

# 통신위성 이용 멀티채널 양방향 시각비교 연구

## Multi-channel Two-Way Time Transfer Using a Communication Satellite

양 성 훈\*, 이 창 복, 이 종 구, 이 영 규, 이 상 정

(Sung-Hoon Yang, Chang-Bok Lee, Jong-Koo Lee, Young-Kyu Lee, and Sang Jeong Lee)

**Abstract :** UTC (Coordinated Universal Time) has been made by the comparison results and the statistical analysis of primary clocks maintained by national standard institutes. Some kinds of technique have been used for international time transfer; since 1980s the study on methods and development of time transfer has conducted with activation of GPS application. And the more accurate and easier method made it use the official time transfer method for the generation of UTC. But recently TWSTFT (Two-Way Satellite Time and Frequency Transfers) as well as GPS time transfer are increasing in number because the TWSTFT is able to improve the accuracy and precision of time comparison owing to the elimination of the ionospheric and tropospheric delay errors thanks to the reciprocal propagation path. In this paper, we introduce the TWSTFT results by a multi-channel modem comparing with GPS P3-code.

**Keywords :** time transfer, communication satellite, multi-channel modem, TWSTFT, GPS

### I. 서론

하루를 86,000분의 1로 나누어 1초를 정의(태양시)하던 시대에는 지금처럼 시간이 산업에 미치는 영향이 크지 않았다. 하지만 세습원자가 개발되고 초에 대한 정의가 새롭게 정립[1]되면서 시간표준은 산업, 과학분야 그리고 실생활에 이르기 까지 그 중요도가 점점 높아지고 있다. 우리가 사용하고 있는 세계협정시는 전 세계의 표준기관들이 운용하고 있는 원자시계들을 서로 비교하여 통계에 의해 생성 [2]하고 있는데, 그 시계들을 한 곳에 모아놓고 직접 비교할 수 없으므로 그 시대에서 최적의 매체와 방법을 활용하여 상호간의 시각을 비교하여 왔다. 1980년대 후반까지는 해양에서 항해에 이용하는 LORAN-C 장파신호를 이용하여 원자시계들을 비교하였으며 그 정확도는 약 1 마이크로초에 불과 했다[3]. 그 후, GPS (Global Positioning System) 활성화와 더불어 GPS를 이용한 시각비교 수신기가 보급됨에 따라 단일채널 수신에 의한 시각비교 정확도는 수십 배 향상된 20여 나노초까지 도달하게 되었다[4].

이와 더불어 세계선진국들은 더 정확한 원자시계를 개발하고 이것을 시간척도에 활용하기 위한 연구를 지속적으로 수행하여 왔는데 그 개발된 원자시계의 결과를 검증하고 시간척도에 기여시키기 위해 더욱 정밀하고 정확한 시각비교를 필요로 하게 되었다. 그 뿐만 아니라 초고속 산업성장, 특히 통신분야의 발전에는 정밀 타이밍 기술이 필수적이었으며, 항법, 측지측량, 군사, 천문, 과학 등의 분야의 발전을 위한 기반 기술이 되었다.

통신위성이용 양방향 시각비교는 그 정확성에 대한 이론적 바탕으로 1970년대부터 미국, 일본, 프랑스, 독일 등에서 이미 실험을 통해 가능성을 확인하였고 비교 정확도에 있

어서도 그 당시는 획기적이라 할 만한 수십 나노초에 이르렀다. 그러나 당시에는 이렇게 높은 정확도를 갖는 시각비교의 필요성을 갖지 못했으며 위성 사용에 있어서 제약, 시각비교 장치와 위성사용료 등에 있어서 막대한 비용 등의 이유로 활성화되지 못하였다. 그러나 주파수표준기의 도약적인 발전과 정보 통신의 발달로 이전보다 정확한 시간 측정과 동기기술이 필요하게 됨에 따라 많은 비용이 투자됨에도 불구하고 양방향시각비교 시스템을 구축하는 표준기관이 늘어나게 되었으며, 측정기술도 향상되어 현재는 1 ns 정도의 비교 정확도를 가질 수 있게 되었다[5]. 이러한 우수성으로 인해 국제도량형국 (BIPM, Bureau International des Poids et Mesures)의 시간주파수 자문위원회 (CCTF, Consultative Committee for Time and Frequency)에서는 1999년 6월에 실시한 오스트리아의 TUG (Technical University Graz)와 독일의 PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) 간 TWSTFT (Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer) 방식에 의한 시각비교 데이터를 처음으로 국제원자시 (TAI, International Atomic Time) 생성에 이용하였으며 교정 캠페인을 수행하여 불확도(uncertainty)를 측정하는 등 적극적인 기여를 기대하고 있다[6]. 이미 유럽과 미국을 중심으로 기관간의 상호협약 하에 위성 지구국을 갖추고 시각비교를 수행하고 있는 추세이다. 아시아에서도 이런 시대적 요구에 따라 우리나라, 일본, 중국, 대만, 싱가포르의 표준기관들이 양방향시각비교 시스템을 구축하고 국가 간의 시각을 비교하게 되었는데[7], 시분할 방식으로 비교하던 기존의 방식과는 달리 코드분할 방식에 의한 멀티채널 모뎀을 이용함으로써 5개국 6개 기관이 동시에 비교할 수 있게 되었다. 본 논문에서는 세계에서 처음으로 사용된 멀티채널 양방향시각비교 시스템을 소개하고 이것에 의한 시각비교 결과를 GPS에 의한 것과 비교 제시하였다.

