

GPS 반송파위상 데이터를 이용한 시계오차 추출

하지현¹, 박관동^{1†}, 이창복²

¹국민대학교 삼림과학대학

²한국표준과학연구원

DETERMINATION OF CLOCK OFFSET USING GPS CARRIER PHASE MEASUREMENTS

Jihyun Ha¹, Kwan-Dong Park^{1†}, and Chang-Bok Lee²

¹College of Forest Science, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

²Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-600, Korea

E-mail: hajh@kookmin.ac.kr, kdpark@kookmin.ac.kr

(Received November 10, 2005; Accepted November 28, 2005)

요 약

세계 각국은 국제적으로 통일된 시각동기 체계를 따르고 있으며 국가표준시 유지를 위하여 GPS(Global Positioning System)를 활용하고 있다. 현재 국내 GPS 기반 시각동기 연구는 코드 데이터와 방송궤도력을 사용하고 있다. 이 연구에서는 보다 정확한 시계오차 추출을 위하여 반송파위상 데이터를 사용하였으며, 방송궤도력 뿐만 아니라 정밀궤도력, 신속궤도력, 그리고 초신속궤도력을 사용하였다. 정밀궤도력을 사용하여 산출된 시계오차를 참값으로 가정하였을 때, 신속궤도력과 초신속궤도력의 경우 약 0.5ns의 정밀도를 나타내었으며, 방송궤도력의 경우는 2ns 이하의 정밀도를 나타내었다.

ABSTRACT

Every time laboratory in the world follows an international standard time scale and GPS (Global Positioning System) is playing an important role. Korea Research Institute of Standards and Science is also operating a permanent GPS station for time transfer. To improve the accuracy and precision of the clock offsets derived from GPS we used carrier phase measurements. In addition, we tested four different kinds of GPS satellite orbits and compared the results. The precision of the time offsets using rapid and ultra-rapid orbits was about 0.5 nanoseconds (ns). In the case of broadcast orbits, the precision was better than 2 ns.

Key words: GPS, carrier phase, clock offset, GIPSY

1. 서 론

현대사회에서 GPS(Global Positioning System)는 차량, 항공, 선박 등의 항법은 물론 농업, 기상, 측지, 측량, 텔레메틱스, 시각동기 등 다양한 분야에 활용되고 있다. 이 중 GPS 기반 시각동기는

[†]corresponding author

1983년부터 국제상용통신위성인 INTELSAT과 함께 위성을 이용한 시각비교분야의 대표적인 방법으로 이용되고 있다. 국제도량형국(BIPM, Bureau International de Poids et Mesures)에서는 국제표준시각 비교에 GPS를 활용하고 있으며, 세계각국은 BIPM에서 결정한 국제표준시를 이용하여 국가표준시를 유지하고 있다. 또한 최근 급속도로 발전하고 있는 통신 분야에서도 대량의 정보를 고속으로 전송하기 위하여 송신부와 수신부의 시각동기에 GPS를 사용하고 있다.

GPS 기반 시각동기를 위해서는 GPS 관측데이터와 궤도력을 이용하여 수신기의 시계오차(clock offset)를 추출하여야 한다. 관측데이터의 종류로는 코드 데이터(C/A, P1, P2)와 반송파위상 데이터(L1, L2)가 있다(Leick 1995). 일반적으로 코드 데이터는 반송파위상 데이터에 비해 측위 정확도가 낮으며, 코드 데이터 중에서도 C/A 코드 데이터는 P 코드 데이터에 비해 정확도가 낮은 편이다. GPS 궤도력의 종류로는 정밀궤도력(precise orbits), 신속궤도력(rapid orbits), 초신속궤도력(ultra-rapid orbits), 그리고 방송궤도력(broadcast ephemeris)이 있다. 이 중 정밀궤도력은 정확도가 5cm 이하로 가장 정확하며, 신속궤도력의 정확도도 최근 정밀궤도력에 손색이 없을 만큼 급격히 향상되고 있다(박관동 등 2003). 준-실시간 데이터 처리가 가능한 초신속궤도력은 10cm 수준의 정확도를 가지며(IGS Products; <http://igs.cb.jpl.nasa.gov/>), 해당 날짜의 24시간 후까지 추정된 궤도력을 포함하고 있어 예측궤도력으로 명명되기도 한다(박관동 등 2003). 방송궤도력은 GPS 위성으로부터 수신되는 궤도력으로 실시간 취득이 가능하나 정확도가 2m 정도로 다른 궤도력에 비해 매우 낮은 편이다.

