

GPS 위성시계오차의 장단기 특성 분석

Analysis of Short-Term and Long-Term Characteristics of GPS Satellite Clock Offsets

손은성¹⁾ · 박관동²⁾ · 김경희³⁾

Son, Eun-Seong · Park, Kwan-Dong · Kim, Kyeong-Hui

Abstract

The GPS satellite has three or four atomic clocks that consist of cesiums and rubidiums and the NANU messages can be used to identify the kind of the onboard atomic clock because they classify the clock type on a daily basis. In this study, for long-term analysis of the GPS satellite clock behavior, we extracted satellite clock errors for every PRN from years 2001 through 2009 using the SP3 files that are provided by the IGS. As a result, the cesium clock offsets usually have a linear trend of drifting. On the other hand, rubidium offsets show curvilinear variations in general, even though they cannot be represented as any one specific polynomial function. For short-term analysis, we extracted satellite clock errors for each PRN for a week-long period using the CLK files that are also provided by the IGS and curve-fitted them with first-order and second-order polynomial functions. In cases of cesium clock errors, they were well-represented by first-order polynomial functions and rubidium clock errors were similar with second-order polynomials. However, some of rubidium clock errors could not be represented as any polynomial fitting function. To analyze the characteristic of GPS satellite by each block and atomic clock, we applied Modified Allan Deviation criterion to the dataset from years 2007 and 2010. We found that the Modified Allan Deviation characteristics changed significantly according to the block and atomic clock type.

Keywords : Satellite Clock Error, Frequency Stability, Atomic Clock, Modified Allan Deviation

초 록

GPS 위성은 세슘과 루비듐으로 이루어진 원자시계가 3~4개 탑재되어 있으며 NANU 정보를 통해 현재와 과거에 사용했었던 원자시계의 종류를 파악할 수 있다. 이 연구에서는 2001년부터 2009년까지의 SP3 파일에서 각 PRN에 대한 위성시계오차를 추출하여 분석하였다. 분석 결과 대체적으로 세슘시계는 직선형태, 루비듐시계는 곡선형태의 특성을 보였으나 일정한 경향은 나타나지 않았다. 또한 일주일간의 CLK 파일에서 위성시계오차를 추출하여 각 PRN별로 1차식과 2차식으로 적합하고 그 결과를 비교하였다. 세슘시계의 경우 2차식보다 1차식이 추출 데이터와 유사하였으며 루비듐시계의 경우 2차식이 추출 데이터와 유사하였고 특정 PRN은 다차항 형태의 특성을 보였다. 그리고 Modified Allan Deviation 방법을 이용하여 2007년과 2010년의 GPS 위성을 Block별, 원자시계별로 분석하였다. 그 결과 GPS 위성은 Block별, 원자시계별로 서로 다른 특성이 보였으며 Block 또는 원자시계가 변경되면 그 특성도 변경되는 것을 확인할 수 있었다.

핵심어 : 위성시계오차, 주파수 안정도, GPS 원자시계, Modified Allan Deviation

1. 서 론

GNSS(Global Navigation Satellite System)의 대표적 시

스템인 GPS(Global Positioning System)는 1978년 Block I 발사를 시작으로 1989년에는 Block II 그리고 1990년부터 Block II의 업그레이드 버전인 Block IIA, Block IIR, Block

1) 교신저자 · 인하대학교 사회기반시스템공학부 지리정보공학과 석사과정(E-mail:h79s86@gmail.com)
2) 정희원 · 인하대학교 사회기반시스템공학부 지리정보공학과 부교수(E-mail:kdpark@inha.ac.kr)
3) 인하대학교 사회기반시스템공학부 지리정보공학과 박사과정(E-mail:kyeong-hui@inha.edu)

IIR-M, Block IIF가 순차적으로 발사되었다. 각각의 위성에는 세슘(Cs)과 루비듐(Rb)으로 이루어진 원자시계가 3~4개가 탑재되어 있으며 사용하고 있는 원자시계에 이상이 발생할 경우에는 다른 원자시계로 백업하도록 되어 있다. 세슘시계만으로 위성시계를 구성하지 않는 이유는 루비듐이 세슘보다 가격이 훨씬 저렴하기 때문이다(이호성, 2005). 최근에 발사된 Block IIR과 Block IIR-M의 경우에는 루비듐시계만 탑재되어 있다(El-Rabbany, 2006).

GPS는 신호전달 시간에 빛의 속도를 곱하고 위성과 수신기 사이의 거리를 계산하여 위치를 결정하는 것으로써 시각의 생성과 관리가 중요한 기술이다. 위성의 정확한 궤도와 시각 결정은 정확한 원자시계를 기반으로 이루어지므로 GPS의 원자시계 특성을 분석하는 것이 필요하다(박찬식 등, 2007). GPS 원자시계를 분석할 수 있는 것으로써 IGS(International GNSS Service)의 위성시계오차가 있으며 SP3 파일과 CLK 파일에 PRN(Pseudo Random Noise)별로 기록되어 있다. SP3의 경우 15분 간격으로 데이터가 기록되어 있으며 초신속궤도력(Ultra Rapid), 신속궤도력(Rapid), 정밀궤도력(Final)으로 구분할 수 있다. CLK는 Rapid와 Final만 제공되며 Rapid는 5분 간격, Final은 5분과 30초 간격으로 기록되어 있다. 이러한 IGS 데이터는 GPS 분석센터(Analysis Center)인 CODE(Center for Orbit Determination in Europe), JPL(Jet Propulsion Laboratory), NRCan(Natural Resources Canada) 등의 산출 결과를 모아 가중 평균에 의해 만들어진다(Ray and Senior, 2005).

