

## 우주용 원자 주파수 표준기 기술 동향

허윤정\*, 허문범\*\*, 심은섭\*\*\*

# Technical Trends of Atomic Frequency Standard in Space

Youn-Jeong Heo\*, Moon-Beom Heo\*\*, Eun-Sup Sim\*\*\*

### ABSTRACT

There have been about 450 atomic frequency standards (or atomic clocks) launched into orbit for the use on communications and scientific payloads since 1970's. GPS satellites carry on-board Rubidium and Cesium atomic frequency standards which are utilized for the precise positioning and timing. The evolving technologies of space qualified atomic frequency standards have enhanced in the performance, reliability, and lifetime of satellites. In this paper we describe the fundamentals and performance of the atomic frequency standards, and introduce the atomic frequency standards which are presently on-board various satellites systems. We also present the GPS time scale and its applications.

### 초 록

1970년대 이후로 지금까지 450여개의 원자 주파수 표준기 (또는 원자시계)가 통신이나 과학 실험의 목적으로 우주로 발사되었다. GPS 위성의 경우 루비듐 주파수 표준기와 세슘 주파수 표준기가 탑재되어 사용자들에게 정밀한 위치와 시각을 제공하고 있다. 원자 주파수 표준기 개발 기술이 향상됨에 따라 성능이 뛰어난 주파수 표준기들이 우주에서 동작하고 있고, 이는 위성의 수명이나 신뢰도를 높일 수 있다.

본 논문에서는 원자 주파수 표준기의 기본 원리 및 특성에 대해 기술하고, 위성에 탑재되어 있는 우주용 원자 주파수 표준기 종류에 대해서 소개한다. 또한 GPS 항법위성의 기준이 되고 있는 GPS 시간척도와 이를 활용한 응용분야에 대해서 기술한다.

**Key Words** : GPS(위성항법시스템), Atomic Frequency Standard(원자 주파수 표준기), Atomic Clock(원자시계), Rubidium(루비듐), Cesium(세슘), Hydro Maser(수소 메이저)

\* 허윤정, 한국항공우주연구원 우주응용·미래기술센터 위성항행항법팀  
yjheo@kari.re.kr

\*\* 허문범, 한국항공우주연구원 우주응용·미래기술센터 위성항행항법팀  
hmb@kari.re.kr

\*\*\* 심은섭, 한국항공우주연구원 우주응용·미래기술센터  
esim@kari.re.kr

# 1. 서론

시간 (time interval)을 측정하기 위해서는 이를 잴 수 있는 기준이 필요한데 이 기준이 되는 것을 시간척도 (time scale)라고 한다. 오래전부터 과학자들과 기술자들은 태양의 겉보기 운동, 달의 위상 변화, 진자의 진동처럼 명백하게 주기적으로 운동을 하는 물체들을 관찰하여 시간의 척도로 사용하였다.

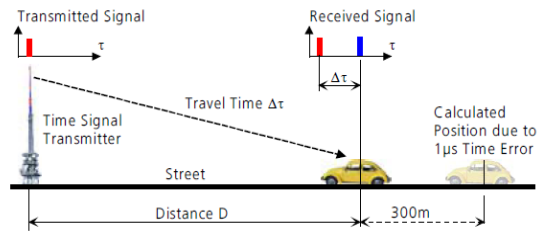
태양이 정남에서 다음날 정남에 올 때까지 걸리는 시간이 1태양일 (solar day)이고 1년 동안의 모든 태양일을 평균한 것이 평균태양일이며 이 평균태양일의 86,400분의 1이 평균태양초로 오랫동안 초 (second)의 정의로 사용되어 왔다[1]. 그러나 조석이 가하는 마찰력과 그 밖의 힘들에 의해 지구의 자전 속도가 영향을 받아 태양시는 불규칙하게 느려지는 경향이 있어 더욱 규칙적인 운동을 보이는 다른 시간 척도가 필요하게 되었다.

원자는 양자 전이에 의해 매우 규칙적인 전자기파동이 생성되는데, 이 파동을 측정할 결과로 매우 균일한 시간척도인 원자시 (atomic time)를 사용할 수 있게 되었다. 1967년에 국제도량형총회 (CGPM)는 세슘 원자를 표준으로 삼아 ‘1초는 세슘-133원자의 바닥상태의 초미세 준위 2개 사이의 전이에 의한 전자기파 복사의 9,192,631,770주기에 해당하는 시간이다’라고 정의하였다.