한편, 국제적으로 GPS 시각 비교에 사용되고 있는 프로그램인 RINEX-CCTF는 코드 데이터와 방송궤도력을 이용하여 시계오차를 산출하며(Defraigne & Bruyninx 2001), 이는 기존 국내 GPS 기반 시각동기 기술의 방법과 일맥상통한다. 즉, 지금까지 국내 GPS 기반 시각동기 기술은 방송궤도력과 코드데이터를 사용하였으며, 몇몇 실험을 통하여 코드 데이터를 이용한 시계오차의 정확도를 높이는 방향으로 진행되었다(허윤정 등 2003, 2004). 최근 한국표준과학연구원에서 반송파위상 데이터와 정밀궤도력을 이용한 시계오차 추출 연구를 진행 중이다.

이 연구에서는 정밀궤도력과 방송궤도력, 그리고 반송파위상 데이터를 이용하여 시계오차를 추출한 뒤 방송궤도력과 코드 데이터를 이용하여 산출된 시계오차와 비교하였다. 뿐만 아니라 신속궤도력과 초신속궤도력을 이용하여 시계오차를 추출하고 정확도를 검증하였다.

2. GPS 데이터 처리

BIPM에서 제공되는 국제원자시(TAI, International Atomic Time)는 전 세계 40여 개 시각동기 실험실(Time Laboratory)의 약 250개 원자시계로부터 정보를 수집하여 결정된다. TAI 결정에 참여하고 있는 시각동기실험실은 각 실험실 마다 고유의 UTC(Universal Time Coordinated)를 결정하는데, 이를 UTC(k)라 한다(Defraigne & Bruyninx 2001). 일반적으로 시각동기실험실에서는 원자시계와 UTC(k)의 차를 BIPM에 제공하며, BIPM은 common-view 방식으로 UTC(k) 간 시각비교를 수행한다(Defraigne & Bruyninx 2001). 각 시각동기실험실에서 시계오차 추출을 위하여 사용되는 프로그램은 RINEX-CCTF이다. RINEX-CCTF는 C/A 코드데이터 분석 국제 프로그램으로 UTC(k)와 GPS Time의 차를 CCTF(Consultative Committee for Time and Frequency) 포맷으로 저장한다. 이 연구에서는 RINEX-CCTF를 이용하여 방송궤도력과 코드데이터를 처리한 후 시계오차를

추출하였다. 이렇게 산출된 시계오차를 아래에 설명할 GIPSY-OASIS II(GPS Inferred Positioning System-Orbit Analysis and Simulation Software II, 이하 GIPSY라 칭함)의 결과와 비교하였다.

GIPSY는 JPL(Jet Propulsion Laboratory)에서 개발한 고정밀 GPS 데이터 처리 프로그램으로(Webb & Zumberge 1993) RINEX-CCTF와 달리 반송파위상 데이터를 처리할 수 있다. GIPSY의 대표적인 특징으로는 이중차분을 하지 않는 것과 정밀단독측위(Precise Point Positioning) 기법 사용이 가능하다는 것이다(Webb & Zumberge 1993). 이 연구에서는 방송궤도력을 GIPSY의 정밀단독측위 기법으로 처리한 후 산출된 시계오차를 RINEX-CCTF의 결과와 비교 하였다. 또한 네 가지 종류의 GPS 궤도력을 GIPSY로 처리하여 궤도력에 따른 시계오차를 추출하고 정확도를 검증하였다. 정밀궤도력과 신속궤도력은 JPL에서 제공하는 궤도력을 사용하였으며, 초신속궤도력은 IGS(International GNSS Service)에서 제공하는 궤도력을 사용하였다. 또한 방송궤도력은 특정 관측소의 GPS 수신기에서 생성된 궤도력이 아니라, IGS에서 제공하는 BRDC 방송궤도력을 이용하였다. 연구에 사용된 GPS 데이터는 한국표준과학연구원(KRIS)과 일본정보통신기술연구소(NICT)의 시각비교용 GPS 수신기 Ashtech Z12T에서 생성된 데이터이다(허윤정 등 2003).

3. 시계오차 추출

이 연구에는 2005년 6월 2일(DOY, Day Of Year: 153)부터 8일(DOY: 159)까지 일주일 동안의 KRIS와 NICT의 관측데이터를 이용하였다. 시계오차 산출에는 두 가지 방법을 사용하였다. 먼저 3.1절에서는 KRIS 관측소에서 생성된 데이터를 GIPSY의 정밀단독측위 방식(방송궤도력과 정밀궤도력)과 RINEX-CCTF 프로그램(방송궤도력)을 이용하였다. 다음으로, 3.2절에서는 NICT를 기준 시계(reference clock)로 정하고 네 가지 궤도력을 사용하여 GIPSY로 처리하였다. 각각의 결과를 아래에서 기술하였다.

