

루비듐 원자시계의 경과시간에 따른 시간오차 예측

Time-Error Prediction of Rubidium Atomic Clock according to the Elapsed Time

김영범* · 정낙삼* · 박동철**

Young-Bum Kim* · Nak-Sam Chung* · Dong-Chul Park**

요 약

본 논문에서는 상용의 루비듐 원자시계를 이동용 기준시계로 사용시 시간오차를 최소화할 수 있는 방법을 제시하였다. 일반적으로 사용되고 있던 직선적인 보간법이 장기안정도를 고려하지 않았으나 새로운 방법에서는 시간오차를 줄이고자 장기안정도를 고려하였다. 두 가지 방식에 대한 비교측정결과, 관측시간이 1.5일 이내일 때는 장기안정도를 고려한 시간오차예측이 기존의 직선적인 방식에 비해 작은 시간오차가 작았다. 또한 루비듐 원자시계의 이동용 기준기계의 역할이 12시간 이내에 완료될 경우 새로운 방법은 최대시간오차가 기존방법의 15 ns보다 작은 10 ns 정도의 오차범위 내에서 사용 가능하다.

Abstract

In this paper, we propose a method that can minimize time-error when a commercial rubidium atomic clock is used as a portable reference clock. A linear interpolation method which was widely used is not based upon long-term stability, but our new method is considered to reduce time error. The comparison results between two method have shown that time error of our new approach considering with long-term stability is better than that of linear interpolation method within observation duration about one and half days. In addition, when the role of a rubidium atomic clock as a portable reference clock is completed within 12 hours, our new method can provide at most maximum time-error of 10 ns which is shorter than 15 ns in conventional method.

I. 서 론

최근 측지, 초고속정보통신, 전력공급, 그리고 디지털 이동통신 등의 산업 전반에 걸쳐 정밀 정확한 발전기의 필요성이 대두되고 있다. 이러한 정밀발전기는 수정의 편을 이용하여 단순하게 만든 일반적인 수정발전기로부터 TCXO, OVCXO(Ovenized Voltage Controlled X-tal Oscillator) 그리고 루비듐, 수소, 세슘 등의 원자를 이용한 원자주파수 표준기에 이르기까지 다양한 형태로 만들어져 사용되고

있다^[1]. 이들 주파수원은 그 구조적인 이유 때문에 항상 똑같은 품질을 유지할 수 없으며 그것의 정도는 발전기의 등급에 따라 차이가 있다. 따라서 초기에 아무리 정확하게 값을 맞추어 놓았다 하더라도 시간이 경과함에 따라 주파수가 끊임없이 변해가게 되는데 이를 가리켜 경년변화(Aging) 한다고 말하고 있다^[2]. 이러한 경년변화율(Aging Rate)을 포함한 발전기들의 각기 다른 특성은 시간이 흐름에 따라 이들 발전기 서로간의 피할 수 없는 불일치를 유발시킨다. 따라서 이들 발전기를 이용한 기기간의 타

*한국표준과학연구원 광기술표준부(Div. of Optical Metrology, Korea Research Institute of Standards and Sciences)