매 초 반복하는 진동수를 주파수 (frequency)라고 하고 시계란 이 반복하는 현상을 세는 장치이다. 따라서 시간 표준과 주파수 표준은 같은 의미를 갖게 되며, 이 주파수 표준 형태로 시간 표준이 유지되고 보급되고 사용된다. 원자 주파수 표준기 (atomic frequency standard)는 원자시 초의 정의를 실현하는 장치로 원자 시계 (atomic clock)라고도 한다. 각국의 표준기관에서는 표준 시간을 보급하기 위해 많은 원자 주파수 표준기를 보유하고 있고, 국제도량형국 (BIPM)에서는 세계 각국의 표준기관들이 보유하고 있는 원자 주파수 표준기 자료를 수집하여 가장 안정되고 신뢰성 있는 국제원자시 (TAI) 및 세계협정시 (UTC)를 생성하고 보급하고 있다[2].

외부적 조건에 의한 변형이 적고 오차가 미세한 원자

주파수 표준기는 정밀한 주파수 공급을 필요로 하는 항법위성, 통신위성 등에 빼놓을 수 없는 중요 기기로 사용되고 있다. 위성항법의 위치결정 원리는 정확한 위치를 알고 있는 위성으로부터 발신하는 전파를 수신하여 위성에서 관측 지점까지의 전파 도달시간 (time of arrival)을 측정하여 위성까지 거리를 결정함으로써 공간적 위치를 구하는 것이다. 그림 1은 전파 도달 시간으로부터 거리를 결정하는 원리를 나타낸 것으로  $1\mu s$  시간 오차에 따라 300m 거리 오차가 생기는 것을 볼 수 있다. 따라서 위성과의 거리를 결정하는 가장 중요한 요소는 정확한 전파 도달시간이므로, 정확한 위치와 시각 정보를 제공하는 위성들에게 있어 고정밀 주파수 생성 장치는 필수적이다.



자료 : <http://www.u-blox.com/>

그림 1. 전파 도달시간으로부터 결정되는 거리

GPS 항법위성은 여러 대의 세슘과 루비듐 원자 주파수 표준기를 탑재하고 있는데, GPS 시간척도는 주관제국 (master control station)에서 각 위성들이 보유한 원자 주파수 표준기로부터 나온 정보를 모아 결정하게 되고, 항법메시지를 통해 송출된 GPS 시각은 국제적 정밀 시각 비교나 시각 동기화를 필요로 하는 통신 분야에서 고정밀 주파수 및 시각 기준으로 사용된다.

본 논문에서는 우주용 원자 주파수 표준기의 기술 현황을 소개하기 위해, 2장에서 원자 주파수 표준기의 종류 및 특성에 대해서, 3장에서는 위성에 탑재된 우주용 원자 주파수 표준기에 대해서, 4장에서는 GPS 시간척도에 대해서, 5장에서는 위성 시각 정보를 활용하는 응용 분야 중 항법위성을 이용하여 국제적 시각비교를 수행하는 분야에 대해서 기술하고자 한다.

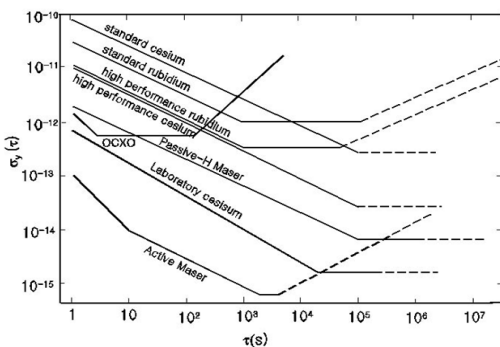
## 2. 원자 주파수 표준기 특징

원자 주파수 표준기에 이용할 수 있는 원자의 종류가 많으나 이 장에서는 대표적으로 우주용으로 많이 쓰이고 있는 루비듐, 세슘, 수소 원자 주파수 표준기의 원리 및 특성에 대해서 기술하고자 한다.

### 2.1 루비듐 원자 주파수 표준기

루비듐 원자(Rb87)의 천이 주파수 6,834,682,608 Hz를 이용한 루비듐 원자 주파수 표준기는 주파수의 경년 (aging) 변화가 큰 반면, 주파수 단기 안정도가 뛰어나고 소형이며 가격도 저렴하여 방송, 통신 분야에 널리 사용되고 있다.

모든 주파수 표준기는 사용된 소재의 기본 물성에 따라 출력 주파수의 안정도가 아주 다른 특성을 갖는다 [3]. 그림 2는 여러 상업용과 실험용 주파수 표준기의 안정도를 보여주고 있다. 세로축은 안정도 (allan variance), 가로축은 주파수 측정 시간을 나타낸다. OCXO (oven controlled crystal oscillator), 수소 메이저, 그리고 루비듐 원자 주파수 표준기가 단기 ( $\tau < 10$  s) 안정도가 일반 세슘원자 주파수 표준기 보다 비교적 우수한 반면, 장기( $\tau > 100$  s) 안정도가 나빠지는 특성을 지니고 있는 것을 볼 수 있다.



