

論 文**GPS 위성 동시수신법에 의한 국제시각비교**

正會員 李 昌 福* 正會員 全 寅 德* 正會員 鄭 樂 三*

International Time Comparisons in Common-View via Global Positioning System(GPS) Satellites

Chang Bok LEE*, In Deok JEON*, Nak Sam CHUNG* *Regular Members*

要 約 상용 GPS 수신기로 일본통신연구소(CRL)와 미해군관측소(USNO)와의 시각비교를 GPS 위성 동시수신법을 이용하여 수행하였다. 상대주파수 안정도는 평균화 시간이 1 일일 때 1.5×10^{-18} 이었다. GPS 동시수신법에 의한 시각비교 결과는 LORAN-C 지상파에 의한 결과보다 정밀정확도가 10배 정도 더 높았다.

ABSTRACT International time comparisons using a commercial GPS receiver, with the common-view program of GPS satellite time links, have been carried out between Korea Standards Research Institute(KSRI) and Communications Research Laboratory(CRL) of Japan, and also between KSRI and United States Naval Observatory(USNO).

The frequency stability is about 1.5 parts in 10^{18} for the averaging time of 1 day. The result of time comparisons obtained by the GPS common-view technique was about 10 times better than that by the LORAN-C(Long Range Navigation) ground wave technique.

I. 서 론

시간·주파수의 국가표준을 유지하고 있는 표준연구소에서는 시간·주파수의 국제적 비교

및 국제소급성의 지속성 유지방법으로 LORAN-C (Long Range Navigation) 방송신호를 이용해 왔다. 그런데 아시아에서 수신가능한 북서태평양의 LORAN-C 신호는 미국 및 유럽 지역에서 수신하는 북대서양 LORAN-C 신호와는 송신국들 사이의 거리가 멀기 때문에 고 정밀도의 시각동기가 되어 있지 않았다. 따라서 LORAN-C 를 이용한 두 지역사이의 고 정밀도의 시각비교는 불가능하였다. 최근 미국, 일본, 유럽 등의 선진국에서는 시각비교 및 항법 면에서

*韓國標準研究所
Korea Standards Research Institute
論文番號 : 90-10(接受1989. 1. 13)

LORAN-C 방법보다 정밀 정확도가 더 좋은 인공위성을 이용한 방법을 개발하여 많이 이용하고 있다. 특히 GPS는 전세계적인 고정밀 정확도의 시각비교에 많이 이용되고 있다⁽¹⁾.

GPS는 미국 국방성이 개발하고 있는 것으로 LORAN-C 및 NNSS(Navy Navigation Satellite System)를 대체할 인공위성을 이용한 전세계적인 위치측정 시스템이다. 표 1은 GPS의 제원이다⁽²⁾. GPS 위성시계들은 GPS time이라는 고유의 시간척도(time scale)에 동기되어 있다. 시각비교는 이 GPS time과 지상국의 시계와의 시각비교 데이터를 시간 관련기관들 사이에 서로 교환함으로써 이루어진다. 국제도량형국(BIPM)에서는 1983년부터 국제시각비교 데이터로 이용해 오던 LORAN-C 데이터에 GPS 데이터를 추가하여 국제원자시(TAI) 생성에 사용해 오고 있으며 앞으로는 GPS 데이터만이 국제 시각비교 데이터로 사용될 전망이다.

표 1 GPS의 제원
The source of GPS.

평균고도	20,000 km
주 기	12 시간
궤도 경사각	55°
탑재 주파수표준기	Rb시계 CS 시계
거리 측정신호 중심주파수	L1 1575.42MHz L2 1227.60MHz
거리 측정신호 변조방식	PN부호(P code, C/A code)에 의한 확산변조
P code 송신주파수	L1 및 L2
P code clock rate	10.23 MHz (1주기=1 week)
C/A code 송신주파수	L1
C/A code 발생방식	10단 FSR 2조에 의한 Gold code(주기 1023bits)
C/A code clock rate	1.023 MHz (1주기=1 ms)
송신 데이터	궤도정보, 탑재시각보정치 등
데이터 송신 rate	50 BPS

본 논문에서는 상용 GPS 수신기로 한국표준 연구소와 일본통신연구소(CRL) 및 미해군관측소(USNO)간의 commom-view 방법에 의한 시각비교 결과에 대해 논하였다⁽³⁾.