**충남대학교 공과대학 전파공학과(Dept. of Radio Science and Engineering, Chungnam National University)

· 논문 번호 : 20001221-151

· 수정완료일자 : 2001년 2월 23일

이상이 일치하지 않음에 따라 서로간의 측정오차를 가져오게 되고 통신의 경우 정보의 정확한 전달을 방해하는 슬립(slip) 등의 형태로 나타나게 된다^[3]. 이러한 불일치를 해소하기 위하여 여러 기기에서 사용되고 있는 발진기들의 경우 주기적으로 교정(calibration)을 받고 있으며 통신망에서는 상위국의 기준신호에 하위국 발진기의 위상을 일치시키기 위한 망동기(Network Synchronization) 체계를 갖추고 있다. 이와 같은 경우 발진기들이 같은 장소에 근접해 있다면 비교적 쉽게 해결할 수 있으나 서로 멀리 떨어져 있을 경우의 실시간적인 측정 및 교정이 용이하지 않다. 특히 발진기로부터 얻어지는 시각을 멀리 떨어진 기준시각에 일치시키거나 시간오차를 측정하기란 더욱 어렵다. 이를 정확히 수행하기 위하여 고가의 시각비교용 GPS 수신기를 특별한 기법으로 이용하거나 고가의 발진기로 만들어진 시계를 동작시킨 상태로 측정하고자 하는 발진기가 있는 장소로 이동시켜 사용해야 하는 등의 방법이 실제로 이용되고 있다. 최근에 활발히 연구되어 이용되는 전자에 비해 비교적 단순한 후자는 전파매체를 사용하지 않으므로 단기적인 불확도 요인이 적어 전자를 보완하기 위하여 사용되고 있다. 그러나 이동용 기준기를 이동시켜야 되므로 사용하기까지의 경과시간에 따라 시각 또는 주파수의 초기의 값과 달라져 있게 된다. 따라서 이러한 상태의 루비듐원자시계를 다른 시각소스나 발진기의 교정 또는 측정에 활용한다면 또다른 오차를 유발시키게 되는 것이다.

본 논문에서는 원격지의 세습원자 주파수 표준기와 같은 고품질의 발진기를 측정 평가하고 상호 비교하는데 세습원자 주파수 표준기보다 장기적인 안정도가 다소 떨어지지만 비교적 저가의 장비로 쉽게 해결하고자 사용되던 후자의 방법에 있어서의 문제점을 개선하기 위한 새로운 방법을 제시하였다. 기존의 방법에서는 짧은 이동구간에서의 이동용 기준기로 일반적으로 사용되는 루비듐 원자시계를 이동전에 세습 원자시계와 같은 표준기와 측정하고 이동용 기준기의 역할을 마치고 돌아와서 재측정함과 동시에 직선적 보간법에 의해 사용시점의 시간오차를 알아내었다^[4]. 이 경우 이동용 기준기의 경년변화가 무시되기 때문에 보간법에 의한 계산값이

사용시점에서의 이동용 기준기의 정확한 시간오차라고 볼 수는 없다. 따라서 본 논문에서는 이러한 단점을 개선하고자 이동용 기준기로 사용할 루비듐 원자시계의 경과시간에 따라 변해가는 누적시간 오차를 관측시간별로 분석을 하고 각 경우에 따른 장기안정도를 구하였으며 이를 시간오차를 결정짓는 특별한 함수에 적용함으로써 실제 사용시점에서의 루비듐 원자시계 자체가 가질 수 있는 시간오차를 비교적 정확하게 예측함으로써 측정대상 발진기의 보다 정확한 시간동기 및 주파수품질 측정이 이루어지도록 하였다.

II. 발진기의 시간오차

어떤 발진기에 의해 만들어진 시계는 서론에서 언급한 바와 같이 발진기들의 일반적인 특성 때문에 초기의 시각차를 언제까지나 그대로 유지할 수 없으며 시간의 경과에 따른 누적시간오차, $x(t)$ 는 식 (1)과 같이 표현될 수 있다^[5].

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

여기서 x_0 는 초기시간차, y_0 는 당시의 주파수차를 명목상의 주파수값으로 나눈 상대주파수로 일반적으로 주파수의 정확도(Accuracy)를 나타내며 K 는 상대주파수의 경과시간에 따른 변화율을 나타내는 경년변화율로서 발진기의 장기안정도를 의미한다. 이들 세 가지 항목이 환경적인 원인으로 유발되는 구조적인 오차로써 개선될 수 있는 반면 $\epsilon(t)$ 는 어떻게 해볼 수 없는 불규칙편차에 해당한다. 이러한 수식은 발진기의 신호가 주파수 변조되어 있거나 경년변화율(K)이 상수가 아닌 다시 말해 직선적이지 못한 경우를 제외하고 일반적으로 발진기의 시간오차를 예측하기 위하여 사용될 수 있다. 식 (1)에 대하여 각 경우에 따른 수치적인 특성을 그림 1에 나타내고 있는데 같은 신호가 아닌 이상 A와 같이 누적시간오차가 변하지 않고 초기오차의 값을 그대로 유지할 수는 없으며 어떤 형태로이든 누적시간오차가 변하게 된다. 만일 발진기가 시간의 경과에 따라 정확도가 변하지 않고 초기의 정확도, y_0 를 그대로 유지한다면 경년변화가 없음을 의미하므로 시