자료 : 참고문헌 [3]  
그림 2. 주파수 표준기의 단위시간별 주파수안정도

모든 주파수 발전기들은 일반적인 특성 때문에 초기의 시각차를 그대로 유지할 수 없으며 시간의 경과에 따른 누적 시간 오차가 생기게 된다. 이는 예측이

가능한데, 누적 시간 오차  $x(t)$ 는

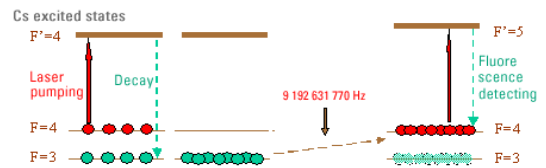
$$x(t) = x_0 + y_0 t + \frac{1}{2} K t^2 + \epsilon(t) \dots\dots\dots (1)$$

와 같이 표현할 수 있고, 여기서  $x_0$ 는 초기시간차,  $y_0$ 는 당시의 주파수차를 명목상의 주파수 값으로 나눈 상대 주파수로 일반적으로 정확도를 나타내며  $K$ 는 경년 변화율을 나타낸다. 이들 세 가지 항목은 환경적인 원인으로 유발되는 구조적인 오차로서 개선될 수 있는 반면  $\epsilon(t)$ 는 불규칙 편차에 해당한다. 이러한 수식을 통해 발전기의 신호가 주파수 변조되어 있거나  $K$ 가 상수가 아닌 다시 말해 직선적이지 못한 경우를 제외 하고는 일반적으로 발전기의 시간오차를 예측할 수 있다. 루비듐 원자 주파수 표준기의 경우 경년변화율이 거의 직선적이다. 따라서 식 (1)의 마지막 항인 불규칙 편차를 제외한 모든 항을 알 수 있기 때문에 시간오차를 예측할 수 있으며 어느 일정한 시간오차를 갖도록 루비듐 주파수 표준기의 출력 신호를 조정할 수 있다[4].

### 2.2 세슘 원자 주파수 표준기

세슘 원자(Cs<sup>133</sup>)의 천이 주파수 9,192,631,770 Hz를 이용한 세슘 원자 주파수 표준기는 그 동작 원리에 따라 크게 세 가지로 분류할 수 있는데, 영구자석 방식(또는 재래식), 광펄핑, 그리고 원자분수 주파수 표준기가 있다.

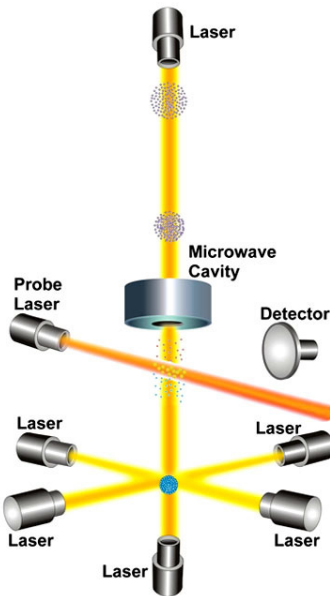
영구자석 방식 주파수 표준기는 세슘 원자의 에너지 상태에 따라 원자가 갖는 자기 모멘트가 다르기 때문에 자석에 의해 형성된 불균일 자장속을 통과한 원자들의 진행 경로가 달라지는 성질을 이용한다.



자료 : <http://kriss.re.kr/time>  
그림 3. 광펄핑원자시계원리

광펌핑 방식 주파수 표준기는 그림 3과 같이 레이저를 원자에 비추어 원자들이 모두 특정한 에너지 상태(F=4)가 되도록 만든다. 광펌핑 방식을 이용하면 세슘 원자 빔의 진행경로가 공간적으로 굴절되지 않고, 원자 빔의 손실이 적고, S/N 비를 높일 수 있으며, 강자석을 사용하지 않기 때문에 자장에 의한 주파수 편이를 줄일 수 있다는 장점이 있지만, 레이저 광을 이용하기 때문에 광편이(light shift)라는 새로운 주파수 편이가 발생하는 문제가 있다.

미국표준기술원(NIST)에서 개발한 광펌핑 방식의 원자 주파수 표준기인 NIST-7은 영구자석 방식인 NIST-6에 비해 불확도(uncertainty)가 20배 가까이 향상되었다[5]. 불확도란 참값이 알려지지 않은 상태에서 반복측정을 통해 측정값의 퍼짐 정도를 나타낸 것으로, 측정결과와 신뢰성과 관계가 있다. 한국표준과학연구원(KRISS)에서도 1988년부터 광펌핑 세슘 원자 주파수 표준기를 개발하였고, 정확도 및 주파수 안정도를 높이기 위한 개선 연구가 수행되었다[6].



자료 : <http://tf.nist.gov/>  
 그림 4. 원자분수시계원리

원자분수 방식의 주파수 표준기는 기존의 원자 주파수 표준기와는 달리 레이저 냉각된 원자를 이용한다. 그림 4와 같이 레이저로 많은 수의 원자를 수

$\mu K$  정도의 온도로 냉각한 후 연직 상방으로 쏘아 올려 원자가 운동하는 궤도의 정점 근처에서 저속 원자 빔을 얻는 방법이다. 원자분수 방식에서는 원자의 속도가 낮기 때문에 마이크로파와의 상호작용 시간이 길 뿐만 아니라, 한 지점에서 마이크로파와 두 번 상호작용하기 때문에 위상차가 없으므로 보다 정밀한 원자시계를 구현할 수 있다.