II. 시각비교원리

GPS를 이용한 시각비교는 그림 1과 같이 두가지 방법이 주로 이용된다. 그림 1-a는 일반

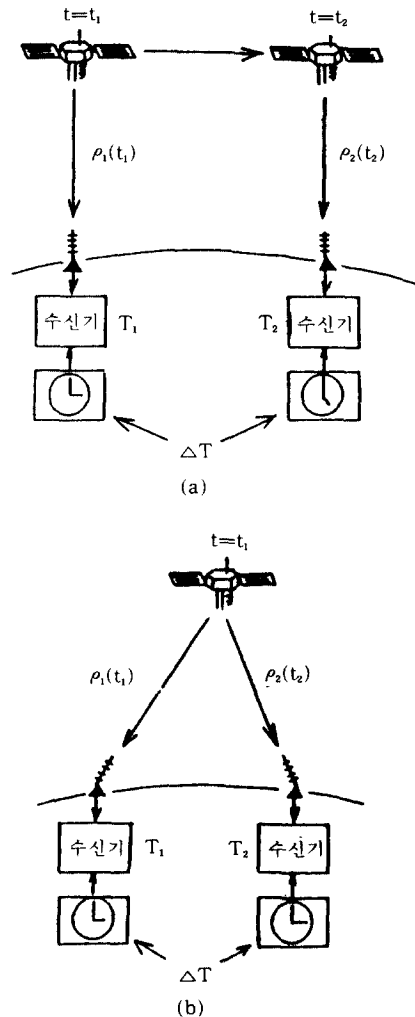


그림 1. GPS를 이용한 시각비교 방법
The methods of time comparison using GPS.

적인 방법으로 GPS 위성이 상공을 통과할 때 그 신호를 수신하여 지상국 시계와 GPS time 을 비교하는 방식이다.

서로 떨어진 두 시계와 GPS 신호의 시간간격 T_1, T_2 는 다음 식으로 표시된다.

$$T_1 = T_{1s}(t_1) + \rho_1(t_1) / c \quad (1)$$

$$T_2 = T_{2s}(t_2) + \rho_2(t_2) / c \quad (2)$$

여기서

$T_{1s}(t_1)$: $t=t_1$ 때의 지상국 i 시계와 탑재시계의 시각차

$\rho_1(t_1)$: $t=t_1$ 때의 지상국 i와 위성간의 전파거리 (전리층, 대기권 등에 의한 전파지연시간의 증가분 포함)

c : 광속($\sim 3 \times 10^8$ m/s)이다.

GPS 위성의 궤도 데이터 및 지상국의 위치로부터 계산한 $\rho_1(t_1)$ 의 추정치를 $\hat{\rho}_1(t_1)$ 라 하면 식(1), (2)로부터 두 시계의 시각차 ΔT 는

$$\Delta T = T_1 - T_2 - \hat{\rho}_1 / c + \hat{\rho}_2 / c \quad (3)$$

$$= T_{1s}(t_1) - T_{2s}(t_2) + 1/c \{ \rho_1(t_1) - \hat{\rho}_1(t_1) \} - 1/c \{ \rho_2(t_2) - \hat{\rho}_2(t_2) \} \quad (4)$$

이 된다. 이와 같이 본 방식은 시각비교를 하는 시각이 서로 다르므로 ($t_1 \neq t_2$) 탑재시계의 안정도 및 궤도 데이터의 정밀도가 오차요인이 된다. 그러나 전세계적으로 약 50 ns 정도의 정확도로 시각비교를 할 수 있는 방법이다. 한편 그림 1-b는 동시수신법으로 시각비교를 하는 양국에서 동시에 GPS 위성신호를 수신하는 방법이다. 이 방법은 GPS 위성신호를 동시에 수신하므로 탑재시계와 궤도 데이터에 의한 오차요인이 상쇄되어 약 10 ns의 정확도로 시각비교를 할 수 있다. 그러나 시각비교를 하려는 양국에서 공통으로 위성의 관측이 가능해야 하므로 거리가 3,000~5,000 km로 제한된다.

III. 보정항

위성을 출발한 신호가 수신기에 들어오는 데까지 걸리는 전파지연시간의 측정은 시각비교의 정확도에 크게 영향을 미친다. 따라서 이때 발생하는 오차에 대한 보정이 필요하다. 이들 오차 요인에는 전리층, 대류권 등의 전파지연시간, 상대론효과, 수신기내 전파지연시간 및 다중경로에 의한 영향 등이 있다.