GPS 원자시계와 관련된 선행연구로써 Senior et al.(2008)은 GPS 위성을 Block별, 원자시계별로 구분하여 원자시계의 안정도 분석을 실시하였으며 분석 방법으로 Modified Allan Deviation을 이용하였다. 원자시계 안정도 분석은 원자시계 오차를 구성하는 잡음(Noise)인 Flicker Phase와 Random Walk Phase를 Modified Allan Deviation 결과에 관련지어 분석하였다. 분석 결과 루비듐시계는 세슘시계보다 온도에 더 민감하여 매우 다양한 특성이 나타나는 것으로 판단하였다. 그리고 박찬식 등(2007)은 위성시계오차가 측위 정확도에 미치는 영향을 분석하기 위해 다양한 Allan Variance와 Hadamard Variance를 이용하여 원자시계의 잡음 특성을 분석하고 GNSS 위성시계오차 시뮬레이터를 개발하였다. 그러나 Senior et al.(2008)은 분석 기간에 대한 안정도의 정량적 분석과 GPS 위성의 원자시계와 Block이 변경 되었을 경우의 GPS 원자시계 안정도를 비교·분석하지 않았으며 박찬식 등(2007)은 위성시계오차를 이용하여 원자시계의 잡음 특성을 분석하지 않았다.

또한 원자시계를 구분하여 시뮬레이터를 개발하였지만 GPS 위성의 Block은 고려하지 않았다.

이 연구에서는 시뮬레이터용 GPS 위성시계오차 모델링을 위해 GPS 원자시계별 위성시계오차의 특성을 파악하였으며 위성시계 및 Block별로 GPS 원자시계 안정도를 분석하였다. 위성시계오차 특성 파악에 앞서 원자시계 종류 및 변경시기를 파악하기 위해 USCG(United States Coast Guard)에서 제공하는 NANU(Notice Advisory to Navstar Users)를 이용하였다. 위성시계오차 특성은 장기간과 단기간으로 구분하여 분석하였으며 장기간은 15분 간격으로 기록되어 있는 SP3의 정밀궤도력 위성시계오차를 이용하였고 단기간은 CLK의 30초 간격으로 기록되어 있는 Final 위성시계오차를 이용하였다. 장기간 분석에서는 SP3 자료에서 PRN별 위성시계오차를 추출하고 장기간에서의 위성시계오차 경향을 파악하였으며 단기간 분석에서는 1차식과 2차식으로 위성시계오차를 곡선 접합한 후 잔차의 산포를 분석하였다. 그리고 단기간 분석에 사용된 자료를 이용하여 주파수 안정도 분석을 위한 Modified Allan Deviation 방법을 적용하고 2007년과 비교하여 2010년에 GPS 위성의 원자시계와 Block이 변경된 PRN을 찾아 비교하였다.

2. IGS Clock Solution 분석

2.1 장기간 IGS SP3 위성시계오차 분석

GPS 위성에 탑재되어 있는 원자시계는 세슘과 루비듐 중 하나로 작동되지만 여러 위성들이 동일한 종류의 시계로 작동되더라도 각 위성의 위성시계오차가 서로 다르며 원자시계가 변경되는 시기도 일정하지 않다. 따라서 이 연구에서는 PRN별 위성시계오차를 추출하고 원자시계의 종류와 변경 시기를 파악하여 장기간의 위성시계오차의 특성을 분석하였다.

IGS의 SP3를 이용하여 2001년 1월 1일부터 2009년 12월 31일까지 9년간의 위성시계오차를 추출하고 USCG에서 제공하는 NANU의 위성시계 정보를 이용하여 PRN별 원자시계 종류와 시기를 파악하였다. 원자시계 종류별 위성시계오차 분석 결과의 일부를 그림 1과 2에 나타내었으며 가로축은 시간, 세로축은 위성시계오차를 나타낸다. 그림 1(a)의 경우 2002년부터 2007년 중반까지 위성시계오차가 약 $0\mu s$ 에서부터 시작하는 것을 볼 수 있으며 약 $100\mu s$ 가 되면 $0\mu s$ 정도로 초기화되어 다시 증가하는 현상이 반복되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 2007년 중반 이후부터는 위성시계오차가 $100\mu s$ 부근에 도달하더라도 $0\mu s$ 로 초기화되지

않고 계속 증가하는 것을 볼 수 있다. 그림 1(b)의 경우 2001년부터 코사인(Cosine)함수 형태의 위성시계오차 특성을 보이고 있으나 주기 및 진폭 등이 일정하지 않은 것을 볼 수 있다.

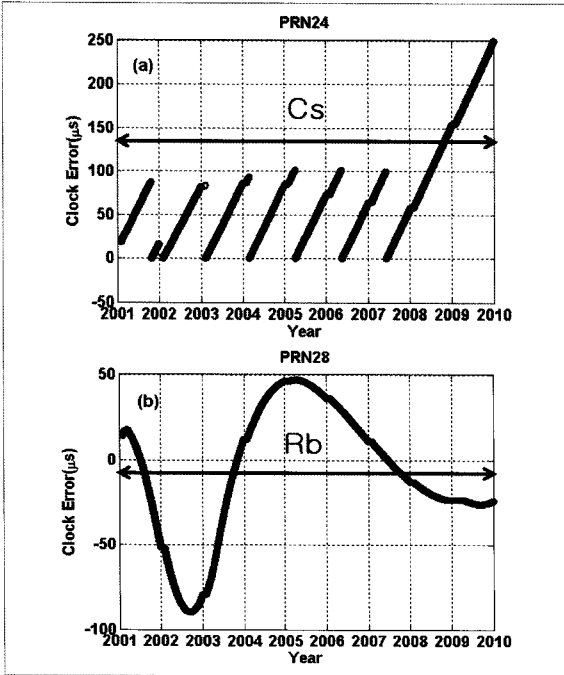


그림 1. 원자시계 종류별 위성시계오차 분석

위성시계는 그림 1과 같이 9년간 위성시계가 변경되지 않은 경우 외에 불규칙적으로 위성시계가 변경되는 경우가 있다. 불규칙적으로 위성시계가 변경된 PRN의 일부를 그림 2에 나타내었다. 위성시계가 변경되었을 경우 시계의 종류에 따라 위성시계오차 특성이 변경되는 것을 그림 2에서 확인할 수 있다. 그림 2(a)의 경우 2008년 4월까지 세슘시계로 운용되었으며 그 이후 루비듐시계로 변경되었다. 세슘시계 운용기간에는 2005년 중반에 위성시계오차가 약 400 μ s까지 도달한 후 0 μ s 정도로 초기화되고 다시 증가하는 현상을 볼 수 있다. 이는 그림 1(a)에서 나타난 현상과 유사하며 그림 2(b)에서도 유사한 현상을 볼 수 있다. 그림 2(b)의 경우 2007년에 루비듐시계로 운용되고 있는 경우에도 위성시계오차 특성이 곡선의 형태가 아닌 직선의 형태를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 위성시계오차를 장기간 분석한 결과 세슘시계를 가지고 있는 PRN의 위성시계오차는 직선형태의 특성을 가지고 있으며 일정한 값에 도달하면 0 μ s 정도로 초기화 되는 현상을 확인할 수 있다. 그러