자료 : <http://kriss.re.kr/time>

표 1. 전 세계적인 원자 주파수 표준기의 변천 및 현황

세대/특성	제 1 세대	제 2 세대	제 3 세대
명칭	재래 방식 세슘원자시계	광펌핑 세슘원자시계	세슘원자 분수시계
특징	자석을 이용하여 원자의 에너지 상태를 분리	자석 대신 레이저 이용	레이저 냉각기술을 이용하여 원자의 속도 및 위치 조절
개발시점	1950년대 초	1980년대	1990년대
정확도	$10^{-13}$	$10^{-14}$	$10^{-15} \sim 10^{-16}$
상용시계	50여개 기관 250여대	상용 없음	상용 없음
대표실험실 및 원자시계	독일 PTB : CS1, CS2, CS3	미국 NIST-7, 일본NRLM-4, 프랑스 LPTF-JPO, 한국 KRISS-1	프랑스 LPTF-FO1, 미국 NIST, 영국 NPL, 일본 NRLM, CRL, 한국 KRISS, 중국 NIM, 대만, 브라질 등
관련분야 노벨상수상자	I. Rabi (1944) N. Ramsey (1989)	A. Kastler (1966)	C.Cohen-Tannoudji, S. Chu, W. Phillips (1997)

표 1은 전 세계 세슘 원자 주파수 표준기 기술의 변천 및 현황을 나타낸 것으로, 재래 방식, 광펌핑 방식, 원자분수 방식에 따라 특징, 정확도, 대표국가 및 원자시계 등으로 분류하여 표현하였다. 재래 방식의 분야에서는 독일 표준연구기관인 PTB의 기술이 가장 우수하다. 그렇지만 PTB를 제외하고는 이 방식의 원자시계에 관한 연구는 더 이상 이루어지지 않고 있다. 그러나 현재 전 세계적으로 재래 방식의 원자시계만이 상용으로 보급되어 있다. 광펌핑 방식의 원자시계 분야에서는 미국의 NIST의 기술이 가장 우수하다. 세슘원자 분수시계에 관한 연구는 프랑스가 제일 앞서 있다. 프랑스의 시간주파수연구소(LPTF)에서 제작한 LPTF-FO1가 세계에서 제일 먼저 제작된

분수시계이며, 미국의 NIST, 독일의 PTB, 일본의 NRLM, 한국의 KRISS, 영국의 NPL, 중국의 NIM, 그리고 대만과 브라질 등에서 원자분수 시계에 관한 연구를 진행하고 있다.

### 2.3 수소 메이저

수소 원자의 공명 주파수는 1,420,405,752 Hz이며, 수소 메이저는 유도복사에 의하여 마이크로파대역의 간섭성 전자기파를 증폭 및 발진하는 장치이다. 그림 2에서 보면, 수소 메이저는 세슘 원자 주파수 표준기에 비해 장기 안정도가 좋지는 않지만, 수 초에서 하루까지의 기간 동안은 다른 모든 발진기보다 가장 고성능의 안정도를 갖는다.

## 3. 우주용 원자 주파수 표준기

미국의 General Radio 사는 1960년대 말 최초로 우주용 루비듐 원자 주파수 표준기를 개발하였고, GPS의 전신인 NTS-1 (Navigation Technology Satellite)은 우주용 원자 주파수 표준기가 탑재된 최초의 위성이다. 1974년에 발사된 NTS-1호는 2개의 루비듐 주파수 표준기를 장착하여 발사되었고 1977년에는 NTS-2호가 세슘 원자 주파수 표준기를 장착하여 발사되었다[7]. 이 후로 많은 위성들이 원자 주파수 표준기를 장착하고 발사되었는데, 각 위성들이 탑재한 시각장치의 종류에 대해서 기술하고자 한다.

### 3.1 GPS

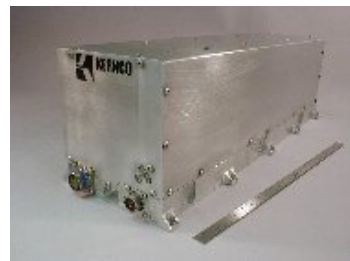
미국의 GPS는 24대의 인공위성이 6개의 궤도면에 분포하도록 설계된 위성항법시스템이다. GPS Block I 위성 중, 초기 3대 위성은 3개의 루비듐 원자 주파수 표준기를 장착하였으나, 루비듐의 낮은 신뢰성으로 인해 NAVSTAR-4호부터는 3개의 루비듐과 1개의 세슘 원자 주파수 표준기를 장착하였다. NAVSTAR-7호 위성부터는 루비듐의 온도 안정을

위해 온도제어기 (temperature controller)가 장착되어, 위성의 온도 변동이 있어도 일정한 온도를 유지할 수 있도록 하였다.