3.1 RINEX-CCTF와 GIPSY 결과 비교

RINEX-CCTF와 GIPSY의 결과비교를 위하여 세 가지 방법이 사용되었는데 이를 궤도력, 관측 데이터, 그리고 프로그램에 따라 다음과 같이 분류할 수 있다: (a) 정밀궤도력-반송파위상-GIPSY; (b) 방송궤도력-반송파위상-GIPSY; (c) 방송궤도력-코드-RINEX-CCTF. 각 경우 산출된 시계오차 결과를 그림 1에 나타내었다. 그림 1a는 정밀궤도력-반송파위상-GIPSY의 경우이며, 그림 1b는 방송궤도력-반송파위상-GIPSY, 그리고 그림 1c는 방송궤도력-코드-RINEX-CCTF이다. 그림에서 가로축은 날짜(DOY)이며, 세로축은 시계오차이다. 주의해야 할 점은 그림 1a의 시계오차 단위는 ns(nanosecond)이며, 그림 1b와 1c는 ms(millisecond)이다.

가장 정확한 시계오차를 산출할 수 있는 (a)의 경우를 참 값으로 가정하고 (b)와 (c)의 편향(bias)을 계산하였다. 그 결과 (b)의 경우는 0.409ms, 그리고 (c)의 경우는 -7.661ms의 편향이 나타났다. 즉, 동일한 방송궤도력을 사용했음에도 불구하고 (b)와 (c)의 경우를 보면 사용된 GPS 관측데이터와 프로그램에 따라 편향의 크기가 다르게 나타났다. 또한 코드 데이터와 RINEX-CCTF를 사용한 (c)의 경우에서 반송파위상과 GIPSY를 사용한 경우보다 약 20배 정도 높은 편향이 나타났다. (a)에 대한 (b)와 (c)의 표준편차(standard deviation)는 각각 2.008ms와 3.426ms로 나타나 반송파위상 데이터를 이용할 경우 비교적 정확한 시계오차 산출이 가능함을 알 수 있다.

각종 GPS 기반 시각동기 분야에서 방송궤도력을 사용하는 가장 큰 이유는 시계오차를 준-실시

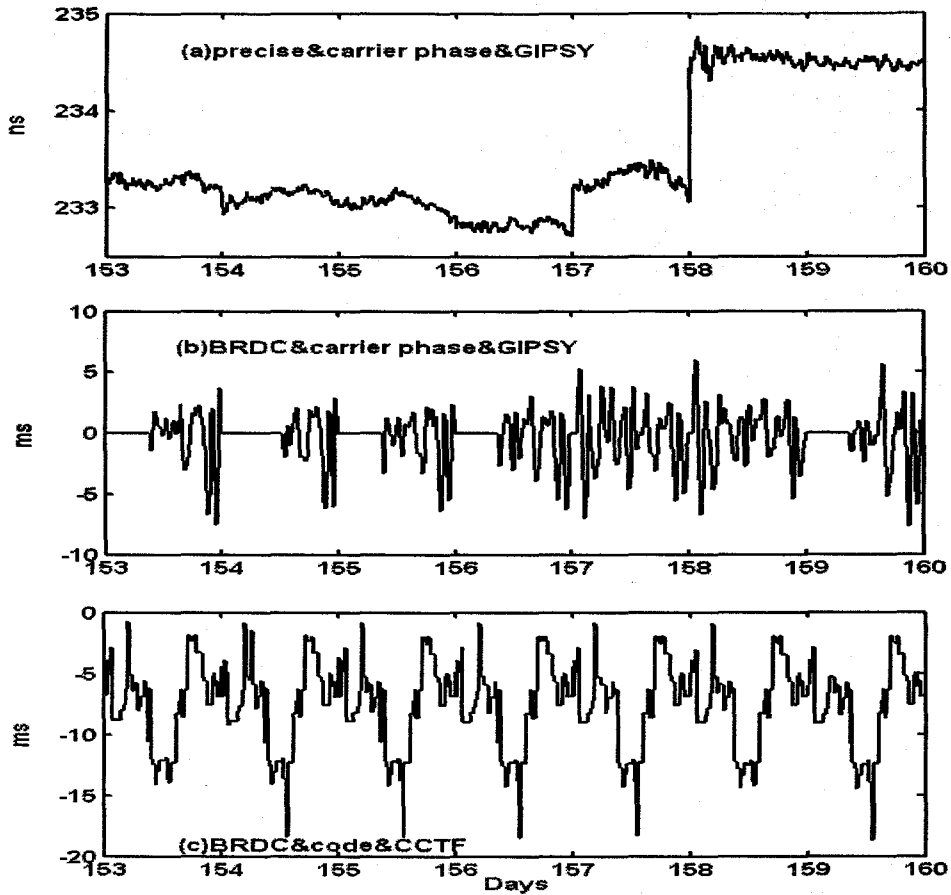


그림 1. GIPSY와 RINEX-CCTF를 이용하여 산출된 KRIS 시계오차.