나 이러한 특성이 항상 나타나는 것은 아니며 PRN마다 경향이 다르고 초기화되기 전의 값도 다르게 나타나므로 세슘시계의 위성시계오차가 가지고 있는 경향을 정확하게 파악하기엔 다소 어려울 것으로 판단된다. 또한 루비듐시계를 사용하고 있는 PRN의 위성시계오차는 대부분 곡선형태의 특성을 가지고 있으나 일정한 경향을 확인할 수 없으며 직선형태의 특성도 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 위성시계오차 특이 현상들은 위성시계에 장착되어 있는 온도제어기의 오작동이 원인인 것으로 판단되며 루비듐시계의 경우 장기 안정도가 좋지 않다는 단점이 영향을 주었을 것으로 판단된다(Bhaskar et al., 1996, Lewis, 1999).

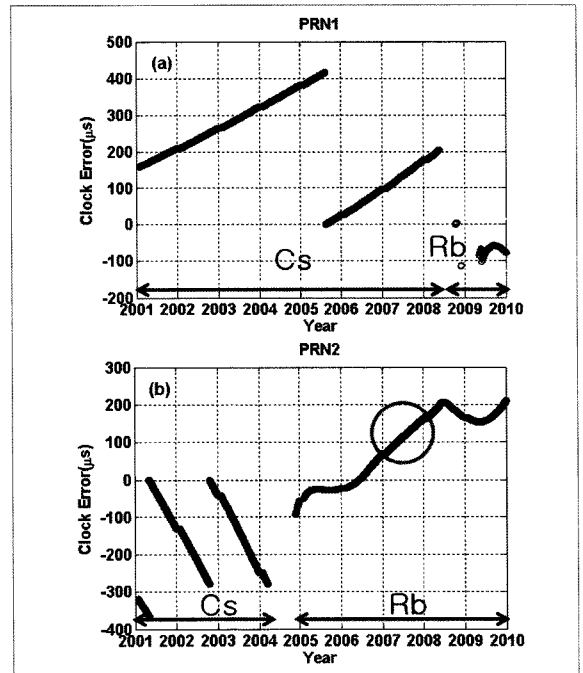


그림 2. 불규칙적으로 변경된 시계를 탑재한 위성의 위성시계오차

2.2 단기간 IGS CLK 위성시계오차 분석

장기간의 위성시계오차를 분석한 결과 대체적으로 세슘시계는 직선형태, 루비듐시계는 곡선형태의 특성을 나타내었으며 일정한 경향은 나타나지 않았다. 또한 루비듐시계의 경우 위성시계오차가 불규칙하게 변하는 경우도 있었다. 따라서 장기간 분석에서 파악되지 않는 위성시계의 경향 및 특성을 파악하기 위해 단기간 분석을 실시하였다.

단기간의 위성시계오차를 분석하기 위해 2010년 1월 3

일부터 9일까지 일주일간의 위성시계오차를 CLK에서 추출하였다. 단기간 위성시계오차 결과의 일부분을 그림 3에 나타내었으며 가로축은 시간, 세로축은 위성시계오차이다. 그림 3을 보면 위성시계오차는 시간에 따라 변화되는 정도와 경향이 PRN별로 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있다. Block IIA의 세슘시계를 사용하고 있는 PRN9의 위성시계오차는 일주일 동안 약 $1.37\mu\text{s}$ 의 변화가 있음을 그림 3(a)에서 확인할 수 있으며 Block IIR의 루비듐시계를 사용하고 있는 PRN23은 약 $0.49\mu\text{s}$ 의 변화가 있음을 그림 3(b)에서 확인할 수 있다. 단기간 위성시계오차를 추출한 결과 대부분의 위성시계오차가 직선의 형태를 나타내고 있으며 장기간 분석 결과와 같은 시계별 특성이 구분되지 않았다. 따라서 시계별 특성을 파악하기 위해 1차식과 2차식으로 곡선 적합하였고, 곡선적합 값과 실제 데이터 사이의 잔차를 이용하여 PRN별로 잔차의 산포를 산출하였다. 곡선적합에 앞서 데이터의 Outlier를 검토한 결과 Outlier는 검출되지 않았다. 상대적으로 잔차의 산포가 큰 PRN 및 작은 PRN을 각각 그림 4와 그림 5에 나타내었다.