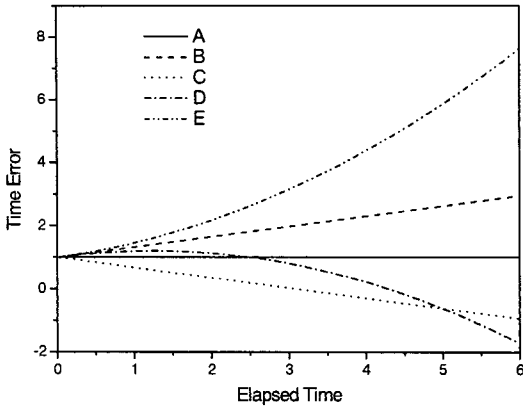


그림 1. 시간의 경과에 따라 누적된 시간오차(A는 초기시각차만 존재, B와 C는 정확도에 따른 누적시간오차, D와 E는 장기안정도가 고려될 경우의 누적시간오차)

Fig. 1. Intergrated time-error according to elapsed time(A denote the case of being only initial offset, B and C are intergrated time error by accuracy, D and E are the case to be also included aging rate).

간오차는 B, C와 같이 직선적으로 변화된다. 그러나 이러한 발진기 역시 구현이 불가능하며, 그 값의 차이가 있지만 경년변화를 하게 된다. 이 경년변화율을 나타내는 장기안정도가 고려됨에 따라서 시간오차특성은 D, E와 같은 비선형적인 형태를 보이게 된다. 따라서 모든 발진기들이 정도의 차이는 있으나 기본적으로 비선형의 특성을 지닐 수 밖에 없다. 그러나 지금까지는 발진기의 시간오차를 예측함에 있어서 경년변화가 없을 경우(그림 1-B, 1-C)에 적합한 직선적 보간법이 손쉽게 발진기의 사용시점에서의 시간오차를 예측할 수 있는 잇점을 가지고 있기 때문에 경년변화를 무시한 직선적 보간법을 일반적으로 사용하여 왔다.

Ⅲ. 이동원자시계의 사용시점에 대한 시간오차 예측

발진기들의 시간이 경과함에 따라 누적되는 시간오차는 일반적으로 장기적으로는 비선형적인 이차함수의 형태를 보이면서 단기적으로는 주기가 일정

치 않은 주기함수의 형태를 보이고 있다. 이러한 발진기의 특성을 고려하여 사용시점에서의 실제누적 시간오차와 예측값과의 차이를 최소한으로 줄일 수 있도록 예측하는 것이 이동용 기준기로 활용되기 위한 전단계 작업이다. 이동원자시계로 흔히 사용되고 있는 루비듐 원자시계가 작은 양의 경년변화율을 지니고 있어서 우리가 이동원자시계로 사용하는 기간중에는 거의 영향을 미치지 못하고 초기의 주파수 정확도가 유지될 것이라는 가정하에 널리 이용되고 있는 방식이 식 (2)와 같은 직선적 보간법을 활용한 시간오차예측법이다.

$$x_u = (x_1 - x_0)E_u/E_t \tag{2}$$

여기서 x_u 는 사용시점에서의 누적시간오차, x_0 는 이동원자시계로 이용하기 위해 출발전의 초기시간차, x_1 은 돌아온 후의 이동원자시계의 시간차, E_t 는 이동원자시계가 출발후 되돌아오는데 소요된 시간, 그리고 E_u 는 출발후 사용시점까지의 경과시간을 의미한다. 그러나 루비듐 원자시계의 경우 경년변화율이 비록 작기는 하지만 분명히 존재하기 때문에 경년변화를 무시한 직선적인 보간법에 의한 루비듐 이동원자시계의 시간오차 예측이 부정확할 수 있다는 전제하에 새로운 방식의 시간오차 예측법을 생각해 되었다. 앞서 언급된 식 (1)을 활용하여 사용기간중의 경년변화율 (K)을 역산하면 식 (3)과 같다.