GPS Block II/IIA 위성은 2개의 루비듐과 2개의 세슘 원자 주파수 표준기를 장착하였다. GPS IIR 위성은 1997년에 처음으로 발사되었는데, 미국의 Perkin Elmer사에서 개발한 루비듐 원자 주파수 표준기[8]와 미국의 Kernco, Inc.사에서 개발한 세슘 원자 주파수 표준기[9]가 사용되었다. Block IIR 위성의 세슘원자 주파수 표준기는 Block II 위성의 것보다 크기가 35% 정도 작게 개발되었다[10]. 그림 5는 Perkin Elmer사에서 개발한 루비듐 원자 주파수 표준기를 나타낸 것이고, 그림 6은 Kernco, Inc.사에서 개발한 세슘 원자 주파수 표준기를 나타낸 것이다.



자료 : <http://www.perkinelmer.com/>  
 그림 5. 루비듐 원자 주파수 표준기  
 무게 6.6 kg, 크기 5"x10.9"x5.8"  
 (미국 Perkin Elmer 사 제작)



자료 : <http://www.kernco.com/>  
 그림 6. 세슘 원자 주파수 표준기  
 (미국 Kernco, Inc. 사 제작)

GPS IIF은 1996년에 계약이 체결되었고, 2개의 루비듐과 1개의 세슘 원자 주파수 표준기가 탑재되었다. 세슘 원자 주파수 표준기는 미국의 Symmetricom 사



에서 만들었고 루비듐 원자 주파수 표준기는 Perkin Elmer 사에서 만든 제품으로, GPS IIR 루비듐 원자 주파수 표준기보다 물리부 디자인이 개선되어 성능이 향상되었다. GPS IIF 위성의 첫 번째 발사는 2008년에 이뤄졌고, GPS IIR-M 위성은 다운링크 신호가 첨가 되었고 강력한 신호를 위해 출력 파워가 향상되었다.

GPS III는 위치, 항법, 시각 제공에 있어 보안성, 정밀성, 신뢰도의 성능향상을 가져올 GPS 현대화 시스템이다. 현재 30억 달러를 들여 개발 중에 있으며 12대의 GPS IIIA 위성을 위해 2008년 5월에 계약이 체결되었고 첫 번째 위성은 2014년에 발사될 계획이다. GPS III를 위해 우주용 광펄핑 세슘 빔 주파수 표준기가 개발되었는데, 10년 정도의 장비의 수명을 갖고 0.5일 주파수 안정도가  $4 \times 10^{-12}$  정도 된다[11].

### 3.2 GLONASS

러시아의 GLONASS는 24대의 위성이 3개의 궤도에서 운영되고 있는 위성항법시스템이다. 운영 준비(Block I : 1982년에서 1985년)를 위한 위성은 2개의 루비듐 원자 주파수 표준기를 장착하였고, 1985년부터 Block IIa, IIb, IIc 위성은 3개의 GEM 세슘 원자 주파수 표준기를 탑재하였다[12].

GLONASS는 24대의 위성으로 구성되어 있었으나, 이후로 7대의 위성이 노후 되어 기능을 다 하였고 2001년 정책 결정에 의하면 2011년까지 24대 위성을 정상 가동할 것이라고 한다. GLONASS의 기존 위성의 수명은 3년이고 GLONASS-M 위성의 수명은 7년, GLONASS-K 위성의 수명은 10년이다.

GLONASS-M의 위성의 수명이 짧은 이유가 몇 가지 있는데, 그 중의 하나가 원자시계의 특성 때문이다. 12대의 현대화 위성 GLONASS-M은 RAMRPA (Reshetnev Applied Mechanics Research and Production Association)에 의해 제작되었고 첫 번째 발사된 GLONASS-M 위성은 Radionavigation and Time 사에서 개발한 3개의 세슘 원자 주파수 표준기를 장착하였다. 이 시계의 성능은 하루 평균 안정도가  $1 \times 10^{-13}$ 이고, 온도 안정도가  $\pm 1^\circ\text{C}$ 이다.

GLONASS-K 위성은 더욱 경량화 된 위성으로

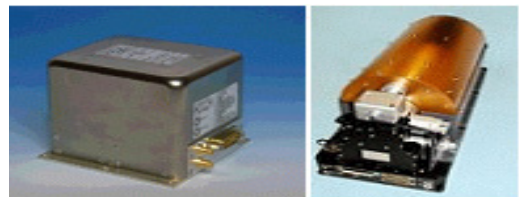
루비듐과 세슘 원자 주파수 표준기를 보유하였는데, 첫 번째 GLONASS-K는 2008년에 발사되었다.