시간척도 분야에서의 GPS 활용 초기에는 단일 채널, 단일 주파수 수신기에 의한 C/A 코드를 이용하였지만 현재는 다채널, 이중주파수 수신기에 의한 P3 즉, P1, P2 코드를

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2008. 10. 20., 채택확정 : 2009. 1. 10.

양성훈, 이창복, 이종구, 이영규 : 한국표준과학연구원, 기반표준본부 (shyang@kriss.re.kr/cblee@kriss.re.kr/jklee@kriss.re.kr/ykleeks@kriss.re.kr)  
이상정 : 충남대학교 전기정보통신공학부(eesjl@cnu.ac.kr)

이용하여 이온층 지연 보정을 함으로써 시각비교에서 향상된 결과를 얻고 있다[8]. 이 방법은 현재 국제원자시 생성을 위해 가장 널리 사용되는 대표적 기술이므로 본 논문에서는 이 GPS P3 코드에 의한 결과와 통신위성을 이용한 양방향시각비교의 성능을 비교하였다.

**II. 양방향 시각비교 (TWSTFT) 시스템**

**1. TWSTFT 시스템의 개념**

통신위성은 고도 36,000 km 적도상공에 떠있는 정지위성으로써 GPS와는 달리 원자시계가 탑재되어 있지 않다. 따라서 자체에서 전송되는 시간정보가 없으므로 GPS와 같이 위성만을 이용해서는 시각을 비교할 수가 없고 단지 위성을 매개체로 이용하여 시각을 비교하고자 하는 지구국간에 시간정보를 상호 송수신함으로써 시각비교가 이루어진다. 이 비교과정에서 시각비교 이온층과 대류층의 영향이 같은 전파경로를 거치기 때문에 서로 상쇄될 수 있어 정확한 측정이 가능하게 된다.

본 시각비교방식은 그림 1에서 보는 바와 같이 동일한 모뎀을 갖춘 지구국 간에 시각비교 측정이 가능하다.

기본적인 구성과 역할을 살펴보면, 시각을 비교하고자 하는 대상인 기준시계(예, CLOCL#1), 그 시계의 출력 1 pps (pulse per second)를 코딩하여 송수신하기 위한 모뎀과 이 시각정보를 송신 및 수신하기 위한 RF 시스템이 실내에 설치되어 있으며 그 외에 위성과 통신주파수를 맞추기 위한 업, 다운 컨버터, 접시형 안테나 등으로 구성되어 있다. 그리고 신호의 흐름측면에서 살펴보면, 1 pps 시각정보가 70 MHz IF (Inter-Frequency)에 PRN (Pseudorandom Number) 코드로 변조된 후, 업 컨버터로 입력되면 통신위성으로 전송하기 위한 14.054 GHz로 바뀌고 이 신호는 증폭기에서 증폭된 후, 접시형 안테나를 통해 통신위성으로 전송된다. 이 신호는 위성 내에서 트랜스폰더에 의하여 12.306 GHz로 바뀌고 이 신호를 지상에 전파하게 된다. 위성으로부터 수신된 12.306 GHz 역시 LNA (Low Noise Amplifier)를 통해 다운 컨버터로 입력되고 그 출력 70 MHz에 상대방의 시각정보가 변조된 신호를 얻게 된다. 이것을 복조기를 통과하게 되면 상대국의 시각정보를 추출할 수 있으며 이 신호는 시

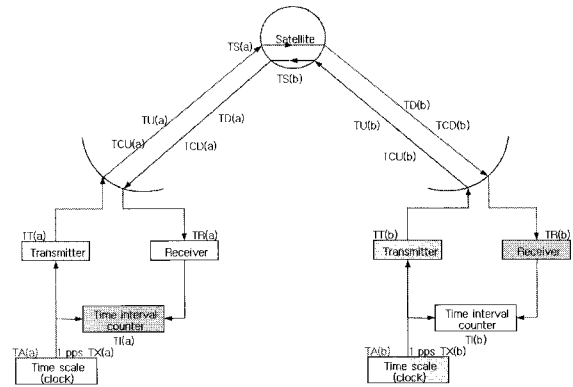


그림 2. 양방향시각비교 원리.

Fig. 2. Principle of TWSTFT.

- TA(k) : k 지구국의 시간척도
- TI(k) : 시각차이
- TT(k) : 모뎀 지연을 포함한 전송지연
- TR(k) : 모뎀 지연을 포함한 수신지연
- TU(k) : 업링크 전파지연
- TD(k) : 다운링크 전파지연
- TS(k) : 위성지연
- TCU(k) : 업링크의 Sagnac 보정
- TCD(k) : 다운링크의 Sagnac 보정

간각계 카운터에서 자국의 시각과 비교된 값을 매초마다 저장시킨다.