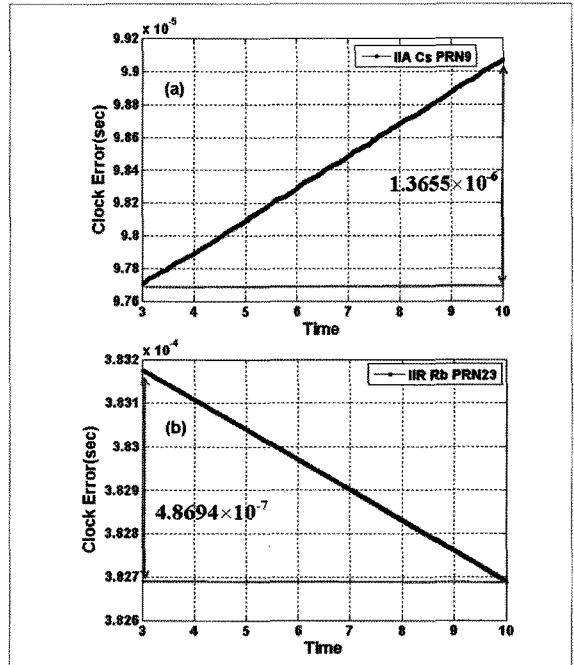


그림 3. 단기간 위성시계오차 분석

그림 4의 (a)와 (b)는 각각 1차식과 2차식으로 곡선 적합 한 값과 실제 데이터를 비교하여 잔차의 산포가 큰 PRN을 나타낸 것이다. 그림 4(a)에서 루비듐시계를 사용하고 있는 PRN6과 PRN25의 산포가 크게 나타났으며 2차 곡선의 형태를 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 장기간 분석 결과에서 루비듐시계는 곡선 형태의 위성시계오차 특성을 가지고 있는 것으로 나타났기 때문에 1차식으로 곡선 적합한 결과가 실제 데이터와 잘 일치하지 않는 것으로 판단된다. 또한 장기간 분석 결과에서 세슘시계가 직선 형태의 특성을 갖고 있는 것으로 나타났기 때문에 그림 4(b)의 경우 세슘시계를 사용하고 있는 PRN은 2차식으로 곡선 적합한 결과와 실제 데이터가 잘 일치하지 않아 잔차의 산포가 크게 나타난 것으로 분석된다. 그리고 그림 4에서 PRN8의 경우는 1차식(a)과 2차식(b) 모두에서 잔차의 산포가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 PRN8의 위성시계오차가 다차형 형태의 특성을 가지고 있기 때문으로 판단된다.

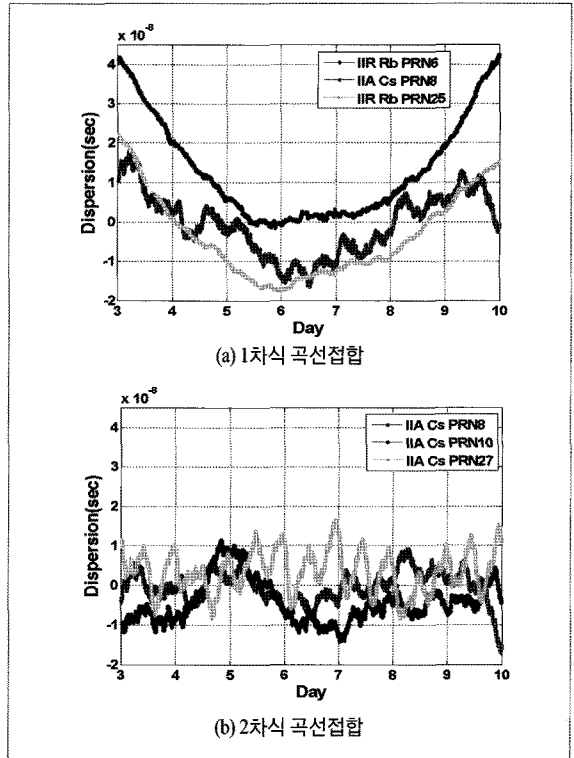


그림 4. 잔차의 산포가 큰 PRN

그림 5의 (a)와 (b)는 1차식과 2차식으로 곡선 적합 한 값과 실제 데이터를 비교하여 잔차의 산포가 작은 PRN을 나타내었으며 두 경우 모두에서 루비듐시계를 사용하고 있는 PRN이 포함된 것을 확인할 수 있다. 그림 5에서 루비듐시계를 가진 PRN18과 PRN20이 (a)와 (b)에 모두 나타난 것으로 보아 앞서 설명한 그림 4의 PRN8과 같이 다차형 형태의 특성을 가지고 있다고 판단된다.

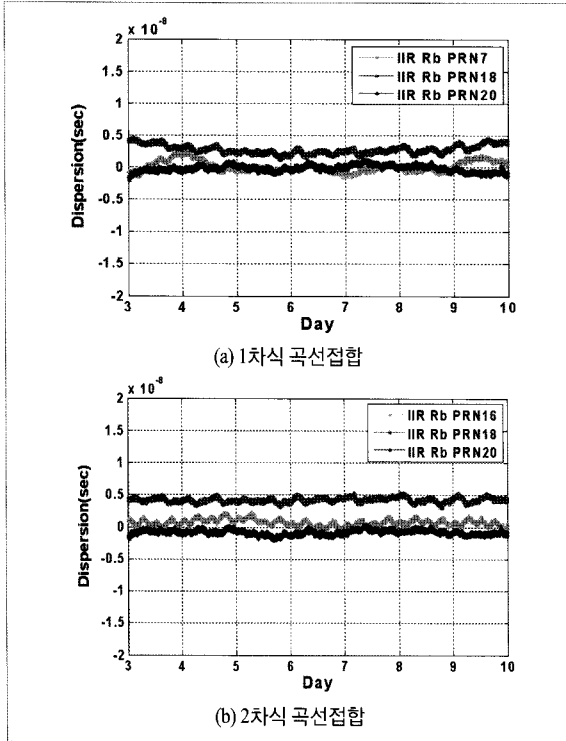


그림 5. 잔차의 산포가 작은 PRN

3. Modified Allan Deviation을 이용한 위성시계오차 분석

3.1 Modified Allan Deviation 이론

Allan Variance는 주파수 안정도 분석에 쓰이는 일반적인 방법으로 Standard Variance와 매우 유사하지만 시계의 잡음을 분석하는데 있어서 효과적이다. Allan Variance는 여러 개의 버전이 있으며 최초의 버전은 non-overlapped Allan으로 시작하였다. 중첩은(overlap)은 안정도 계산에서 사용되는 모든 데이터를 조합하는 것으로 그림 6에 중첩과 비중첩(non-overlap)을 나타내었다. 그림 6에서 중첩과 비중첩은 계산에 사용될 데이터와 그 전·후의 데이터를 조합하는 것으로 같지만 중첩은 각각의 데이터마다 계산을 해야 한다는 점에서 비중첩과 다르다. 따라서 중첩을 사용하면 안정도를 계산하는데 있어 결과 값의 신뢰도를 높일 수 있지만 계산과정이 복잡하기 때문에 많은 시간이 소요되는 단점이 있다. 이 중 Modified Allan Variance는 Allan Variance에 중첩을 적용한 것으로 위상 영역의 데이터를 사용하는 경우 식(1)을 사용하여 계산할 수 있다(Riley, 2008).