### 3.3 GALILEO

GALILEO는 유럽연합과 ESA (European Space Agency)와의 합작으로 고정밀, 전지구적 위치 서비스를 제공하고자 하는 새로운 위성항법시스템이다. 이는 오늘날 사용가능한 GPS와 GLONASS 두 항법시스템과 상호적으로 운영될 것이다. 최종 갈릴레오 시스템은 30대의 위성 (27대: 운용, 3대: 여분)으로 구성될 것이고, 23,222 km 상공에서  $56^\circ$  기울기를 가지고 3개의 MEO (Medium Earth Orbits) 원 궤도를 돌 것이다.

GALILEO를 위한 우주용 원자시계로는 루비듐 원자 주파수 표준기와 PHM (Passive Hydrogen Maser)가 개발되었다. 모든 위성은 2개의 루비듐과 2개의 PHM를 장착할 것이다. 충분한 신뢰성 확보와 갈릴레오 수명(12년)을 만족시키기 위한 두 원자시계는 1980년대 후반부터 Neuchatel 관측소와 1995년 이후부터 TNT (Temex Neuchatel Time) 사에서 연구 되어 오던 것을 기반으로 개발이 이루어지고 있다.

GALILEO 실험 위성인 GIOVE-A가 2005년에 발사되었고 다음 위성이 2008년에 발사되었는데, GIOVE-A는 Surrey Satellite Technologies Ltd. 사에 의해 개발된 것으로, TNT 사가 제공한 두 개의 루비듐 원자 주파수 표준기를 장착하였고, 신호는 2006년 1월 12일에 전송되었다. GIOVE-B는 Galileo Industries 사에 의해 개발된 것으로 1개의 PHM과 2개의 루비듐 원자 주파수 표준기를 장착하여 발사되었다. 그림 7은 GALILEO 위성을 위해 개발된 우주용 원자 주파수 표준기이다.



자료 : <http://www.esa.int/>

그림 7. GALILEO 원자 주파수 표준기 (왼쪽 : 루비듐, 오른쪽 : PHM)

### 3.4 QZSS

일본의 QZSS (Quasi-Zenith Satellite System)는 지역항법시스템으로 수소 메이저와 루비덤과 세슘 원자 주파수 표준기를 장착하게 될 것이다. 수소 메이저는 NICT (National institute of information and Communications Technology)와 Anritsu Corporation 사가 합작하여 개발 중에 있고, 루비덤과 세슘 원자 주파수 표준기는 각각 미국의 Perkin Elmer 사와 Symmetricom 사에서 개발한 것이다.

### 3.5 GRAVITY PROBE-A

중력 적색편이 (red shift) 실험을 위해 Gravity Probe-A (GP-A)라고 알려진 실험이 1976년에 실행되었다. 1개의 수소 메이저가 Scout-D 로켓을 사용하여 10,000 마일의 고도로 발사되었는데, 비행시간은 약 2시간 정도로 우주에서의 수소 메이저의 주파수 변동을 지상의 수소 메이저와 비교하여 측정하였다.

### 3.6 MILSTAR

MILSTAR는 US 군용 통신 위성 시스템으로, 여러 개의 루비덤 원자 주파수 표준기를 장착하였다. 2개가 1996년에 비행된 이후로 6개가 보완책으로 발사되었다.

첫 번째 MILSTAR 위성은 1994년에 수정 발진자를 장착하여 발사되었다. 루비덤 원자 주파수 표준기는 1995년에 발사된 두 번째 위성에 실렸고, 그 이후로 2003년까지 발사된 6대의 MILSTAR 위성에는 FEI 사에서 만든 3개 또는 4개의 루비덤이 실렸다. 차세대 MILSTAR 프로그램인 AEHF (Advanced Extremely High Frequency)은 FEI 사에서 만든 3개의 루비덤 원자 주파수 표준기가 실릴 것이다.

### 3.7 BEIDOU/COMPASS

중국의 BEIDOU/COMPASS 위성항법시스템은 2000년 10월과 12월에 두 개의 위성이 지구정지궤도

상에 발사되었고, 2003년 5월에 세 번째 위성이 발사되었다. 그 위성들은 원자 주파수 표준기를 탑재하지 않았지만, 최근 중국은 18~20개의 루비덤 원자시계를 주문한 상태이다. 그러나 전지구적 배열을 형성하기 위해서는 적어도 21대의 위성이 필요로 하고, 특정한 위성에도 여러 원자시계가 일반적으로 장착되기 때문에 이는 충분하지는 않은 숫자이다. BEIDOU 위성항법시스템은 두 가지 수준의 서비스를 제공할 것이라고 공표하고 있다. 오픈 서비스는 사용자에게 10m 이내의 위치 정확도와 50 ns 이내의 시각 정확도를 제공해 주도록 제작되었다고 보고하고 있다.