**2. 전파(propagation)지연 시간 측정**

시각비교의 불확도 요인으로서의 위성과 지구국간의 전파지연시간, 위성의 운동, 전리층 및 대기권의 지연 등이 가장 큰 영향을 미친다. 그러나 TWSTFT에 의한 비교방법은 전파가 정확히 같은 경로를 통과하므로 상호간의 측정에 영향을 주는 요인을 제거할 수 있어 정확한 시각비교가 가능하다[9]. 그림 2는 시각정보가 전달되는 전파경로를 나타낸 것이며 여기에 사용된 각 항목에 대한 정의를 다음과 같이 표현할 수 있다.

상기 그림 2에서 TA(a)은 지구국 a에서 유지하는 시간척도이고, TA(b)는 지구국 b에서 유지하는 시간척도이다. 두 지구국 시계의 차이를 TA(a) - TA(b)으로써 나타내고, 지구국 a에서 측정된 시간차 TI(a)은 지구국 b로부터 수신된 시각정보와 지구국 a에서 생성된 시각의 차이를 측정된 값이다. 즉, 지구국 b의 시간척도 TA(b) 외에 b국에서 a국으로 전달 경로 상에 발생하는 모뎀전송지연, 업다운링크 전파지연, Sagnac 보정, 위성지연, 수신지연 등이 포함된 것이므로,

$$TI(a) = TA(a) - TA(b) + TT(b) + TU(b) + TCU(b) + TS(b) + TD(a) + TCD(a) + TR(a) \quad (1)$$

로 표현할 수 있다. 또한 지구국 b에서 시간간격 계수기에 의해 측정된 시간차 TI(b)는 지구국 a에서 식 (1)이 유도된 것과 같으므로,

$$TI(b) = TA(b) - TA(a) + TT(a) + TU(a) + TCU(a) + TS(a) + TD(b) + TCD(b) + TR(b) \quad (2)$$

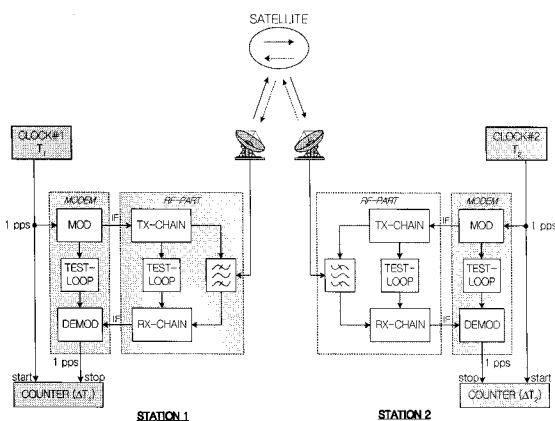


그림 1. 양방향시각비교 시스템의 구성도.

Fig. 1. Diagram of TWSTFT.

이다.

지구국a와 지구국b 사이의 차를 구하기 위해, 식 (1)에서 식 (2)를 차분하면,

$$\begin{aligned} TI(a) - TI(b) &= 2TA(a) - 2TA(b) + TT(b) - TT(a) + TU(b) \\ &\quad - TU(a) + TS(b) - TS(a) + TD(a) - TD(b) \\ &\quad + TR(a) - TR(b) + TCD(a) - TCU(a) \\ &\quad - TCD(b) + TCU(b) \end{aligned} \quad (3)$$

따라서 식 (3)으로부터 두 지구국 시간척도 차이는

$$\begin{aligned} TA(a) - TA(b) &= 1/2[TI(a) - 1/2[TI(b)] + 1/2[TS(a) \\ &\quad - TS(b)] + 1/2[TU(a) - TD(a)] \\ &\quad - 1/2[TU(b) - TD(b)] + 1/2[TT(a) - TR(a)] \\ &\quad - 1/2[TT(b) - TR(b)] - 1/2[TCD(a) \\ &\quad - TCU(a)] + 1/2[TCD(b) - TCU(b)] \end{aligned} \quad (4)$$

로 나타낼 수 있다.

식 (4)에서, 우변의 위성지연시간[TS(a)-TS(b)]은 서로 같은 주파수와 채널, 트랜스폰더를 사용하는 경우에는 상쇄될 수 있지만 그렇지 않은 경우에는 위성을 궤도에 올리기 전에 이미 측정을 하여 그 데이터를 확보하고 있어야 정확한 보정이 가능하다. [TU(a)-TD(a)]은 지구국 a에서의 업, 다운 전파경로 상에서 발생하는 지연값이며, [TU(b)-TD(b)]는 지구국 b의 업, 다운 경로 상에서 발생하는 지연값으로 두 지구국이 동일한 경로를 지나게 되므로 상쇄된다. 그리고 [TT(a)-TR(a)]과 [TT(b)-TR(b)]는 각각의 지구국 송수신기에서 발생하는 지연값이다. 그러나 이 값은 같은 종류의 모델과 송수신기를 사용하는 TWSTFT에서는 어느 정도 상호 상쇄되어 그 양이 크지 않지만 나노초 이하의 값을 정확히 보정하기 위하여 이동 지구국과 교정된 케이블 등을 이용하여 각 지구국에서 측정한 후에 그 보정값을 산출한다. 본 논문의 보정값은 교정용 이동지구국을 각 기관에 순차적으로 설치하고 약 3일 동안 측정하여 교정값을 산출하였다.

