 방향 오차는 평균이 0.18 m인 반면, PRN 8과 9의 평균값은 0.41 m이다. 이는 PRN 11-21과 PRN 8-9 위성의 종류 차이로 발생하였다고 분석할 수 있다.

다음으로 2013년 9월 20일부터 30일까지 10일간 모든 위성의 궤도오차를 계산하여 PSD 분석을 수행하였다. 그림 5를 보면 PSD의 최대값이 약 2.32×10^5 Hz에서 발생하였는데, 이는 위성의 궤도주기인 약 43,200 s에 해당한다. 즉, 궤도오차 최고치의 주기는 GPS 위성궤도의 한 주기이다. 또한 7×10^5 Hz 부근에서도 모든 방향에서 극값이 발생하였는데, 이는 궤도주기의 1/3에 해당한다. PSD의 크기는 A 방향에서 가장 크게 나타났다.

3-2 위성 종류별 궤도오차

GPS 위성 종류별 궤도 및 시계의 RMS 오차를 계산하여 표 1에 제시하였다. Block II는 2004년부터 2007년까지 존재하는 위성에 대하여 오차를 계산하였다. 오차 계산 결과 Block II 위성의 궤도 및 시계오차가 가장 크게 나타났으며 특히 시계오차에 대하여 GPS 위성의 2세대(II, IIA)와 3세대(IIR)의 차이가 0.80 m로 크게 나타났다. 이들은 각각 다른 시계를 가지고 있는데, Block II와 IIA는 2개의 세슘 원자시계와 2개의 루비듐 원자시계를 가지고 있지만 IIR 위성은 루비듐 원자시계만을 가지고 있다. Block IIR 위성에 탑재된 루비듐 원자시계는 Block II/IIA 위성의 원자시계보다 주파수 안정이 더 뛰어나[8] 시계오차가 더 작은 것으로 분석된다. IIR-A와 IIR-B 위성의 궤도오차 크기는 최대 0.06 m로 비슷하였으며 IIF 위성은 R 방향을 제외하고 모든 궤도오차의 크기가 작았다. SISRE 또한 2세대 위성과 3세대 위성에서 차이가 큰데, SISRE가 R방향 궤도 및 시계오차의 변화에 민감하기 때문이다. 이는 Block II와 IIA간 A, C방향 궤도오차의 차이가 크지만 R방향 궤도, 시계오차의 차이는 상대적으로 작아 SISRE의 차이가 작은 것과 비교할 수 있다.

표 1. GPS 위성 종류별 궤도, 시계 및 SISRE의 RMS 오차 (2004-2013)

Table 1. RMS of broadcast orbit, clock, and SISRE for different GPS types (2004-2013).

	II	IIA	IIR-A	IIR-B	IIR-M	IIF
R (m)	0.57	0.41	0.17	0.17	0.15	0.19
A (m)	2.70	2.15	1.37	1.35	1.25	1.20
C (m)	1.63	0.80	0.69	0.63	0.49	0.37
T (m)	1.63	1.41	0.61	0.60	0.58	0.51
3D (m)	3.20	2.33	1.54	1.50	1.35	1.27
SISRE (m)	1.75	1.42	0.65	0.63	0.61	0.56

IV. 전세계와 한반도에서 관측되는 오차 분석

2004년부터 2013년까지 전 세계와 한반도에서의 궤도, 시계, 3D 궤도, SISRE의 RMS 오차를 계산하였다. 전 세계에서의 궤도 및 시계오차는 방송궤도력에 포함된 모든 위성의 데이터를 이용하여 계산하였다. 한반도에서의 궤도 및 시계오차는 한반도 내에서 허용 고도각을 5°로 설정하여 가시위성을 선정한 후, 가시위성에 대한 데이터를 이용하여 계산하였다.