전리층의 전파지연시간은 최소 수 ns에서 최대 60~70 ns가 된다. 이를 보정하는 방법으로는 전파 경로상의 전자수를 측정하여 보정하는 방법, 위성으로부터 송신되는 전리층 parameter에 의한 보정법, 2개의 주파수의 신호를 수신하여 보정하는 방법 등이 있다. 전리층 parameter에 의한 보정방법은 GPS 신호로부터 전리층 parameter를 수신하여 그림 2와 같이 전파지연시간을 모델화하여 전파지연 시간을 구한다⁴⁾. 그러나 모델화된 전리층 전파지연시간의 오차는 크게는 보정량의 1/2까지 발생할 수 있다. 따라서 좀더 정확한 측정을 위해서는 2개의 주파수의 신호를 수신하여 보정하는 방법이 바람직하다. 이는 전리층에 의한 전파지연 시간이 주파수의 제곱에 역비례 한다는 것을 이용하는 것으로 전리층내 전파지연시간은 다음 식으로 표시된다.

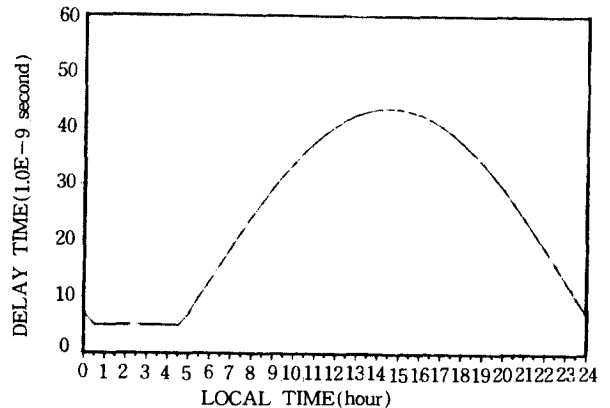


그림2. 전리층 전파지연 보정모델
The ionspheric compensation model.

$$\Delta T_{\text{ion}} = 40.5 N_t / (f^2 \cdot c) \text{ ns} \quad (5)$$

여기서 N_t : 전파 경로상의 총전자수(개 / m^2)
 f : 신호 주파수 (Hz)이다.
 c : 광속($\sim 3 \times 10^8 \text{ m/s}$)
 $\sim 3 \times 10^8$

따라서 f_1 과 f_2 의 2개의 주파수의 신호를 수신하면 정확히 전리층내 전파지연시간을 측정할 수 있다.

시간은 중력, 속도, 좌표계 어느 것에 의해서도 영향을 받는다. 따라서 초를 정의하는 경우와 시각을 서로 비교할 때에는 각각을 특정한 기준계에 맞도록 변환하는 것이 필요하다. 현재 초(s)는 지심좌표계의 지오이드(평균해수면)상에서 정의된 좌표시로 되어있다. 따라서 시각비교를 행하는 경우도 측정된 양을 위의 좌표시로 변환하는 것이 필요하다. 지심좌표계(r, θ, ϕ)의 위치를 속도 v 로 이동하는 시계의 고유시 $d\tau$ 와 좌표시 dt 는 다음식으로 표시된다.⁶⁾

$$d\tau = (1 + \Delta U_T / c^2 - v^2 / 2c^2) dt - \omega r^2 \cos^2 \theta d\phi / c^2 \quad (6)$$

여기서 c 는 광속($\sim 3 \times 10^8 \text{ m/s}$)이다. 괄호안의 제 2항은 red shift라 부르며 ΔU_T 는 지표면으로부터의 potential차이다. 제 3항은 특수상대론 효과이고 제 4항은 지구회전에 의한 효과로 Sagnac 효과라고 불린다. 이들중 GPS 측정에서 가장 큰 영향을 받는 것은 제 4항의 Sagnac 효과로 최대 약 80 ns가 된다. 그러나 이는 위성 및 수신점의 적도면상에서의 투영점과 지심이 그리는 면적 및 지구회전 각속도로부터 쉽게 계산된다. 제 3항은 그크기가 극히 적어 보정이 필요치 않으며, 제 2항의 red shift는 위성 탑재시계의 주파수에 미리 offset으로 주어져 있으므로 보정이 필요치 않다. 다중경로(multipath)는 수신안테나 주위의 건물이나 나무 등의 전파 방해물에 의한 영향으로 발생할 수 있는 것으로 안테나를 설치할 때 이런 점들을 고려하면 줄일 수 있다. 또한 안테나를 microwave absorber 위에 설치하는 경우도 있으나, 여기서는 이 문제까지는 고려

하지 않았다.