Sagnac 효과는 지구 중심축을 기준으로 자전운동에 의해 발생하므로 그림 3과 같이 z 축 중심의 원통좌표계를 생각할 수 있으며, 그 효과는 z 축에서 내려다본 x, y 평면상에 투영된 P점의 좌표와 같다. 따라서 위성(s)에서 지구국(k)으로 보내진 다운링크 신호에서의 보정값 TCD는,

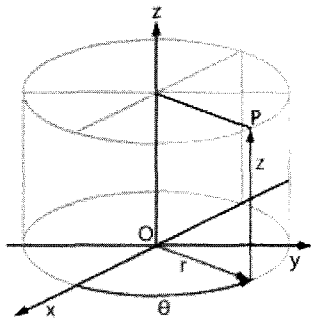


그림 3. 원통좌표계.

Fig. 3. Cylindrical coordinate system.

$$TCD(k) = (\Omega / c^2) \times [Y(k) \times X(s) - X(k) \times Y(s)] \quad (5)$$

이며, 여기서

- $\Omega$  : 지구 자전속도 ( $= 7.2921 \times 10^{-5}$  rad/s)
- $c$  : 광속 ( $= 299,792,458$  m/s)
- $X(k)$  : 지구국의 지구중심에 대한 x좌표 (m)  
( $= r \cos [LA(k) \times \cos [LO(k)]]$ )
- $X(s)$  : 위성의 지구중심에 대한 x좌표 (m)  
( $= R \cos [LA(s) \times \cos [LO(s)]]$ )
- $Y(k)$  : 지구국의 지구중심에 대한 y좌표 (m)  
( $= r \cos [LA(k) \times \sin [LO(k)]]$ )
- $Y(s)$  : 위성의 지구중심에 대한 y좌표 (m)  
( $= R \cos [LA(s) \times \sin [LO(s)]]$ )
- $r$  : 지구 반경 ( $= 6,378,140$  m)
- $R$  : 위성 궤도 반경 ( $= 42,164,000$  m)
- $LA$  : 위도
- $LO$  : 경도

이다.

정지위성은 적도 상에 위치하므로,  $LA(s) = 0$ 이다. 따라서 식 (5)는 정리하면

$$TCD(k) = (\Omega / c^2) \times R \times r_x \times \cos [LA(k)] \times \sin [LO(k)] - LO(s) \quad (6)$$

가 된다. 이 값은 식 (6)에서 알 수 있는 바와 같이 지구국과 위성의 좌표에 의해서 결정되어 지는 양이다. TCD와 TCU는 지구국과 위성의 위치의 함수이므로 같은 양의 부호만 반대의 성질을 가진다. 즉,  $TCD(k) = -TCU(k)$ 이다. 따라서 식 (4)의 우변 마지막 두 항의 결과를 총 Sagnac 보정값 TC(ab)라고 하면,

$$\begin{aligned} TC(ab) &= -1/2[TCD(a) - TCU(a)] + 1/2[TCD(b) - TCU(b)] \\ &= -TCD(a) + TCD(b) \end{aligned} \quad (7)$$

이다.

결과적으로 TWSTFT에 의한 두 지구국의 시간척도 차이  $TA(a)-TA(b)$ 는,

$$\begin{aligned} TA(a) - TA(b) &= 1/2[TI(a)] - 1/2[TI(b)] \\ &\quad - TCD(a) + TCD(b) + CALR \end{aligned} \quad (8)$$

이 된다. 여기서 CALR은 이동 지구국을 이용하여 측정된 교정값이며 그 값을 보정하면 두 지구국에서 운용하는 시각을 나노초 이하의 정확한 비교가 가능해 진다.

### 3. 멀티채널 모델

그림 1의 블록도에서 알 수 있듯이 기존 시스템에서는 반드시 1:1의 지구국간에 송수신만 가능한데 주국과 종국이 자기 고유의 ID를 갖게 되며 이들 사이에 정해진 시간에만 상호비교가 가능하다. 주국의 모델에서 상대 지구국에 신호를 보낸 후에 서로의 통신이 준비되었음을 확인하고 나면 코드와 반송파를 잠김상태로 유지시키고 서로의 1 pps 신호를 주고받게 된다. 그러나 복조기를 복수로 구성하고 데이터 변조를 CDMA (Code Division Multiple Access)로 할 경우 동시에 여러 지구국 간에 측정이 가능해 진다[10]. 그

림 3은 멀티채널 방식에 의한 모뎀을 나타낸 것인데, 각각의 지구국 a, b, c, d에서 유지하는 시간척도  $T_a, T_b, T_c, T_d$ 가 존재할 때,  $TU_a$ 는 타 지구국들로 보내지는 지구국 a에서 시간척도( $T_a$ ) 업링크 데이터이며  $TD_a$ 는 타 지구국들에서 보내진 시간척도들( $T_b, T_c, T_d$ )의 다운링크 데이터이다. 이때 복조기에서는 각 코드에 맞는 즉, 상관관계가 높은 데이터만을 추출해서 시각비교를 할 수 있는데 그 원리는 다음과 같다.