위성의 위치에 따른 궤도오차는 사용자의 위치에 따른 SISRE 값에 영향을 줄 수 있으며 이는 전 세계 특정 지점에서 계산한 SISRE와 한반도에서 계산한 값에 차이를 유발할 수 있다. 이에 대한 분석을 수행하기 위하여 전 세계를 경도 60°, 위도 40° 간격으로 나누고 각 지점에서 2013년 한 해의 SISRE를 계산하였다. 그림 6은 30개 지점에서 SISRE의 95%를 계산한 결과이다. SISRE의 평균은 0.95 m, 한반도에서는 0.93 m로 전 세계 평균값보다 작았다. 표 2에서 전 세계 모든 GPS 위성을 고려하였을 경우, 한반도에서 관측가능한 GPS 위성을 고려한 경우보다 모든 방향 및 시계오차가 크다. 각 방향별로 오차를 분석하면 R, A, C 방향 및 시계 오차는 각각 5.4%, 2.2%, 1.3%, 2.2%의 차이가 발생하였으며 3D 궤도오차는 2.1%, SISRE는 2.9%의 차이가 발생하였다. 한반도에서 관측가능한 위성을 고려하였을 때 오차가 더 작은 이유는 오산에 설치된 NGA의 관측소에 의해 한반도 상공에서의 GPS 궤도정확도가 향상된 것으로 추정된다.

연간 궤도의 RMS 오차는 그림 7과 같은데, R, A 방향은 모두 한반도에서 오차가 2~5% 작게 나타났으며 C 방향에서는 오차의 크기가 거의 비슷하게 나타났다. 궤도 오차는 2004년부터 2008년까지 크기가 크게 감소하는 경향을 보였는데, 이는 NGA의 관측소 확장 및 3세대 위성을 사용하여 궤도 정밀도가 증가하였기 때문이다. 연간 시계와 3D 궤도의 RMS 오차는 그림 8과 같다. 전세계와 한반도에서의 3D 궤도오차의 차이는 최대 0.07 m로 나타났으며 시계오차는 항상 한반도에서 약 0.05-0.10 m 정도 더 작게 나타났다. 그림 9에서 SISRE의 차이는 감소폭

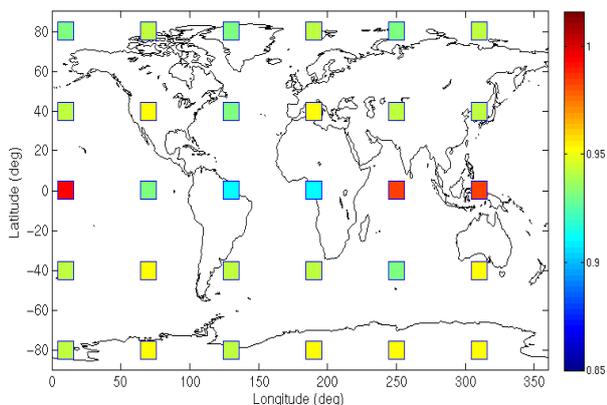


그림 6. 전 세계 30개 지점의 SISRE의 95% 오차 (2013년)
 Fig. 6. 95% SISRE of 30 points in global (2013).

표 2. 전 세계와 한반도에서의 궤도와 시계, 3D 궤도, SISRE의 RMS 오차 (2004-2013년)

Table 2. Global and local RMS of broadcast orbit, clock, 3D errors and SISRE (2004-2013).