간으로 추출할 수 있기 때문이다. 또한 관측데이터 중 코드 데이터의 정확도가 낮지만 데이터 처리가 비교적 쉽기 때문에 시각동기 분야에서 주로 이용되어 왔다. 그러나 준-실시간 시계오차 추출을 위하여 방송궤도력을 사용할 경우 시계오차 추출과 동시에 편향을 결정할 수 없기 때문에 시계오차에 내재된 편향을 제거할 수 없고, 이로 인하여 정확도가 낮은 결과를 산출할 수 밖에 없다. 뿐만 아니라 코드 데이터는 방송파위상 데이터에 비해 편향이 매우 크기 때문에 코드 데이터를 이용한 시계오차의 정확도는 더욱 낮아 질 수 밖에 없다.

3.2 GPS 궤도력에 따른 시계오차 결과 비교

궤도력에 따른 시계오차를 비교하기 위하여 GIPSY를 이용한 데이터 처리 시 NICT를 기준시계로 설정(관측소 좌표를 고정)하고 KRIS의 시각 정보를 추출하였다. 이 방법은 현재 한국표준과학연구원원의 GPS 기반 시각동기 연구에서 주로 사용하는 기법이다. 시계오차 추출 결과를 그림 2와 3에 나타내었다. 그림 2는 방송파위상 데이터와 정밀궤도력, 신속궤도력, 그리고 초신속궤도력을 이용하

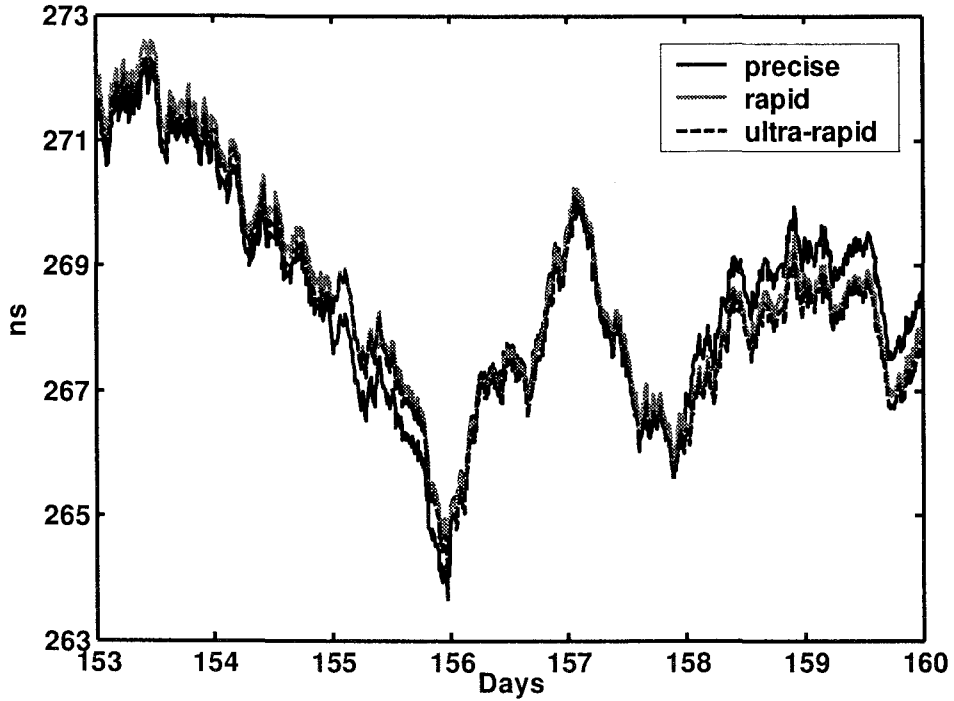


그림 2. 정밀궤도력, 신속궤도력, 초신속궤도력과 반송파위상 데이터를 이용하여 산출된 KRIS 시계오차.