## 4. GPS 시간척도

지상의 대부분의 시계는 UTC에 동기 되어 있지만, GPS 위성에 탑재된 원자시계는 GPS 시각을 기준으로 동기 되어 있다. GPS 시각은 지구자전효과를 고려하지 않아, UTC에 주기적으로 더해지는 윤초 (leap second)나 다른 보정이 이루어지지 않고 있다. GPS 시각은 1980년의 UTC를 기준으로 하고 있어, 이후로 오차가 누적되었다[13]. 보정량이 삽입되지 않으므로 GPS 시각은 국제원자시와 19초가 차이가 난다. 한편 GPS 위성 내부 시각은 상대론적 효과를 보정하고 지상국과의 동기를 위해 시계보정계수를 이용해 주기적으로 보정되고 있다.

GPS 항법메시지에는 GPS 시각과 UTC의 차이가 포함되는데, 2008년 12월 31일에 더해진 윤초에 의해 2009년에는 15초 차이가 난다. 수신기는 UTC와 지방시 (local time)를 계산하기 위해 GPS 시각으로부터 이 옅셋 15초를 빼준다. GPS 시각과 UTC 옅셋은 255초 (8 비트)까지 조정가능한데, 이는 현재의 변화 주기 (약 18개월에 1초씩 변한다)로 2300년까지 충분하다.

일반적으로 그레고리안력의 형식으로 년, 월, 일을 표시하는 반면, GPS date는 주 단위로 표현한다. week number는 항법메시지를 통해 10 비트 영역으로 전달된다. 그리고 매 1024주 (19.6년) 가 되었을 때 다시 0으로 된다. GPS week는 1980년 1월 6일 UTC 0시일 때 0으로 시작되어 1024주 후인 1999년

8월 21일 UTC 23:59:47초에 다시 0이 되었다. GPS 현대화 항법메시지에는 13 비트를 사용하여 매 8,192 주 (157년)를 반복하기로 하여 157년 후인 2137년에 GPS week가 0이 된다.

## 5. 항법위성을 이용한 시각비교

### 5.1 단일 측정법

GPS 위성을 이용한 시각비교 방법은 일반적으로 위성이 이용자의 상공을 통과할 때 그 신호를 수신하여 지상국 시각과 GPS 시각을 비교하는 단일 측정법이 사용되고 있다. 이와 같은 방식은 시각비교를 수행하는 시각이 다르므로 탑재시계의 안정도 및 궤도 데이터의 정밀도가 오차 요인으로 발생할 수 있으나, GPS 자체의 시각안정성으로 인하여 약 50ns 이내의 정밀도로 시각비교를 할 수 있다.

### 5.2. 동시 측정법

동시 측정법에 의한 시각비교 방법은 시각비교를 하고자 하는 양 지상국에서 GPS 위성의 신호를 동일한 시각에 수신하여 이루어진다. 이렇게 하면, 단일측정법에 의해 생기는 탑재시계의 오차와 궤도데이터의 오차가 상쇄되어 약 10 ns 정밀도로 시각비교를 할 수 있게 된다. 다만, 시각비교를 하려는 양 지상국에서 동시에 같은 위성을 관측해야 하므로 두 지상국의 거리가 3,000~5,000 km로 제한되는 단점이 있다.

### 5.3. 다채널 측정법

현재 국제도량형국에서 사용 중인 단일 채널 수신기의 시각비교 스케줄은 매 6개월마다 갱신된다. 다채널 C/A 코드 수신기는 관측 가능한 모든 GPS 위성에서 표준으로 정해진 13분 동안의 데이터를 매시 16분마다 한 번씩 수신한다. 다채널 수신 출력은 단일 파일로

저장되는데, 다채널 수신법을 이용하면 단일채널의 경우처럼 수신기의 수신 스케줄 조정 등을 필요로 하지 않는다. 이 방법에서는 최대 12개 GPS 위성의 신호 수신이 가능하지만 지형지물이 복잡한 도시의 경우에는 안정적인 시각비교에 15° 이상의 양각을 갖는 위성이 약 5~6개 정도가 이용된다. 이 경우 각 채널마다 하루 동안에 89개의 데이터 수신이 가능하다. 만약 5채널의 수신기를 이용하면 매일 445트랙의 16분 데이터를 얻을 수 있으며, 이를 이용하면 단일 채널 동시측정법에 비해 시각 주파수 정밀도가 3 배 정도 개선된다.