	Global	Korea
Radial	0.30 m	0.29 m
Along-track	1.73 m	1.69 m
Cross-track	0.73 m	0.73 m
Clock	1.01 m	0.98 m
3D	1.90 m	1.86 m
SISRE	1.03 m	1.00 m

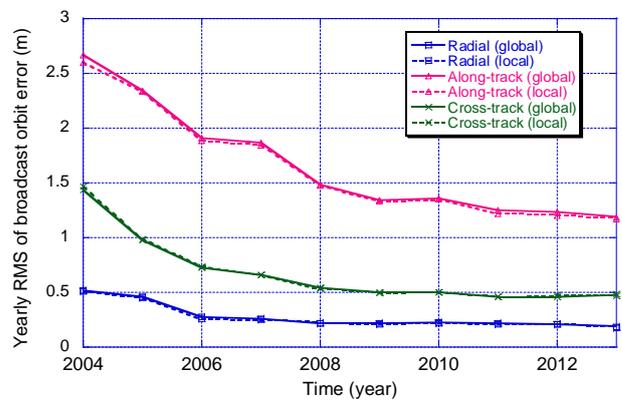


그림 7. 연간 전 세계와 한반도에서의 위성 궤도의 RMS 오차 변화 (2004-2013)

Fig. 7. Annual variation of orbit RMS errors in global and Korea (2004-2013).

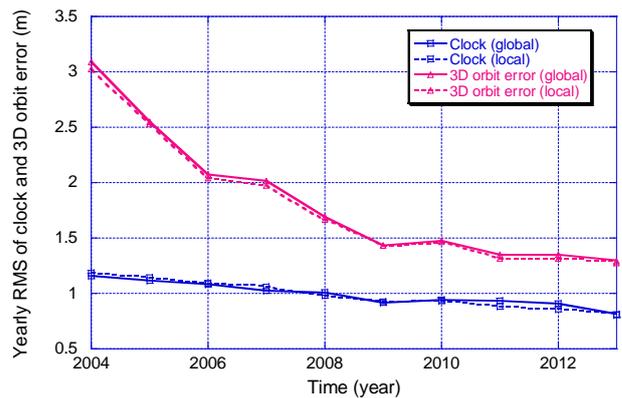


그림 8. 연간 전 세계와 한반도에서의 시계 및 3D 궤도의 RMS 오차 변화 (2004-2013)

Fig. 8. Annual variation of clock and orbit RMS errors in global and Korea (2004-2013).

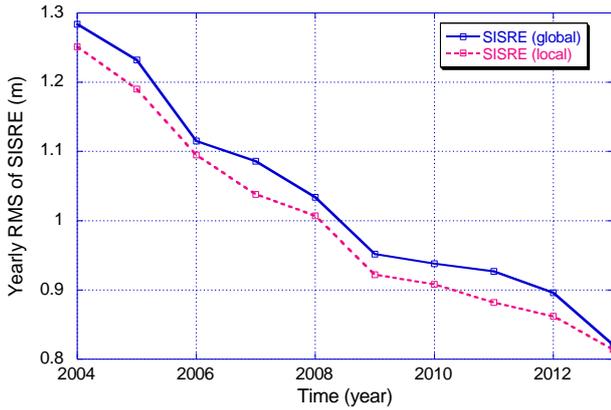


그림 9. 연간 전 세계와 한반도에서의 SISRE의 RMS 오차 변화 (2004-2013)

Fig. 9. Annual variation of SISRE RMS in global and Korea (2004-2013).

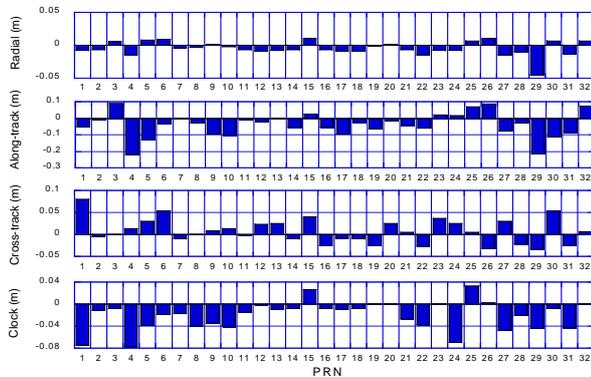


그림 10. 전 세계와 한반도에서의 모든 PRN의 궤도 및 시계오차의 차이 (2004-2013)

Fig. 10. Annual variation of orbit and clock error differences for each PRN in global and Korea (2004-2013).