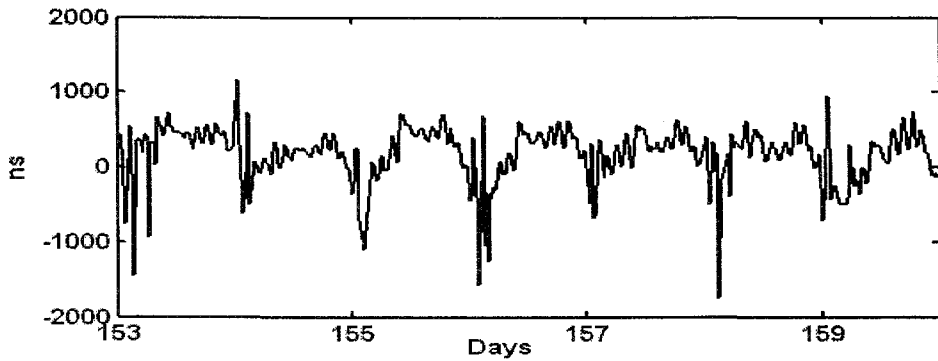


그림 3. 방송궤도력과 반송파위상 데이터를 이용하여 산출된 KRIS 시계오차.

여 산출된 시계오차를 나타낸 것이며, 그림 3은 방송궤도력의 경우이다. 그림 2의 검은색 실선은 정밀궤도력, 회색 실선은 신속궤도력, 그리고 점선은 초신속궤도력의 경우이다. 그림 2와 그림 3의 가로축은 날짜(DOY)이며, 세로축은 시계오차를 ns 단위로 나타낸 것이다.

그림 2를 보면 정밀궤도력과 신속궤도력, 그리고 초신속궤도력을 사용하였을 경우 시계오차의

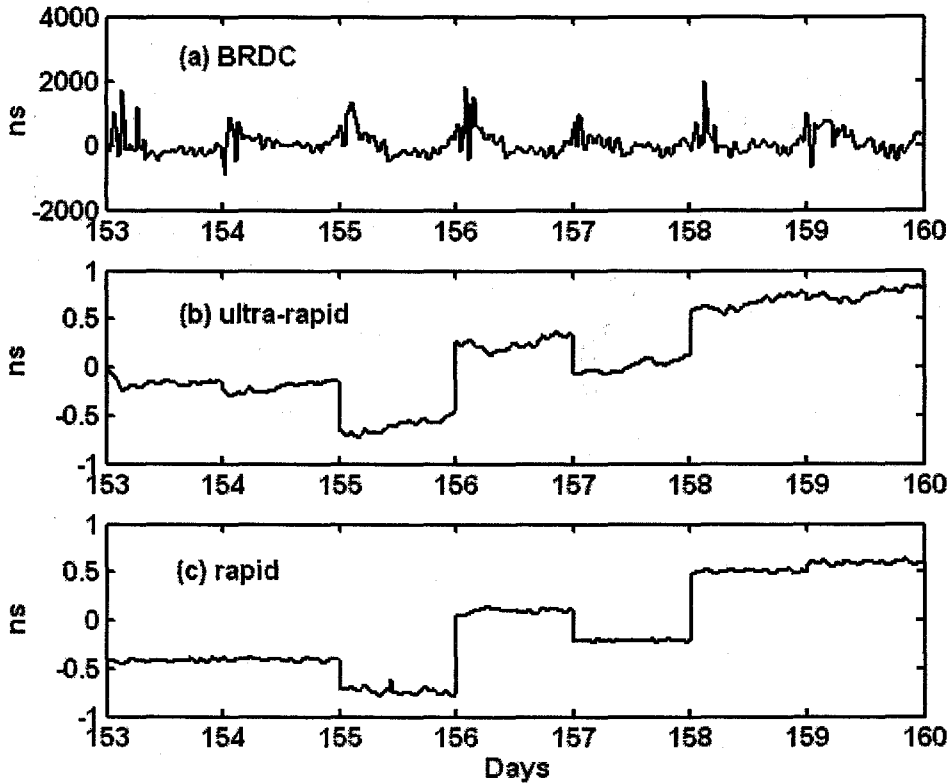


그림 4. 정밀궤도력을 이용하여 산출된 시계오차에 대한 궤도력 별 시계오차 차이.

경향은 거의 일치하며, 궤도력 간 편향이 존재함을 알 수 있다. 반면, 그림 3에 나타난 방송궤도력의 경우 그림 2와 많은 차이가 있다. 그림 2의 경우 시계오차가 263ns에서 273ns 범위 내에서 변화였으나 그림 3에 나타난 방송궤도력의 경우 -1800ns에서 1200ns 범위 내에서 변화하였다. 즉, 방송궤도력을 제외한 나머지 세가지 종류의 궤도력은 10ns의 시계오차 변동폭을 나타내었으나 방송궤도력의 경우 3 μ s(microsecond)로 다른 궤도력에 비해 300배나 높은 변동폭이 관측되었다.