통신 위성으로부터 동시에 수신된 신호를 각각의 지구국에서 수신하였을 때의 수신 신호  $r(t)$ 에 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r(t) = \sum_{i=1}^N d_i(t) \times PN_i(t) \times \cos(2\pi f_c t) \quad (9)$$

여기에서  $d_i(t)$  및  $PN_i(t)$ 는 각각의 지구국에 해당하는 데이터 및 의사잡음(Pseudorandom noise) 코드를 나타내고  $f_c$ 는 반송파 주파수를 나타낸다. 각각의 모뎀에서는 각 지구국에 해당하는 의사잡음 코드를 가지고 있어서 해당 PN 코드에 대해서는 자기상관계수가 1이고 다른 PN 코드에 대해서는 0의 상호상관계수를 갖기 때문에 반송파가 제거된 후의 각 모뎀에서 복조된 신호는

$$x_j(t) = \sum_{i=1}^N d_i [PN_i(t) \times PN_j(t)] = d_j(t), \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

와 같이 자신의 PN 코드에 해당되는 데이터만을 복조할 수

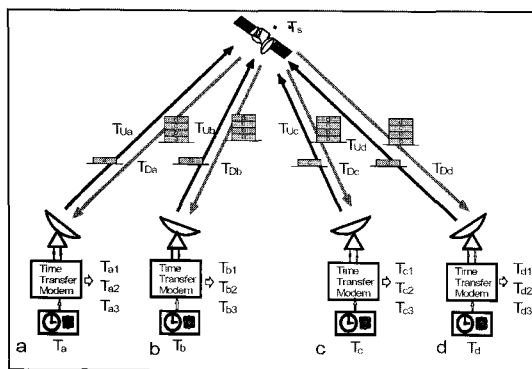


그림 4. 멀티채널 양방향시각비교 시스템의 개념.

Fig. 4. Concept of the multichannel TWSFTT.

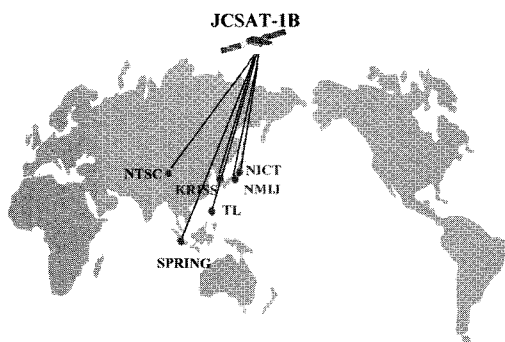


그림 5. JCSAT-1B 위성이용 양방향시각비교 참여기관.

Fig. 5. TWSFTT participant institutes using JCSAT-1B.

가 있다. 이 복조된 각 지구국의 시간척도 데이터 식 (4)를 적용하여 두 지구국간에 시각차를 구할 수 있다. 그림에서 지구국 a의  $Ta1$ 은  $Ta$ 와  $Tb$ 의 차이,  $Ta2$ 는  $Ta$ 와  $Tc$ 의 차이 그리고  $Ta3$ 는  $Ta$ 와  $Td$ 의 차이이며, 타 지구국 b, c, d에서도 같은 의미를 나타낸다. 이 일련의 작업은 서구 지역에서 수행하는 시분할방식과 달리 세계 최초로 아시아 6개 기관이 코드분할방식에 따라 각 지구국에서 동시에 수행되고 있다.

본 논문에 사용된 시스템은 최대 8개 지구국이 동시에 이용할 수 있도록 설계되어 있다. 현재 유럽과 미국에서 사용하고 있는 시스템은 시분할에 의해 순차적으로 순서를 정하고 1:1 접속에 의해 시각비교를 수행하고 있다. 이에 따라 위성 접속시간도 길어지고 통신사용료도 증가될 수밖에 없는 점을 감안하면 멀티채널 방식은 경제성에서도 실용적인 시스템이라고 할 수 있다. 그리고 멀티채널 모뎀의 장점은 같은 시각에 동시 측정이 가능하여 참여기관의 측정시각차를 고려하지 않아도 되며, 8개 채널 중에 하나를 내부 지연시간과 변동을 측정함으로써 시스템 자체의 지연시간과 변동에 의한 오차를 줄일 수도 있다.

이 멀티채널모뎀을 이용하여 그림 4와 같이 아시아지역에서 우리나라 KRISS (Korea Research Institute of Standards and Science), 일본의 NICT (National Institute of Information and Communication Technology)와 NMIJ (National Metrology Institute of Japan), 중국의 NTSC (National Time Service Center), 대만의 TL (Telecommunication Laboratories), 싱가포르의 SPRING (Standards, Productivity and Innovation Board) 등 6개 기관 참여한 결과를 비교하였다.

### III. 멀티채널모뎀 이용 국제 양방향시각비교 결과

그림 6와 같이 멀티채널 모뎀을 사용하고 동경 150도의 적도상공에서 운용 중인 JCSAT-1B 통신위성을 이용하여 KRISS와 아시아 지역의 시간주파수 표준기관들과 시각비교를 수행하였다. 시각비교에 참여하는 각 기관은 상호간에 시각비교를 수행하고 그 비교결과를 각 기관의 시스템 원격제어 컴퓨터에 기관별로 저장된다.