이 줄어들지 않는데, 이는 매년 시계오차의 감소폭이 줄어들지 않기 때문이다. 그림 10은 10년간 전 세계와 한반도에서 모든 위성의 궤도 및 시계오차의 차이를 나타낸 것이다. 궤도오차의 차이는 A 방향에서 최대 0.22 m 수준으로 나타났으며 대부분 위성들의 궤도 및 시계오차가 한반도에서 작게 나타났다. 이에 대한 원인은 표 2의 분석결과와 동일한 것으로 판단된다.

V. 상관관계 분석

5-1 궤도오차와 그림자조건의 상관관계 분석

2004년부터 2013년까지 위성의 그림자조건을 계산하고 그림자조건에 따른 3D 궤도오차를 계산하였다. 그림자조건은 위성성이 반그림자와 본그림자 조건일 경우 그림자 내부에 존재하

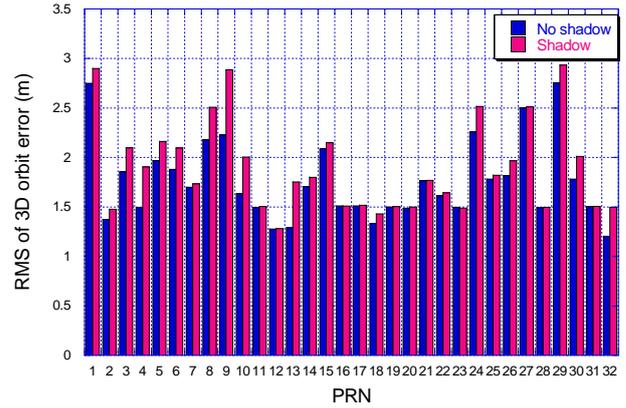


그림 11. PRN별 그림자조건에 따른 3D 궤도오차 (2004-2013)
Fig. 11. 3D orbit RMS error of each PRN in shadow and sunlight conditions (2004-2013).

는 것으로 분류하였다. 그림 11은 위성별 그림자조건에 따른 3D 궤도의 RMS 오차를 나타낸 것으로 그림자 진입시간은 전체 시간 대비 1.3% 이다. PRN 15와 19번 위성을 제외한 모든 위성에서 그림자 내부에 있을 때 3D 궤도오차가 더 큰 것을 볼 수 있다. 그림자조건에 따른 3D 궤도의 RMS 오차는 최대 0.60 m 정도 차이를 보였으며 그림자 내부에 있을 때 모든 위성에 대한 3D 오차의 RMS 값은 그림자 외부에 있을 때보다 2.1% 크게 나타났다.

5-2 태양활동 및 지자기활동과 궤도오차의 상관관계 분석

2004년부터 2013년까지 F10.7 및 Ap 지수에 따른 3D 궤도오차를 계산하였다. F10.7 지수는 태양 활동을 나타내는 지표인데, 태양 전파 방출선의 10.7 cm 파장에서 단위 진동수당 태양 전파 플럭스를 나타낸다. Ap 지수는 지자기활동 지수인 Kp의 하루 평균값이다. 미국 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)에서 제공하는 F10.7 및 Ap 데이터를 사용하여 궤도오차 계산을 계산하고 상관계수를 계산하였다. 2001년과 2012년에 극대기였던 태양 흑점주기에 따라 F10.7과 Ap 지수는 2004년부터 2008년까지 일정하게 감소하다가 2009년부터 다시 증가하기 시작하였다.