그림 2에 나타난 궤도력 간 시계오차 편향과 정밀도를 분석하기 위하여 정밀궤도력에 대한 각 궤도력의 시계오차 차이 산출하였다. 그 결과를 그림 4에 나타내었다. 그림 4a는 정밀궤도력에 대한 방송궤도력 시계오차의 차이이며, 그림 4b는 초신속궤도력, 그림 4c는 신속궤도력의 경우를 나타낸다. 그림 4의 가로축은 날짜(DOY)이며 세로축은 시계오차를 ns 단위로 나타낸 것이다.

그림 4a와 비교해 볼 때, 그림 4b와 그림 4c의 경우에는 날짜 경계 지점에서 급격한 점프현상이 나타났다. 신속궤도력과 초신속궤도력을 이용할 경우 나타나는 이러한 점프현상은 시계 고유의 특징이 아니며, GIPSY를 이용한 데이터 처리시 대류층 지연 추정과정에서 발생하는 현상이다(Bar-Sever & Kroger 1996). 그 이유는 GIPSY로 데이터 처리할 때 대류층 지연은 random walk process로, 그리고 시계오차는 white noise process로 가정하고 추정하기 때문이다(Bar-Sever & Kroger 1996). 시

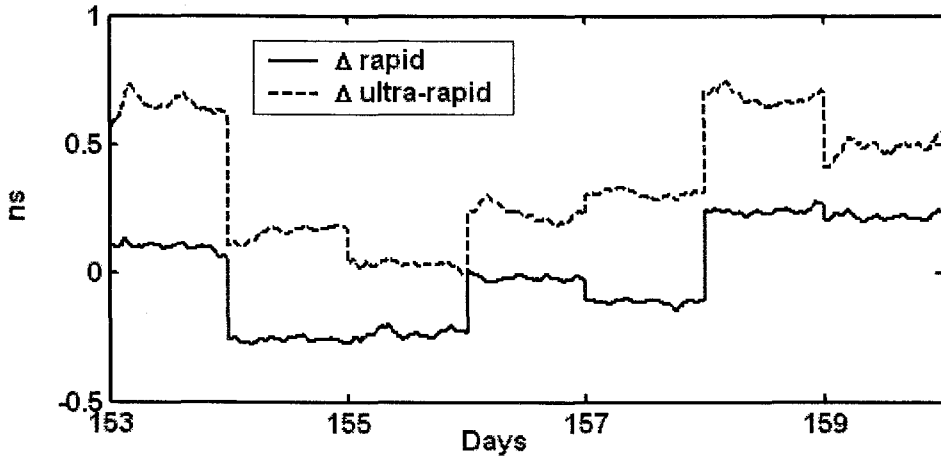


그림 5. 정밀궤도력을 이용하였을 경우 산출된 대류층 지연량에 대한 궤도력 별 대류층 지연량 차이.

계오차와 대류층 지연과의 관계를 확인하기 위하여 153일부터 일주일 동안 발생한 대류층 지연량을 산출하여 그림 5에 나타내었다. 그림 5는 정밀궤도력을 사용한 경우 산출된 대류층 지연량에 대하여 신속궤도력(실선)과 초신속궤도력(점선)을 사용한 경우 산출된 대류층 지연량의 차이를 나타낸 것이다. 가로축은 날짜(DOY)이며, 세로축은 시간단위(ns)로 변환한 대류층 지연량이다.

그림 5를 보면 그림 4와 마찬가지로 날짜가 바뀔 때 갑작스런 점프현상이 나타남을 확인할 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 GIPSY로 데이터를 처리할 때 대류층 지연은 random walk process로 가정하고 추정하기 때문에 데이터 처리 시 특정 시간에서의 대류층 지연량은 이후 시간에서의 관측치에 의존하게 되는 것이다. 그러나 24시간 중 마지막 부분의 데이터는 이후 관측치가 없으므로 날짜 별 경계지점, 즉 자정을 전후해서 대류층 추정치에는 급격한 변화가 발생하는 것이다(Bar-Sever & Kroger 1996). 반면 시계오차는 white noise process로 가정하고 추정하기 때문에 대류층 지연에 의한 오차가 흡수되어 그림 4와 같이 날짜 경계부분에서 점프현상이 나타나는 것이다. 그러므로 GIPSY를 이용한 데이터 처리시 대류층 지연량을 추정하지 않고 시계오차를 산출할 경우에는 점프현상이 관측되지 않는다. 그림 4에서 점프현상이 나타난 155일과 156일 이틀간 데이터를 선택하여 대류층 지연량을 추정하지 않고 시계오차를 추출한 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6a는 초신속궤도력을 사용하였을 경우 산출된 시계오차 차이이며, 그림 6b는 신속궤도력을 사용하였을 경우 산출된 시계오차 차이이다. 그림 6의 가로축은 날짜(DOY)이며, 세로축은 시계오차를 ns 단위로 나타낸 것이다.