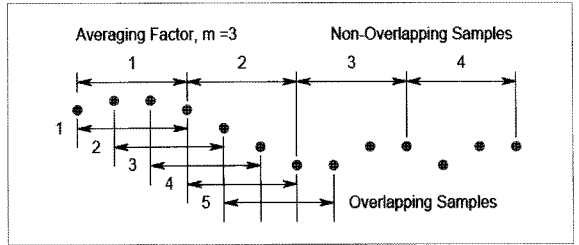


그림 6. 중첩과 비중첩의 원리

$$Mod\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2m^2\tau^2(N-3m+1)} \sum_{j=1}^{N-3m+1} \left\{ \sum_{i=j}^{j+m-1} [x_{i+2m} - 2x_{i+m} + x_i] \right\}^2 \quad (1)$$

식(1)에서 σ_y^2 는 Modified Allan Variance이고 m 은 averaging factor로 1부터 $N/3$ 까지 정수부분이다. N 은 데이터의 총 개수, $\tau(=\tau_0m)$ 는 평균 시간(Averaging Second), x 는 2차식으로 곡선 접합한 값과 실제 데이터의 차이이다. σ_y^2 에 제곱근을 적용한 결과가 Modified Allan Deviation이며 만약 $m=1$ 이면 Allan Variance와 같은 수식이 된다(Allan et al., 1997).

Modified Allan Deviation은 거듭제곱법칙(Power Law)을 따른다. Modified Allan Deviation의 예를 그림 7에 나타내었다. Modified Allan Deviation은 그림 7(a)와 같이 멱급수 형태의 그래프가 나타나므로 그림 7(b)와 같이 결과 값 양

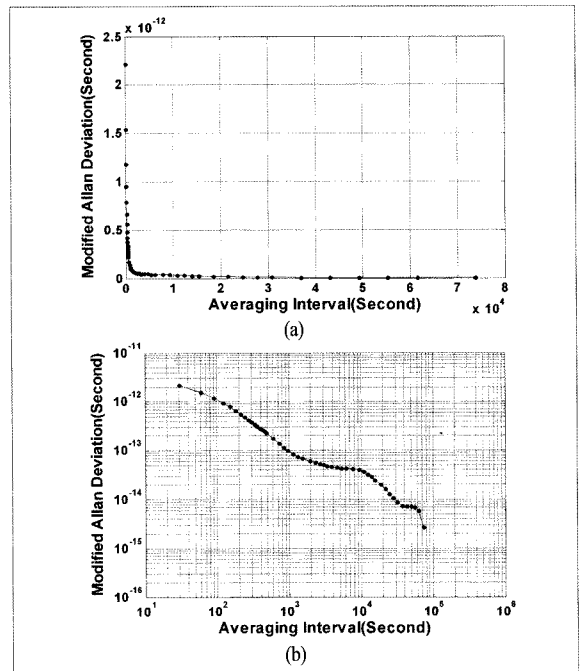


그림 7. Modified Allan Deviation의 예

변에 로그(Log)를 취하여 Log-Log 그래프로 나타내면 직선 형태로 나타나기 때문에 그래프 분석에 용이하다.

3.2 Modified Allan Deviation 분석

Modified Allan Deviation 분석을 위해 IGS의 CLK를 이용하여 2010년 1월 3일부터 2010년 1월 9일까지 일주일간의 위성시계오차를 추출하여 2차식으로 곡선 접합하였다. 2차식으로 곡선 접합한 이유는 실제 데이터값 간의 차이를 최소화하기 위함이다(Senior et al., 2008). 곡선 접합한 값과 실제 데이터의 차이를 PRN별로 산출하고 Modified Allan Deviation 방법을 적용하여 위성시계의 특성을 분석하였다. 원자시계는 Random Walk과 Flicker 성분을 혼합한 잡음을 가지고 있으며 잡음 성분을 분석하기 위해 Random Walk Phase Modulation Noise와 Flicker Phase Modulation Noise를 사용한다(Sullivan et al., 1990). Modified Allan Deviation 결과는 그림 8에 나타내었으며 그래프 분석에 용이하게 Random Walk Phase Modulation Noise와 Flicker

Phase Modulation Noise도 함께 나타내었다.

위성시계의 특성은 Block별, 원자시계별로 유사한 경향이 나타나는 것을 그림 8에서 확인할 수 있으며 averaging interval이 약 2000초 이전일 경우에는 Block IIA의 PRN들은 Random Walk 모델과 유사하고 Block IIR과 Block IIR-M의 PRN들은 Flicker Phase 모델과 유사한 것을 볼 수 있다. 그러나 대부분의 PRN들은 약 2000초 이후에 이러한 모델들을 따르지 않으며 약 10⁴초 이후에는 매우 복잡한 현상이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그리고 Block IIA PRN들의 위성시계를 비교해보면 루비듐시계를 사용하고 있는 PRN들이 세슘시계를 사용하고 있는 PRN보다 그래프가 아래에 위치하고 있어 안정도가 높은 것을 알 수 있다. Block IIR과 Block IIR-M는 모두 루비듐시계를 사용하고 있으며 Block IIA의 루비듐시계를 사용하고 있는 PRN과 비교할 경우 약 10³초 이전에는 안정도가 낮게 나타났지만 그 이후에는 안정도가 높게 나타난 것을 확인할 수 있다.