지구국과 정지궤도를 운행하는 위성의 상대적인 속도 차이로 인하여 주파수 편이가 발생한다. 또한 정지위성이라

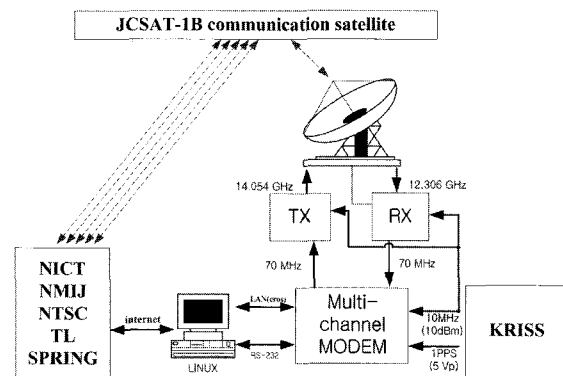
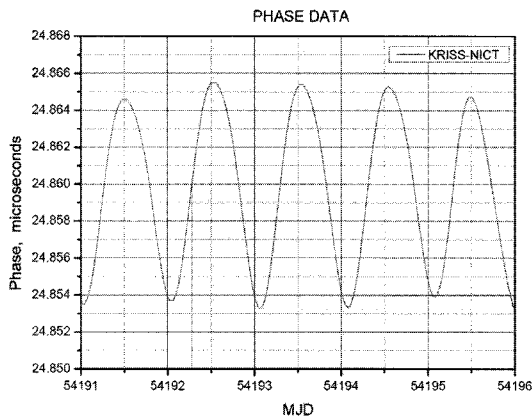


그림 6. 멀티채널 양방향시각비교 시스템.

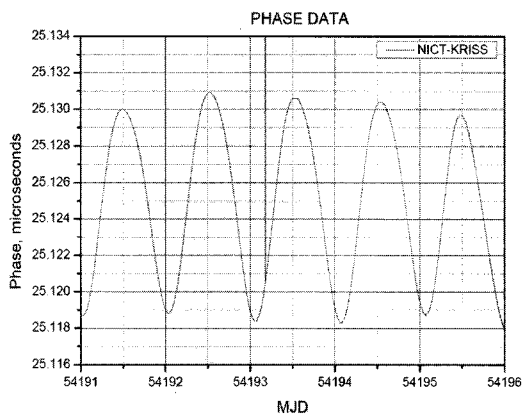
Fig. 6. TWSFTT system by multi-channel modem.

고 하더라도 엄밀히 보면 가만히 멈춰있는 것이 아니라 매일 8자 운동을 하고 있는데 이에 따라 위성위치가 변하면서 한쪽 지구국에서 시각정보를 수신할 때 시간지연의 변동이 발생한다. 그림 7은 각각의 지구국에서 한쪽 방향으로 수신한 결과인데 여기에는 상대 지구국의 시간적도와 시간지연이 포함되어 나타난 결과이다.

KRISS를 지구국 a, NICT를 지구국 b라고 하면, 식 (1)과 (2)로부터 각각의 측정데이터  $\Pi(a)$ 과  $\Pi(b)$ 를 얻을 수 있는데, 그림 7(a)는 KRISS를 출발하여 NICT에 도착한 시각정보로부터 시간간격측정기에 의해 측정된 시각차이며, 그림 7(b)는 NICT로부터 받은 시각정보를 KRISS에서 측정된 시각차이다. 즉, 2007년 4월 1일(MJD (Modified Julian Date) 54191)에서 2007년 4월 5일 (MJD 54195)까지 5일 동안에 대하여  $\Pi(a)$ 과  $\Pi(b)$ 를 나타내었다. 이 두 데이터를 차분하고 정리하면 식 (4)에 나타난 바와 같이 두 기관간의 시각차( $TA(a)-TA(b)$ )를 구할 수 있다. 그림 8은 이와 같은 처리 과정을 거쳐 얻어진 KRISS와 NICT, NMIJ, TL, NTSC, SPRING 사이의 위상측정 결과를 5분 동안 평균하여 얻은 데이터이다. 통상적으로 시간주파수의 평가방법으로 알란편차로 주파수 안정도를 정의하여 나타낸다[11]. 이것은 시간축에서 두 샘플 간격에 의한 분산을 구하는 것으로, 측정 시간  $\tau$  동안의 안정도를 나타낸다. 그림 9는 그림 8의 데



(a) time difference (KRISS to NICT).



(b) time difference (NICT to KRISS).

그림 7. 5일 동안(MJD 54191~54195)의 단방향 데이터.  
Fig. 7. Phase data by one-way for 5 days (MJD 54191 to 54195).