그림 6을 보면 그림 4와 달리 날짜가 바뀌는 지점에서 점프현상이 나타나지 않는다. 초신속궤도력의 경우인 그림 4b와 그림 6a를 비교해 보면, 그림 4b에서는 날짜가 바뀌는 시점에서 약 1ns 정도의 점프현상이 나타났으나, 대류층 지연을 추정하지 않은 그림 6a에서는 점프현상이 관측되지 않는다. 또한 신속궤도력의 경우에도 그림 4c에서는 관측되었던 1ns 정도의 점프현상이 그림 6b에서는 관측되지 않는다. 이러한 결과로 미루어 보아 신속궤도력과 초신속궤도력을 이용하는 경우 날짜 경계부분의 점프현상은 대류층지연 추정과정에서 발생하는 것임을 확인할 수 있다. 반면, 그림 4a의 방

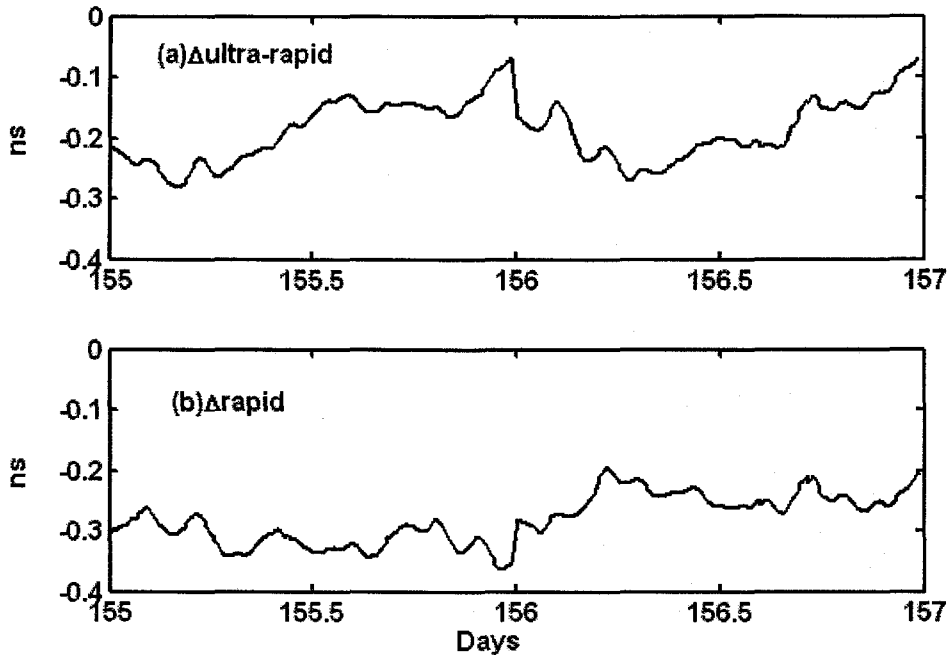


그림 6. 대류층 지연을 추정하지 않았을 경우 산출된 KRIS 시계오차.

표 1. 궤도력 별 시계오차와 좌표오차 비교.

궤도력	시계오차[ns]		3-D 좌표오차[cm]
	편향	표준편차	
신속궤도력	-0.078	0.514	5.0
초신속궤도력	-0.100	0.494	5.1
방송궤도력	50.920	1.732	1146.3

송궤도력의 경우는 시계오차의 변동폭이 3 μ s 정도이므로 변동폭에 비해 매우 작은 1ns 정도의 크기를 가지는 점프현상은 관측되지 않는다.

궤도력에 따른 시계오차 추출 결과를 종합하여 정확도와 정밀도 측면에서 분석하였다. 이 연구에서 참값으로 가정된 정밀궤도력의 시계오차에 대한 나머지 세 종류 궤도력의 결과를 분석해 보면, 동일한 관측데이터를 사용할 경우에도 궤도력의 종류에 따라 산출된 시계오차에 차이가 있으며, 그림 4에 나타낸 바와 같이 궤도력마다 크기가 다른 편향이 존재함을 알 수 있다. 그림 4에 나타낸 각 궤도력 별 시계오차의 편향과 표준편차, 그리고 3차원 좌표오차를 표 1에 나타내었다. 표 1에서 시계오차 편향과 표준편차, 그리고 좌표오차는 일주일 평균값이며, 시계오차는 ns 단위로, 좌표오차는 cm 단위로 나타내었다.