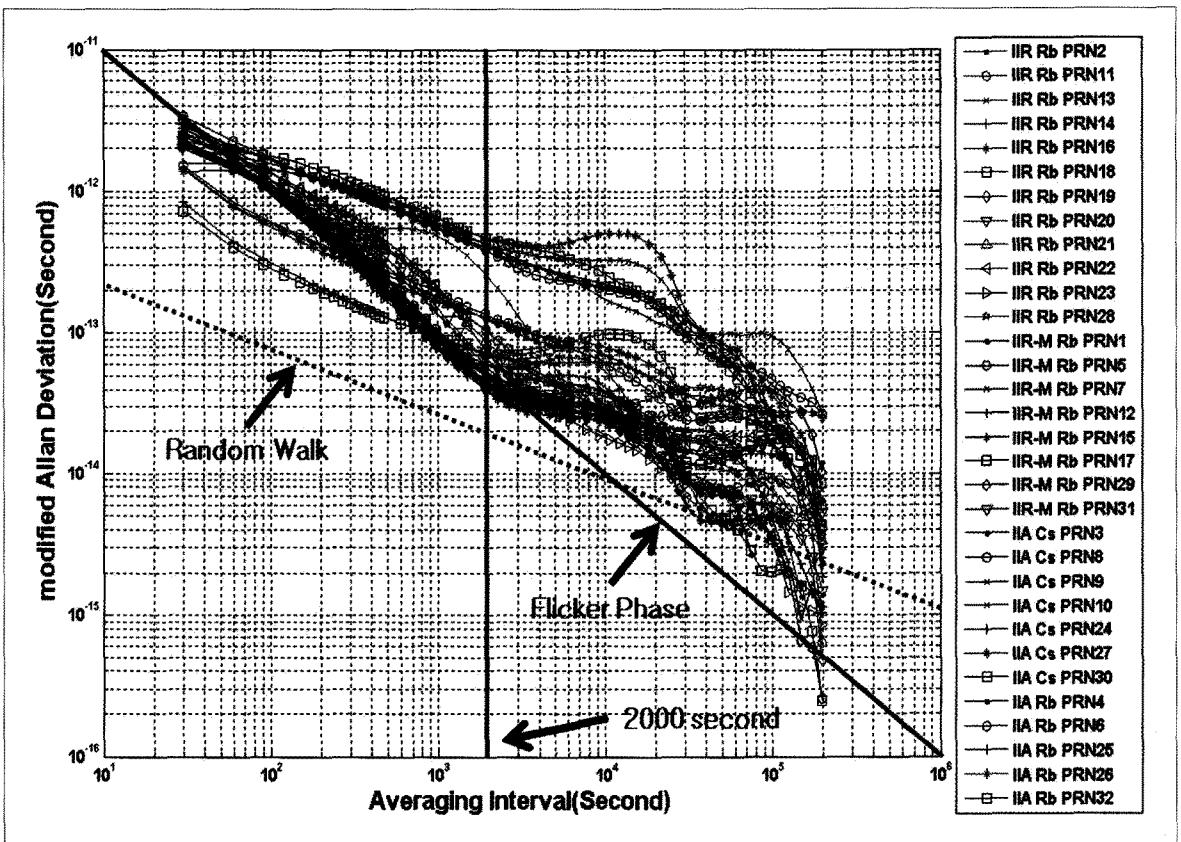


그림 8. Modified Allan Deviation 분석 결과(2010년)

3.3 위성시계 특성 비교

Senior et al.(2008)은 Modified Allan Deviation을 이용하여 GPS 위성을 Block별, 원자시계별로 분류하고 특성을 분석한 바 있다. 따라서 선행연구 내용을 기반으로 2007년과 2010년의 Modified Allan Deviation을 비교해 보았다. 2007년과 2010년을 비교하여 Block과 원자시계가 변경된 PRN은 PRN1, PRN5, PRN7, PRN29가 있으며 변경 전후를 표 1에 나타내었다. 4개의 위성은 2007년에 Block IIA이었으며 PRN1과 PRN29는 세슘시계를 탑재하였고, PRN5와 PRN7은 루비듐시계를 탑재하였지만 이들은 모두 Block IIR-M의 루비듐 시계로 변경되었다. 2007년과 2010년을 비교하여 Block과 위성시계가 변경된 PRN과 변경되지 않은 PRN의 Modified Allan Deviation 결과를 그림 9와 그림 10에 각각 나타내었다. Block과 원자시계가 변경된 PRN은 위성시계의 특성이 변경된 것을 확인할 수 있으며 Block만 변경된 경우에도 위성시계특성이 변경된 것을 확인할 수 있다. 그러나 2007년과 2010년을 비교하여 Block과 원자시계가 변경되지 않은 PRN은 위성시계 특성이 유사함을 알 수 있다.

표 1. Block과 원자시계가 변경된 PRN

PRN	변경 전(2007)	변경 후(2010)
1	Block IIA Cs	Block IIR-M Rb
5	Block IIA Rb	
7	Block IIA Rb	
29	Block IIA Cs	

Modified Allan Deviation은 산출된 수치가 작을수록 안정도가 높은 것을 의미하며, 정량적 분석 결과의 일부분을 그림 11에 나타내었다. PRN8의 경우 averaging interval 2.0×10^5 초 부근에서 약 $2.6 \times 10^{-8} \mu s$ 로 안정도가 낮게 산출되었으며 PRN18의 경우 $2.4 \times 10^9 \mu s$ 로 안정도가 높게 산출되었다. Modified Allan Deviation의 정량적 분석 결과를 앞서 곡선 접합한 결과와 비교하면 PRN8은 다른 PRN들과 비교하여 상대적으로 잔차의 산포가 크게 산출된 것을 그림 4(b)를 통해 확인할 수 있으며, PRN18은 잔차의 산포가 작게 산출된 것을 그림 5(b)에서 확인할 수 있다. 따라서 2차식으로 곡선 접합한 값과 실제 데이터 사이의 잔차 산포가 크면 안정도가 낮게, 잔차의 산포가 작으면 안정도가 높게 산출되는 것으로 판단된다.