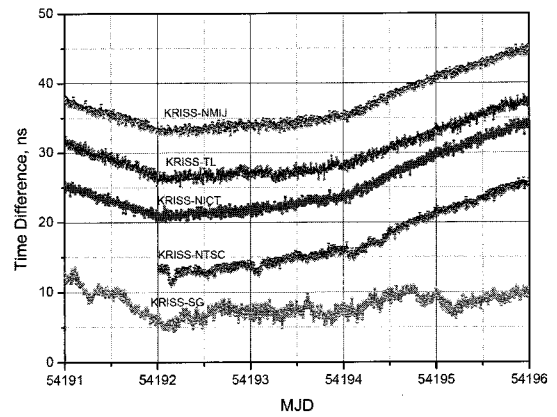


그림 8. 멀티채널 양방향시각비교에 의한 KRISS와 해외 표준 기관과의 시각차이.  
Fig. 8. Time differences between KRISS and each institute by a multi-channel TWSTFT.

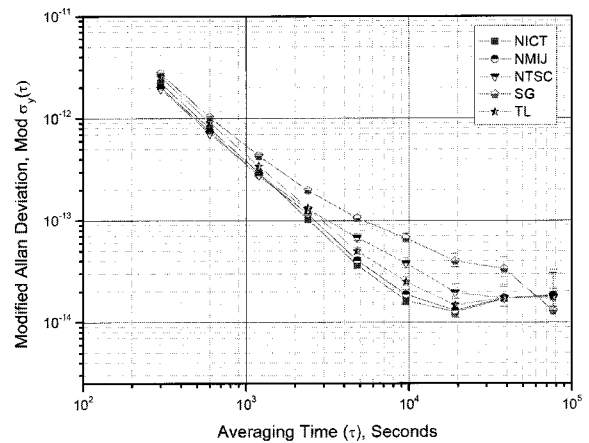


그림 9. 멀티채널 양방향시각비교에 의한 KRISS와 해외 표준 기관과의 시각비교 안정도.  
Fig. 9. Stabilities between KRISS and each institute by a multi-channel TWSTFT.

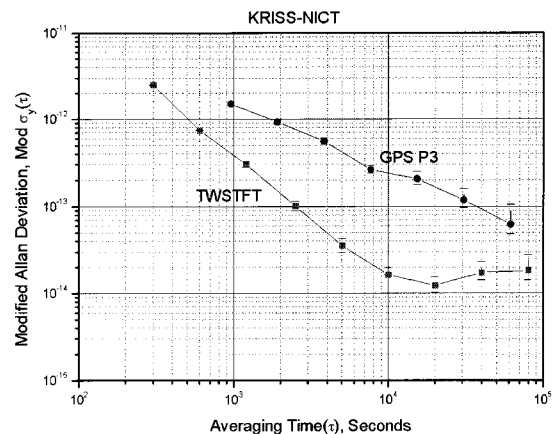


그림 10. GPS P3-코드와 TWSTFT에 의한 NICT와의 안정도 비교.  
Fig. 10. Stability comparison between KRISS and NICT by GPS P3-code and TWSTFT.

이터로부터 계산된 KRISS 시계에 대한 각 기관의 주파수 안정도를 나타낸 것으로, 샘플링 시간  $3 \times 10^2$ 초부터 약  $8 \times 10^4$ 초에 대하여 측정된 결과이다.

GPS와 측정 정확도를 비교하기 위하여, 현재 가장 많이 이용하는 비교방식인 GPS P3 코드 데이터를 이용하여 비교하였다. NICT는 거리상으로 KRISS와 가장 근접(약 1090 km)해 있는 곳이므로 GPS의 동시관측(common-view) 방식으로 비교할 때 경로상의 오차가 타 기관에 비해 적어 불확도(uncertainty) 측면에서 가장 우수하므로 NICT를 선정하여 비교하였다. 그림 10에서 보는 바와 같이, 두 방법에 의한 시각비교 안정도를 측정된 결과에서 샘플링 시간  $10^4$ 초 부근에서는 안정도가 약 10배 더 좋은 결과를 얻었다. 이것은 TWSTFT에 의한 방법이 현재 국제시각비교에서 통용되고 있는 GPS P3 코드에 의한 방법보다 샘플링 시간  $10^5$ 초까지는 더 정확히 측정할 수 있음을 보여주고 있다.

#### IV. 결론

현대사회에 많은 기술들이 발전하고 그 기술은 우리 생활에 편의를 제공하고 있다. 그 기술들 중에 하나가 정확히 같은 시간을 이용하는 것인데 이것은 국지적인 시각 동기 뿐만 아니라 나라전체 그리고 전 세계가 정확히 일치된 시간을 사용하는 것이다. 이러한 목적을 위해 각국의 표준기관에서는 보다 향상된 시각비교 방법을 개발하고 더욱 안정되고 정확한 시간척도 생성을 위해 노력하고 있다.

통신위성이용 양방향시각비교는 기존 보다 향상된 시간척도를 생성하기 위한 노력과 필요에 따라 서구 선진 기관에서는 정착 단계에 있으며 이미 일부 기관에서는 국제원자시 생성에 기여하고 있다. 그러나 아시아의 6개 표준기관에서는 도입 시기는 서구지역에 비해 다소 늦었으나 한 단계 향상된 멀티채널모뎀 방식에 의한 TWSTFT 시스템을 세계에서 처음으로 구축하고 시각비교를 수행하고 있다.