본 수신기의 경우 전리층의 영향은 GPS 송신 정보의 전리층 모델을 이용하여 보정하고 있다. 또한 지구회전에 의한 상대론 효과의 영향은 위성과 수신점의 위치로부터 계산되어 보정된다. 수신점의 위치는 국립지리원에 의뢰하여 NNSS 측지장치로 측정된 WGS-72(World Geodetic System) 좌표를 GPS에서 사용하는 WGS-84 좌표로 변환하여 사용하였다. 다음은 WGS-84 계로 계산된 수신점의 좌표이다.

동경 : 127° 22' 14.38"
 북위 : 36° 23' 14.60"
 높이 : 119.4 m

IV. 시각비교결과

그림 3은 시각비교에 사용한 GPS 수신기로 위성으로부터 시각정보 및 궤도정보 등을 수신

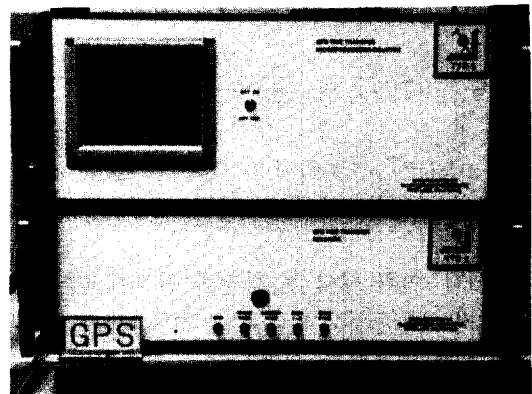


그림3. GPS 수신기
 The GPS receiver.

하고 지상국의 시계와 GPS time과의 시각차를 구하도록 되어있다. 그림 4는 13분 동안의 당 연구실의 원자시계와 GPS 위성시계 사이의 시각비교 데이터로 매 초마다 측정된 데이터를 15초 마다 평균하여 연결한 것이다. RMS 값은 6 ns 이다. 그림 5는 '88년 8월 15일부터 10일간 미국립표준국(NBS)에서 계산된 시각비교 스케

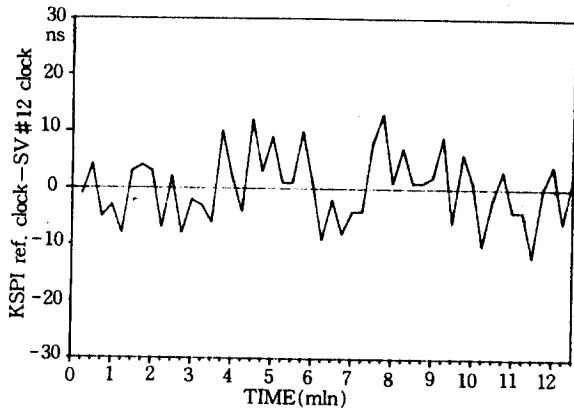


그림4. GPS 시각비교 데이터의 변동
The time deviations of GPS timing data

줄에 따라 실시된 본 연구실의 세슘 원자시계와 GPS time 과의 시각비교 데이터이다. 위성에 따라 최대 70~80ns 정도의 변동이 있다. 이것은 위성시계의 GPS time에 대한 보정오차와 위성 궤도 오차 등에 기인한다. 그림 6,7은 미해군관측소(USNO), 일본통신연구소(CRL)와 본 연구소 간의 GPS 위성 동시수신법에 의한 시각비교 데이터이다. 현재 본 연구소와 미해군관측소 간에 9번 위성과 12번 위성을 이용하여 동시수신법으로 시각비교를 실시하고 있으며 일본통신연구소와는 6번, 9번, 12번 위성을 이용하여 같은 방법으로 시각비교를 하고 있다. 그림 8은 '88

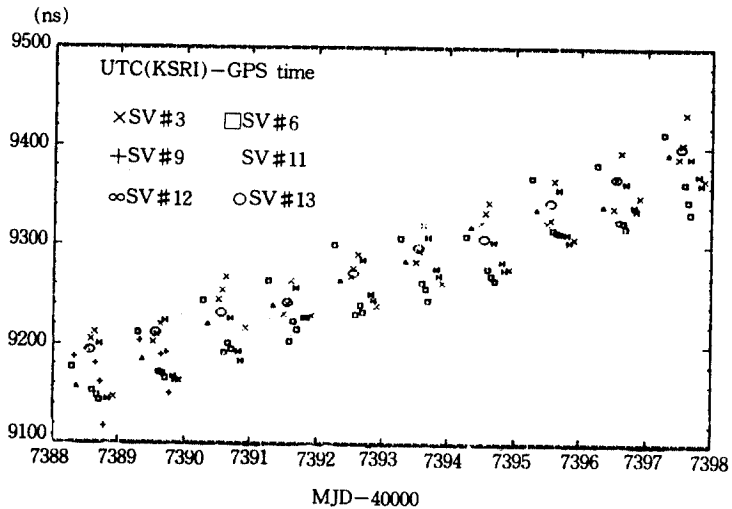


그림5. GPS 시각비교 데이터
The GPS timing data.