Modified Allan Deviation 분석 결과 대부분의 루비듐시계가 세슘시계보다 안정도 값이 높게 산출되었다. 일반적

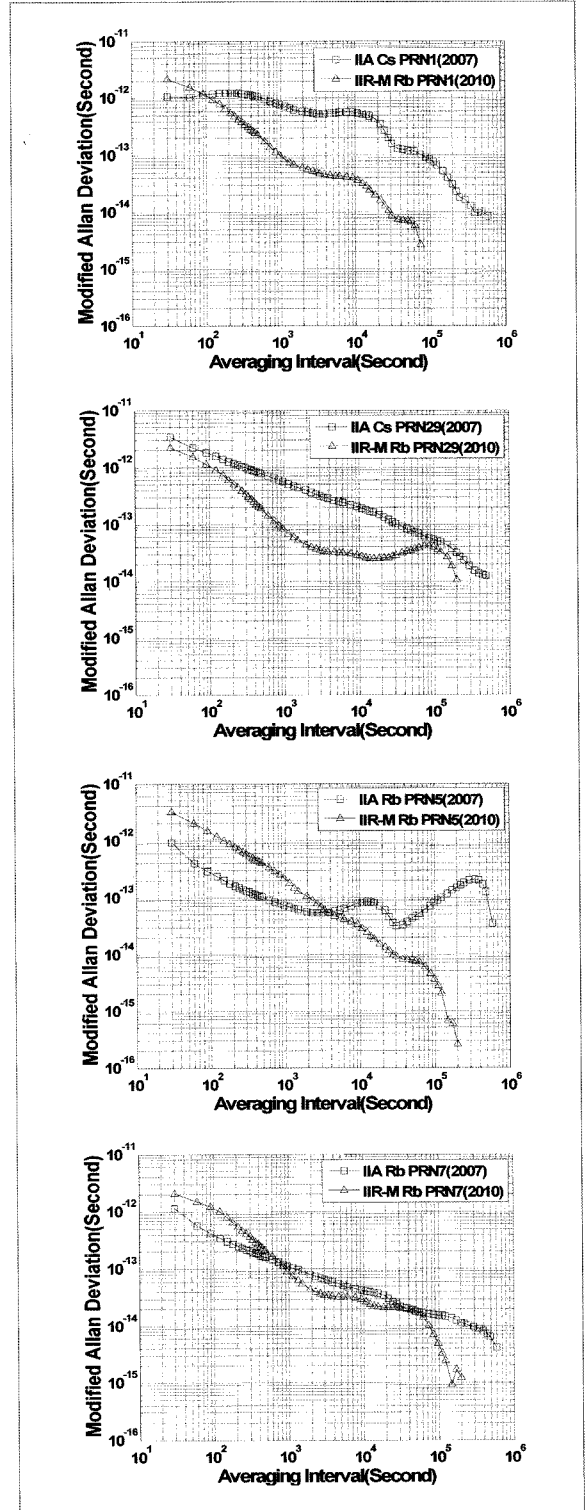


그림 9. Block과 원자시계가 변경된 PRN과 Block이 변경된 PRN의 Modified Allan Deviation 결과 비교

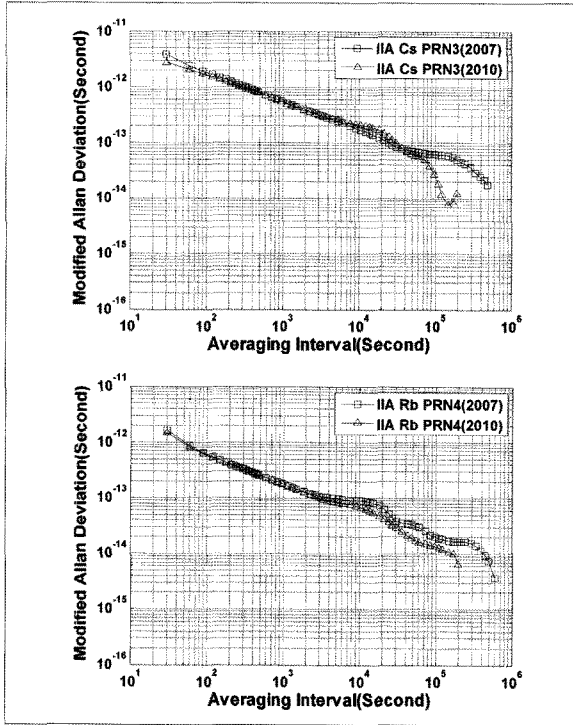


그림 10. Block과 원자시계가 변경되지 않은 PRN의 Modified Allan Deviation 결과 비교

으로 세슘시계는 루비듐시계보다 정확도와 주파수안정도가 높지만 시간이 경과하면 루비듐은 세슘과 거의 비슷한 안정도를 갖는다(김호성, 2005; El-Rabbany, 2006). Modified Allan Deviation 분석 결과의 averaging interval 약 10^5 부근에서 세슘과 루비듐시계의 안정도가 비슷하다고 할 수 있지만 대부분의 루비듐시계가 세슘시계보다 안정도가 더 좋은 것으로 나타났으며 Block IIA의 경우 세슘시계를 사용하고 있는 PRN들과 루비듐시계를 사용하고 있는 PRN 경우에는 많은 차이가 있지 않음을 볼 수 있다. 또한 Senior et al.(2008)은 20일보다 더 장기간을 분석하면 세슘의 안정도가 좋아진다고 하였다. 이 연구의 Modified Allan Deviation 결과는 세슘과 루비듐시계의 안정도가 역전 현상을 보이고 있다. 단기간 분석에서 위성시계오차는 2차식으로 곡선 접합한 결과와 실제 데이터간의 잔차의 산포가 세슘시계의 경우에는 크고, 루비듐시계의 경우에는 작게 나타났다. 이러한 곡선접합의 결과가 반영되어 Modified Allan Deviation에 나타난 것으로 판단된다. 따라서 위성시계의 특성을 좀 더 자세히 파악하기 위해서는 PRN별 위성시계오차 값 간의 편차를 줄이기 위한 Fourier Transform과 같은 정확한 곡선접합을 이용한 분석이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