현재 BIPM에서 주관하는 국제시각비교에서 가장 많이 사용되고 있는 GPS P-코드를 이용하는 비교 방식보다 안정도에서 샘플 시간에 따라 최대 10 배 정도 향상된 결과를 얻을 수 있었으며, 이는 현재 사용되고 있는 다양한 시각비교방법 중에 양방향시각비교 기술은 초정밀 시각비교 및 동기 분야에서 가장 정확한 방법임을 확인하였다. 이 시각비교 기술은 원거리의 두 시계를 정확하게 비교할 수 있으므로 시간척도 뿐만 아니라 KRISS와 해외 표준기관에서 개발하고 있는 차세대 주파수표준기를 상호 비교하고 평가하기 위해 활용될 것이다.

또한 그림 7은 시각비교실험에 사용된 JCSAT-1B 정지위성이 어떤 움직임을 갖고 있는 지보여 주는 것이다. 본 실험의 단방향 시각측정 결과로 정지위성의 위치변화를 모니터링할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 실험에 참여하는 각 표준기관은  $10^{-13}$ 의 정확도를 가진 원자시계를 사용하고 있고 양방향시각비교 정확도가 나노초 이하이므로 수십 cm 해상도로 정지위성의 위치변동을 실시간으로 알 수 있다. 따라서 정지위성의 위치를 정밀 모니터링하고 위성의 궤도를 제어하는 기술에도 활용할 수 있다.

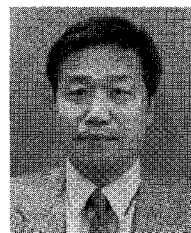
#### 참고문헌

- [1] Report of the 13th CGPM, 1967.
- [2] B. Guinot, "Some properties of algorithms for atomic time scales," *Metrologia*, vol. 24, no. 7, pp. 195-198, 1987.
- [3] 송양섭 외, "전자기분야 기본연구," 한국표준과학연구원, 보고서 KRISS-97-010-IR, pp. 344-347, 1997.
- [4] W. Lewandowski et al., "A calibration of GPS equipment at time and frequency standards laboratories in the USA and Europe," *Metrologia*, vol. 24, no. 5, pp. 181-186, 1987.
- [5] D. Kirchner, "Two-way time transfer via communication satellites," *Proceeding of the IEEE*, vol. 79, no. 7, pp. 983-989, 1991.
- [6] D. Piester, A. Bauchl, L. Breakiron, D. Matsakis, B. Blanzano, and O. Koudelka, "Time transfer with nanosecond accuracy for the realization of International Atomic Time," *Metrologia*, no. 45, pp. 185-198, 2008.
- [7] 양성훈, 이창복, "위성을 이용한 양방향 시각비교," *Proceeding on GNSS workshop 2002*, pp. 314-316, 2002.
- [8] V. Zhang, "Estimating the Receiver Delay for Ionosphere-free code (P3) Time Transfer," *Proceeding of 38th Annual Precise Time and Time Interval Meeting*, pp. 467-472, 2006.
- [9] Recommendation ITU-R TF.1153-1, "ITU-R Time signals and frequency standards emissions," vol. 1997 TF series, 1997.
- [10] M. Imae, T. Gotoh, T. Suzuyama, Y. Shibuya, F. Nakagawa, and R. Tabuchi, "Time Transfer Modem for TWSTFT Developed by CRL," *Proceedings of ATF2002*, Daejeon, Korea, pp. 210-216, 2002.
- [11] D. W. Allan, "Statistics of atomic frequency standards," *Proc. IEEE*, vol. 54, pp. 221-230, Feb. 1966.



#### 양성훈

1984년 광운대학교 전자공학과졸업. 1997년 충남대학원 전자공학과 통신 및 제어 석사. 1984년~현재 한국표준과학연구원 기반표준본부 길이시간센터. 관심분야는 위성응용시각비교 및 동기.



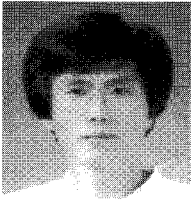
#### 이창복

1980년 서강대학교 전자과 졸업. 1982년 동 대학원 석사. 1994년 동 대학원 박사. 1982년~현재 한국표준과학연구원 기반 표준본부 길이시간센터. 관심분야는 Satellite timing 활용.



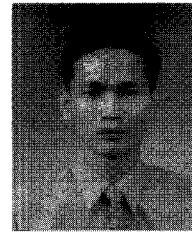
### 이 종 구

1989년 청주대학교 응용통계학과졸업.  
1989년~현재 한국표준과학연구원 기반  
표준본부 길이시간센터. 관심분야는  
시각 시스템 교정 및 통계 추정.



### 이 상 정

1979년 서울대학교 전자공학과 졸업.  
1981년 동 대학원 석사. 1987년 동 대  
학원 박사. 1988년~현재 충남대학교  
전기정보통신공학부 교수. 관심분야는  
강인제어, GNSS.



### 이 영 규

1995년 전북대학교 전자공학과졸업.  
1997년 광주과학기술원 정보통신공학  
과석사. 2002년 동 기술원 박사. 2002  
년~현재 한국표준과학연구원 기반표준  
본부 길이시간센터. 관심분야는 위성  
응용 시각 비교 및 동기, 통신망동기,

유비쿼터스 측위.