F10.7 지수에 따른 3D 궤도오차는 그림 12와 같은데, 3D 궤도오차를 2004-2008년과 2009-2013년으로 나누어서 표시하였다. 2004-2008년 사이의 궤도오차는 F10.7이 증가함에 따라 오차가 증가하는 경향을 보였으며, 2009-2013년의 궤도오차는 F10.7 값과 무관하게 일정하게 나타났다. 이는 2008년까지의 F10.7 값이 감소하면서 3D 궤도오차가 감소하였기 때문이다. 2009년부터는 F10.7 값이 증가하지만 Block IIR, IIR-M, IIF가 사용되고 2008년까지의 NGA 확장 계획이 완료되면서 궤도정밀도가 증가하여 궤도오차가 일정하게 나타난 것으로 분석된다. 2004-2008년의 F10.7과 3D 궤도의 상관계수는 0.66으로 높은 값을 나타냈지만, 2009-2013년에는 -0.24로 상관관계가 낮

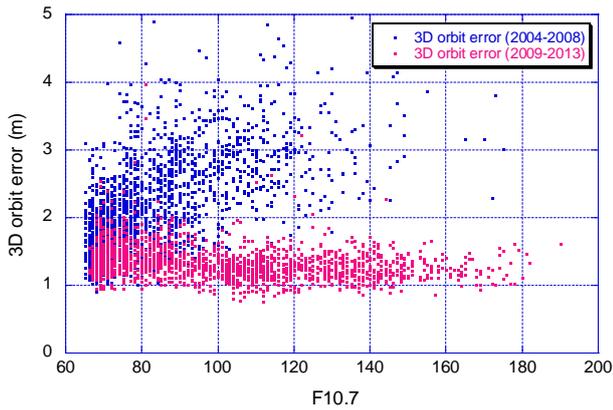


그림 12. F10.7 계수에 따른 3D 궤도오차 분포 (2004-2013)
Fig. 12. 3D orbit error versus F10.7 (2004-2013).

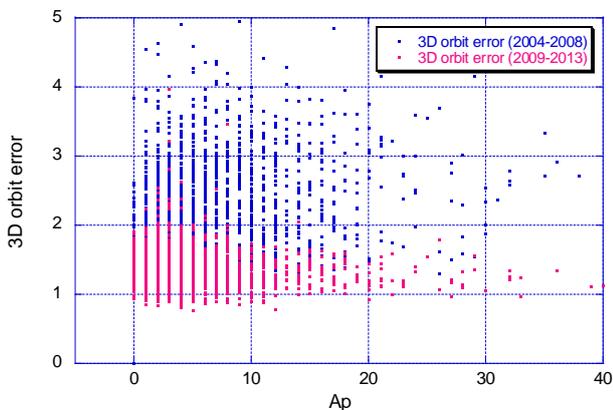


그림 13. Ap 계수에 따른 3D 궤도오차 분포 (2004-2013)
Fig. 13. 3D orbit error versus Ap (2004-2013).

은 것을 확인할 수 있다. Ap 지수에 따른 3D 궤도오차는 그림 13과 같은데, 마찬가지로 3D 궤도오차를 F10.7의 경우와 동일하게 분류하였다. Ap에 따른 3D 궤도오차는 2004-2008년, 2009-2013년의 경우 모두 상관관계가 낮은 것을 알 수 있다. Ap에 따른 3D 궤도오차의 상관계수 계산 결과 2004-2008년에서 0.17, 2009-2013년에서 -0.08로 상관관계가 매우 낮은 것을 확인할 수 있다.

VI. 결론

GPS 방송궤도력의 궤도 및 시계 정확도를 분석하였다. NGA 정밀궤도력을 기준궤도로 설정하여 오차를 계산하였으며 단기간 궤도 및 시계오차 분석을 수행하였다. 궤도오차는 R, C 방향에서 값이 작게 나타났으며 A 방향과 시계오차에서 크게 나타났다. 각 방향의 궤도오차 최고치의 주기는 위성의 한 주기와 일치하는 것을 확인하였다. 위성 종류별 궤도오차 차이에 대한 분석을 수행하였으며, Block II에서 궤도오차가 가장 크게 나타

난 것을 확인하였다. 현재 사용하는 위성만을 비교하면, 2세대 위성과 3세대 위성에서 2.8배정도의 차이를 보였으며 Block IIR-A와 IIR-B 위성의 궤도오차는 비슷하게 나타났다.