이 연구에서는 GPS 시뮬레이터에 적용할 위성시계오차를 모델링하기 위하여 GPS 위성의 위성시계오차 특성과 안정성을 분석하였다. 분석에 사용된 데이터는 IGS의 위성시계오차이며 GPS 위성을 위성시계별로 구분하여 장기간 분석한 결과 세슘시계는 직선 형태의 특성이 보였으며 특정 값에 도달하면 위성시계오차가 $0\mu s$ 정도로 초기화된 후 다시 증가 또는 감소하는 현상을 확인할 수 있었다. 루비듐시계는 대부분 곡선 형태의 특성을 보였지만 직선 형태의 특성을 보이는 경우도 있었다. 그리고 장기간 분석에서 나타나지 않은 위성시계오차의 특성을 파악하기 위해 단기간의 위성시계오차를 분석하였다. 곡선 접합을 이용하여 분석한 단기간 위성시계오차 결과에서 대부분의 세슘시계의 경우 위성시계오차가 1차식 곡선접합 값과 유사함을 확인할 수 있었다. 그리고 루비듐시계의 경우 위성시계오차가 2차식 곡선 접합뿐만 아니라 특정 PRN의 경우 1차식 곡선 접합과 유사한 경우가 나타나는 것을 보아 루비듐시계의 위성시계오차는 다양한 특성을 보임을 확인할 수 있었다. 또한 원자시계 주파수 안정도 분석을 위하여

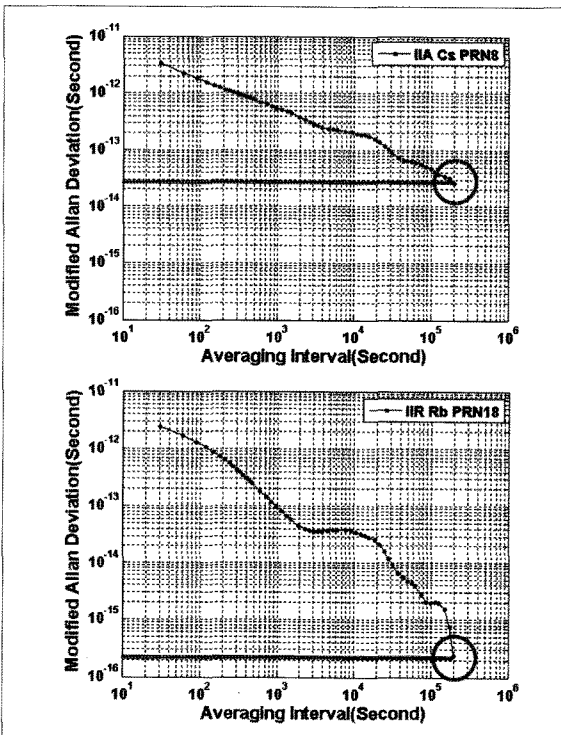


그림 11. 정량적인 위성시계 안정도 분석

Modified Allan Deviation 방법을 적용하고 2007년과 2010년을 비교한 결과 GPS 위성의 Block과 원자시계가 변경되면 위성시계오차의 특성이 변경되는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 Modified Allan Deviation에 사용된 데이터를 2차식으로 곡선 접합하여 잔차의 산포가 작으면 Modified Allan Deviation 기반의 안정도 값이 크게, 잔차의 산포가 작으면 안정도 값이 작게 산출되는 것을 확인할 수 있었다. 이 연구에서 Modified Allan Deviation 분석 결과는 세슘과 루비듐시계의 안정도가 역전된 현상을 확인할 수 있었으며 이와 같은 결과는 2차식 곡선접합 결과가 Modified Allan Deviation에 영향을 미친 것으로 판단된다. 따라서 향후 GPS 원자시계의 안정도를 좀 더 자세하게 분석하기 위한 다른 방법이 고안되어야 할 것으로 판단된다. IGS 데이터를 이용하여 GPS 위성시계오차를 분석한 결과 불규칙한 경향을 보이므로 정확한 위성시계오차 모델링을 위해서 위성시계오차와 지구의 자전 및 위성궤도변경 등과의 상관성에 대한 분석이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2006-3105)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

이호성 (2005), 시간주파수 표준과 응용, 한국물리학회, 제 14권, 제 12호, pp. 31-36.

박찬식, 이상정, 강동연, 윤희학, 신미영, 임덕원, 조종철, 신대식 (2007), GNSS 위성시계 오차 모델링 기법 연구, 충북대학교.

Allan, D. W., Ashby, N. and Hodge, C. (1997), *The Science of Timekeeping, Hewlett-Packard Application Note 1289*, United States.

Bhaskar, N. D., White, J., Mallette, L. A., McClelland T. A. and Hardy, J. (1996), A historical review of atomic frequency standards used in space systems, *Proc. of 1996 IEEE International Frequency Control Symposium*, 1996, pp. 24-32.

El-Rabbany, A. (2006), *Introduction to GPS: The Global Positioning System, Artech House Publishers*, Boston, USA. ISBN 1-59693-016-0.

Lewis, L. L. (1999), An Introduction to Frequency Standards, *Proc. of IEEE*, Vol. 79, No. 3, 1999, pp. 927-935.

Ray, J. and Senior, K. (2005), Geodetic techniques for time and frequency comparisons using GPS phase and code measurements, *Metrologia*, Vol. 42, No. 4, pp. 215-232.

Riley, W. J. (2008), *Handbook of Frequency Stability Analysis, NIST Special Publication 1065*, July 2008.

Senior, K. L., Beard, R. L. and Ray, J. R. (2008), Characterization of Periodic Variations in the GPS Satellite Clocks, *GPS Solutions*, Vol. 12, No. 3, pp. 211-225.

Sullivan, D. B., Allan, D. W., Howe, D. A. and Walls, F. L. (1990), Characterization of Clock and Oscillators, *NIST Technical Note 1337*, March 1990.