표 1을 보면 신속궤도력의 경우 편향이 평균 -0.078ns, 초신속궤도력의 경우 평균 -0.100ns의 편향이 나타나, 두 궤도력에서 비슷한 크기의 편향이 발생함을 알 수 있다. 반면 방송궤도력의 경우 평

균 50.920ns로 신속궤도력이나 초신속궤도력에 비해 매우 큰 편향이 발생한다. 표준편차를 살펴보면 신속궤도력의 경우 0.514ns, 초신속궤도력의 경우 0.494ns로 비슷한 수준의 정밀도를 나타냈으며, 방송궤도력의 경우 1.732ns의 정밀도를 나타내었다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 방송궤도력을 준-실시간 응용에 이용할 경우 시계오차를 산출함과 동시에 편향을 결정하기는 어렵기 때문에, 방송궤도력을 이용한 준-실시간 응용에서는 수 ns 수준의 정확도를 달성하기 어렵다. 한편, 각 궤도력에서 나타난 시계오차의 편향을 거리로 환산하면 신속궤도력의 경우 2.3cm, 초신속궤도력의 경우 3.0cm, 그리고 방송궤도력의 경우 1527.6cm에 해당한다. 이는 표 1에 나타난 궤도력 별 좌표오차와 비슷한 크기로 각 궤도력 별로 나타난 시계오차의 편향이 정밀좌표 결정에 영향을 미쳐 좌표오차로 반영됨을 확인할 수 있다.

4. 결론

GPS 데이터를 이용한 시계오차 추출을 위하여 시각동기용 GPS 상시관측소인 KRIS와 NICT의 관측데이터, 그리고 네 가지 종류의 GPS 궤도력을 이용하였다. 동일한 방송궤도력을 이용하여 산출된 시계오차는 관측데이터의 종류에 상관없이 비슷한 수준의 정밀도를 달성할 수 있었으나, 편향에서는 큰 차이를 보였다. 코드데이터의 경우 반송파위상 데이터에 비해 20배 가까운 편향이 나타났으며, 이는 시계오차 결정과 동시에 편향을 제거할 수 없는 준-실시간 응용분야에 있어 정확도의 한계로 나타날 수 밖에 없다.

정밀궤도력을 사용하여 산출된 시계오차를 참값으로 가정한 후 나머지 세 종류의 궤도력을 사용한 결과와 비교하였다. 신속궤도력과 초신속궤도력을 사용한 경우는 약 0.5ns의 비슷한 수준의 정밀도를 보였다. 한편, 방송궤도력의 경우 정밀궤도력에 대하여 2ns 이하의 정밀도를 보였으나 다른 궤도력의 결과에 비해 편향이 크게 나타났다.

반송파위상 데이터를 사용하여 궤도력에 따른 시계오차를 분석한 결과 준-실시간 시계오차 추출이 가능한 방송궤도력과 초신속궤도력을 사용하면 수 ns 수준의 정밀도 달성이 가능함을 알 수 있었다. 그러나 방송궤도력의 경우에는 50ns라는 높은 편향이 존재하므로 정확도가 낮은 반면 초신속궤도력의 경우 편향의 크기가 0.1ns수준으로 매우 정확한 시각정보 추출이 가능하였다. 그러므로 준-실시간 시각동기 응용분야에 GIPSY와 초신속궤도력을 이용하면 1ns 수준의 높은 정확도를 달성할 수 있다.

감사의 글: 이 연구는 2005년도 국민대학교 교내 학술연구비 지원과 한국표준과학연구원 2005년도 위탁과제인 “정밀위성궤도 이용 시계오차 추출 기술”에 의해 수행되었으며 지원에 감사 드립니다. 또한 심사위원께서 여러 가지 좋은 지적을 해주셔서 이 논문의 내용이 전체적으로 크게 향상된 점에 대하여 감사 드립니다.

참고 문헌

- 박관동, 조정호, 하지현, 임형철 2003, 한국측량학회지, 21, 309
 허윤정, 이창복, 김천휘 2004, 한국우주과학회보, 13, 43
 허윤정, 이창복, 양성훈, 김천휘 2003, 제 10차 GNSS Workshop 발표논문집 (서울: GNSS 기술협의회), p.321

- Bar-Sever, Y. E. & Kroger, P. M. 1996, Proceedings of the 9th International Technical Meeting of the Institute of Navigation (Virginia: Institute of Navigation), p.615
- Defraigne, P. & Bruyninx, C. 2001, GPS Solutions, 5, 43
- Leick, A. 1995, GPS Satellite Surveying (New York: Wiley), p.560
- Webb, F. H. & Zumberge, J. F. 1993, An Introduction to the GIPSY/OASIS-II (California: JPL)