연간 GPS 궤도와 시계의 RMS 오차를 계산하였는데, 2004년부터 2008년까지 오차가 급격히 감소하는 것을 확인하였다. 전 세계에서 통계값과 한반도에서의 통계값을 비교하기 위해 10년간 전 세계 모든 위성의 방송궤도력을 이용한 궤도오차와 한반도 내의 가시위성만을 이용한 궤도오차의 비교분석을 수행하였다. 궤도오차 및 시계오차는 최대 5.4%의 차이가 있었으며 3D 궤도오차와 SISRE는 각각 2.1%, 2.9%의 차이가 나타난 것을 확인하였다.

위성별 그림자조건에 따른 3D 궤도오차를 분석하였으며 위성이 그림자 내부에 있을 때가 그림자 외부에 있을 때보다 궤도오차가 2.1% 크게 나타나는 것을 확인하였다. 궤도오차와 F10.7 및 Ap 지수와의 상관관계를 분석하였는데, 2004-2008년에 F10.7과 3D 궤도오차의 상관계수는 0.66으로 높게 나타났으나 2009-2013년에는 매우 낮은 것으로 나타났다. 이는 2008년 완료된 NGA 현대화 계획과 관련이 있는 것으로 분석된다.

감사의 글

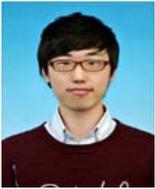
본 연구는 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단(2010-0024050)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] International GNSS Service. The IGS Product table of GNSS satellite ephemerides [Internet]. Available: <http://igsceb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>
- [2] Official U.S. Government about Global Positioning System. The NGA Modernization plan [Internet]. Available: <http://www.gps.gov/systems/gps/control/>
- [3] R. B. Langley et al., "The GPS broadcast orbits: an accuracy analysis," in *Proceeding of New Trends in Space Geodesy*, Warsaw: Poland, 2000.
- [4] D. L. M. Warren, J. F. Raquet, "Broadcast vs precise GPS ephemerides: a historical perspective," *GPS Solutions*, Vol. 7, No. 3, pp. 151-156, Dec. 2003.
- [5] M. S. B. Starr et al., "A long-term statistical analysis of the accuracy of GPS and GLONASS broadcast orbit and clock models," in *Proceedings of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation*, Long Beach: NY, pp.2095-2103, 2004.
- [6] C. Cohenour, F. V. Graas, "A GPS orbit and clock error distributions," in *Proceeding of the institute of Navigation Pacific PNT*, Honolulu: HI, pp.946-958, 2013.

[7] O. Montenbruck et al., Broadcast versus precise ephemerides: a multi-GNSS perspective, *GPS Solutions*, Online, June. 2014.

[8] M. Epstein et al., "GPS IIR rubidium clocks: in-orbit performance aspects," in *35th Annual Precise Time and Time Interval Meeting*, Clifton, pp.117-134, 2004.



김민규 (Mingyu Kim)

2013년 2월 : 한국항공대학교 항공우주공학과(공학사)

2013년 2월 ~ 현재 : 한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과 박사과정

※관심분야 : GNSS, 위성항법, 위성궤도



김정래 (Jeongrae Kim)

1991년 2월 : 서울대학교 항공우주공학과(공학사), 1993년 2월 : 서울대학교 항공우주공학과(공학석사)

2000년 : 미국 University of Texas at Austin(공학박사)

2000년 ~ 2002년 : 미국 Center for Space Research 연구원

2002년 ~ 2004년 : 한국항공우주원 선임연구원

2004년 ~ 현재 : 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 조교수

※관심분야 : GNSS, 위성항법, 위성궤도