## 5. 4. GPS 위상 이용법

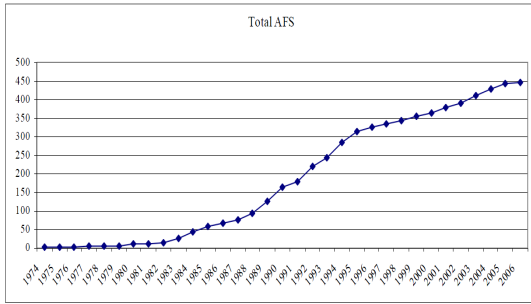
일반적인 GPS 시각비교용 수신기들은 GPS 신호의 코드값을 이용하고, 반송파 위상값은 이용하지 않는다. 그러나 이런 반송파 위상의 데이터를 축적하여 후처리 과정을 거치면 시각 주파수 비교 정밀도를 높일 수 있다. 이러한 장점 때문에 GPS 위상 데이터는 이미 고정밀도를 요하는 측량분야에서 이용되고 있다. 반송파 위상이 서로 동기가 되면, 다중경로의 영향이 없어지고 측정된 전리층 지연값을 이용하기 때문에 하루 평균  $10^{-15}$  정도의 주파수 안정도를 얻을 수 있다. 이는 현재의 주파수 표준기들이 요구하는 정밀도를 충분히 만족한다. 이러한 성능을 얻기 위해서는 하루 한번 비교하는 것이 아니라 연속적인 비교측정을 필요로 한다.

GPS 위상의 비교 역시 시스템의 지연시간 안정도에 영향을 받기 때문에, 정확한 측정을 위해서는 수신기의 여러 부분에 대한 지연시간의 안정도를 유지하고 그 변화를 주기적으로 측정하여야 한다.

## 6. 결 론

그림 8은 1974년 2개부터 시작하여 2006년에는 약 450여개의 원자시계가 우주용으로 활용된 것을 보여주고 있다.





자료 : 참고문헌 [7]

그림 8. 연도별 우주용 원자시계

지난 30년 동안 원자시계 성능에 있어 괄목할만한 성장은 전자공학적인 성능 향상과 소자를 초소형으로 만드는 기술이다. 많은 제조업자들은 초소형 루비듐 원자시계를 소개했고 완전성과 가격대비 성능에 있어 매우 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 초소형 루비듐은 스마트 시계와 같이 상업용 원자시계 시장의 변화를 가져오게 했지만, 우주용 시계에는 많은 영향을 주지는 못했다. 이유는 우주용 루비듐 원자시계를 가장 많이 사용하고 있는 것이 GPS이긴 하지만, 좋은 성능의 시계를 필요로 하는 GPS의 경우에는 루비듐 원자시계를 단순한 백업용으로 사용하고 있기 때문이다. NIST-7과 같이 성능이 좋은 광펌핑 세슘 원자시계는 우주용으로 사용가능할 정도로 개발이 되어 있는 상태이나, 아직까지 다이오드 레이저의 가용성이 문제가 되고 있다.

## 참고문헌

1. Wikipedia 웹페이지  
http://www.wikipedia.org
2. 양성훈, 이창복, 김영범, 김진대, “원자시간척도 및 국제 비교연구”, 한국통신학회지, 1999, pp.1-6
3. Lindon L. Lewis, “An Introduction to Frequency

- Standards”, Proc. of IEEE, vol. 79, no. 7, 1999, pp.927-935
4. 김영범, 정낙삼, 박동철, “루비듐 원자시계의 경과시간에 따른 시간오차 예측”, 한국전자과학회지, 제12권, 제3호, 2001, pp.439-445
5. D. B. Sullivan, *et al.*, “Primary atomic frequency standards at NIST”, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 2001, pp.47-63
6. 박영호, 권오성, 이수형, 박상언, 권택용, 이호성, “광펌핑 세슘 원자 주파수 표준기의 성능 개선”, 한국광학회지, 2006, pp.441-442
7. N. D. Bhaskar, J. White, L. A. Mallette, T. A. McClelland, and C. J Hardy, “A historical review of atomic frequency standards used in space systems”, Proc. of 1996 IEEE International Frequency Control Symposium, 1996, pp.24-32
8. R. Beard, *et al.*, “GPS block IIR rubidium frequency standard life test results”, Proc. of IEEE International frequency control symposium and PDA exhibition, 2002, pp. 499-504
9. J. A. Wisnia, “CAFS-A cesium atomic frequency standard for GPS block IIR”, Proc. of PTTI, 1992, pp. 199-208
10. T. Dass, G. Freed, J. Petzinger, J. Rajan, T. Lynch, and J. Vaccaro, “GPS clocks in space : current performance and plans for the future”, Proc. of 34th annual PTTI meeting, 2002, pp. 19-25
11. R. Lutwak, D. Emmons, R. M. Garvey, and P. Vlitras, “Optically pumped cesium-beam frequency standard for GPS-II”, Proc. of PTTI meeting, 2001, pp.19-32
12. Y. Gouzhva, A. Gevorkyan, A. Bassevich, P. Bogdanov, and A. Tyulyakov, “Comparative analysis of parameters of GLONASS spaceborne frequency standards when used onboard and on service life tests”, Proc. of IEEE International Frequency Control Symposium, 1993, pp.65-70
13. D. McCarthy, W. Klepczynski, “GPS and Leap Seconds”, GPS world, 1999, pp.50-57