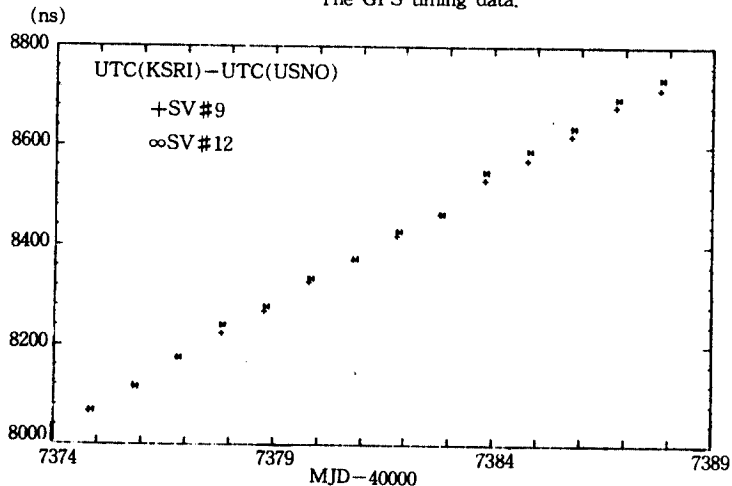


그림6. KSRI와 USNO 간의 시각비교 결과
The results of time comparison between KSRI and USNO.

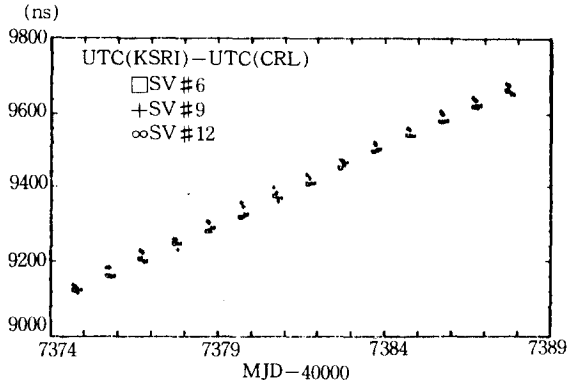


그림7. KSRI와 CRL 간의 시각비교 결과
The results of time comparison between KSRI and CRL.

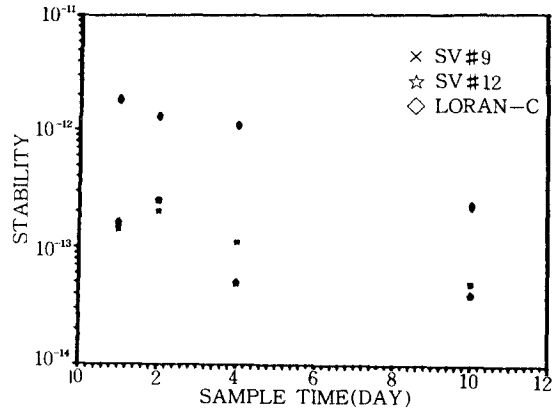


그림9. KSRI와 USNO 간의 상대 주파수 안정도
The relative frequency stability between KSRI and USNO.

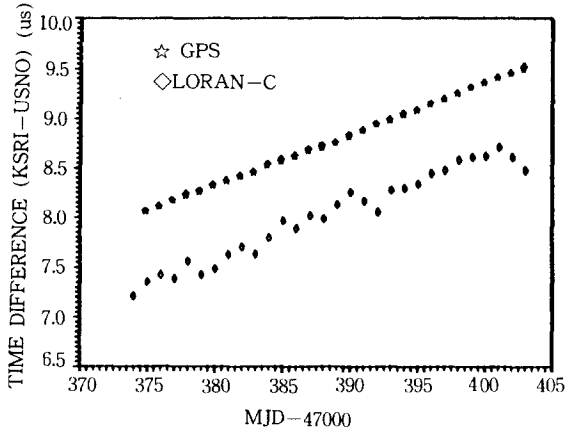


그림8 GPS와 LORAN-C를 이용한 시각비교 결과
The results of time comparison using GPS and LORAN-C.

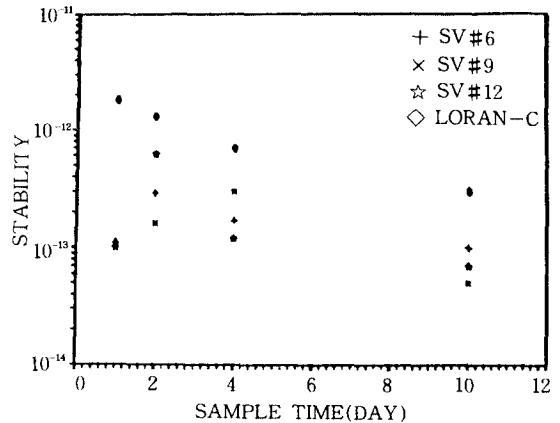


그림10. KSRI와 CRL 간의 상대 주파수 안정도
The relative frequency stability between KSRI and CRL.

년 8월의 GPS 및 LORAN-C 신호에 의한 미해군 관측소와의 시각비교 결과이다. GPS에 의한 시각비교방법이 LORAN-C 방법보다 약 10배 정도 더 좋은 정밀도를 갖고 있다. 여기서 두 방법에 따른 시각차가 0.7 μ s가 생기는데 이는 지표파를 수신하는 LORAN-C에 의한 전파지연시간 보정오차이다. 그림 9, 10은 GPS와 LORAN-C를 이용하여 '88년 8월부터 3달 동안의 USNO 및 CRL과의 시각비교에 대한 상대주파수 안정도로 평균화 시간(τ)이 1 일일 때 GPS를 이용한 경우 10^{-13} 정도로 LORAN-C에 의한 안정도 10^{-12} 보다 10배 정도 좋다.

V. 결 론

GPS 위성을 이용한 동시수신법으로 일본통신연구소, 미해군관측소와 시각비교를 하였다. GPS에 의한 시각비교는 정밀도가 10^{ns} 정도이고 LORAN-C에 의한 방법보다 안정도 면에서도 약 10배 높게 나타났다. 본 연구실에서는 '88년 7월 부터 GPS 데이터를 국제도량형국(BIPM)에 보내어 국제시각비교에 참여하고 있으며 이를 통해서 국제원자시(TAI) 형성에 기여하고 있다.

參考文獻

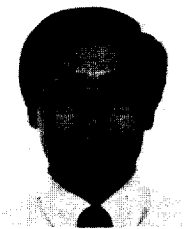
1. R.J. Milliken and C.J. Zoller, "Principle of operation of NAVSTAR and system characteristic", Journal of navigation, vol. 25, no. 2, 1978.
2. M.R. Stiglitz, "The Global positioning system", Microwave journal, vol. 29, no. 4, April 1986.
3. D.W. Allan and M.A. Weiss, "Accurate time and frequency transfer during common-view of a GPS satellite", proceeding 34th annual frequency control symposium, 1980.
4. J.A. Klobuchar, "Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users", IEEE transactions on aerospace and electronic systems, vol. AES-23, no.3, May 1987.
5. 左分利義和, "주파수·시간 계측에서의 상대론효과", 일본전파연구소 계보, vol. 29, no. 149, Feb. 1983.



李昌福 (Chang Bok LEE) 正會員
1956年12月9日生
1980年2月:西江大學校電子工學科學士
1982年2月:西江大學校大學院電子工學科碩士
1982年4月:韓國標準研究所 勤務
現在:時間·周波數研究室先任研究員
主關分界:人工衛星을 이용한 高精度時刻比較 및 位置測定



全實德 (In Deok JEON) 正會員
1959年10月5日生
1983年2月:延世大學校物理學 學士
1985年2月:서울大學院 物理學 碩士
1985年11月~1989年9月:韓國標準研究所 研究員



鄭樂三 (Nak Sam CHUNG) 正會員
1939年4月22日生
1967年:서울大學校 文理科大學 物理學科 卒業(理學士)
1973年:美國Purdue University 大學院 物理學科 卒業(理學博士)
1973年~1976年:Purdue University 研究員
1976年~現在:韓國標準研究所責任研究員(電氣研究部長)

1976年~1978年:美國立標準局(NBS) 客員研究員
1986年~1987年:美國STX, Senior Scientist
關分界:時間·周波數 및 電子波測定 / 標準