$$K = 2[x(t) - x_0 - y_0 t] / t^2 \tag{3}$$

여기서 x_0 는 이동원자시계의 출발전에 기준시간과 측정된 초기시간차, $x(t)$ 는 돌아온 후에 기준시간과의 시간차로써 이들 모두 식 (1)의 $\epsilon(t)$ 가 포함된 값에 해당된다. 또한 y_0 는 출발전에 측정된 이동원자시계의 주파수 정확도이며 t 는 이동원자시계가 돌아올 때까지 총 소요된 시간을 의미한다. 이렇게 얻어진 경년변화율이 이동원자시계로 사용된 기간 동안의 장기안정도를 대표하는 값이라 할 수 있다. 따라서 이 장기안정도와 이미 알고 있는 초기의 시간차 및 주파수 정확도를 식 (1)에 대입하면 루비듐 이동원자시계가 실제 사용된 시점에 해당하는 누적 시간오차의 예측치를 구할 수 있다.

IV. 새로운 시간오차 예측 시뮬레이션 및 분석

이동용 원자시계의 시간오차를 예측함에 있어서 종전의 직선적 보간법이 지니고 있는 문제점을 찾고, 이를 개선하기 위한 새로운 시도를 위하여 먼저 이동용 기준기로 사용하고자 하는 루비듐 원자시계가 주어진 환경하에서 어떠한 특성을 보여주고 있는지를 알아보아야 한다. 이를 위해 그림 2와 같은 장치를 사용하여 시간에 따라 루비듐 원자시계의 변화되어가는 누적시간 오차를 측정하였다. 시간차 측정을 위하여 그림에서 보는 바와 같이 Ref. 신호

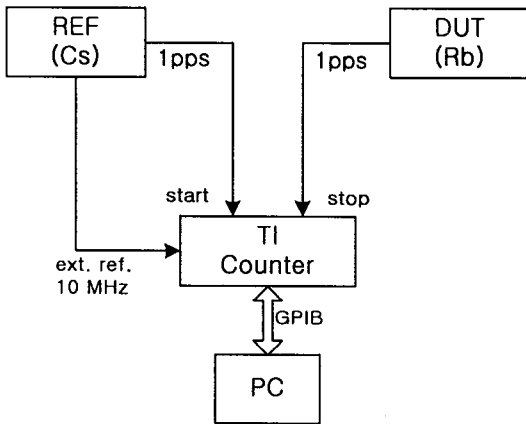


그림 2. 측정장치의 구성도
Fig. 2. Schematic diagram of measurement system.

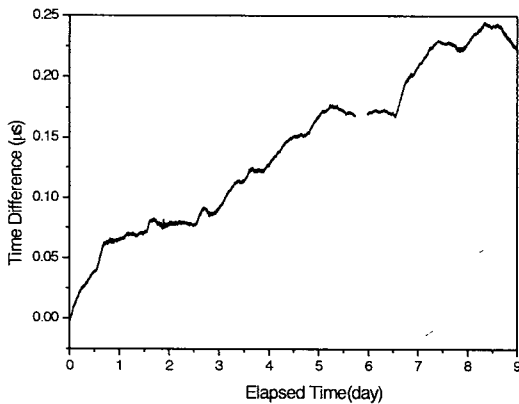


그림 3. 루비듐원자시계의 시간오차 변화
Fig. 3. Time variance of Rb atomic clock.

로 사용되는 세슘 원자시계와 측정하고자 하는 루비듐 원자시계의 초펄스(1 pps)를 각각 시간간격계수기의 start와 stop 측에 입력시켜 측정하였다. 또한 측정의 정확도를 높이기 위해 시간간격계수기의 외부기준신호(10 MHz)를 세슘 원자시계로부터 공급받도록 구성하였다. 본 실험에서는 신뢰도를 높이기 위해 비교적 긴 시간인 9일간 측정을 하였으며 이를 위해 컴퓨터 프로그램의 제어를 통해 자동측정이 가능하도록 구성하였다. 측정결과 그림 3에서 보는 바와 같이 루비듐 원자시계의 누적시간 오차가 장기적으로는 직선적으로 변화하는 것으로 보이나 단기적으로는 최대 시간 오차가 약 50 ns 정도에 변동폭을 가지고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 관측시간을 어떻게 설정하느냐에 따라 시간 오차의 예측된 누적시간 오차가 실제값과 이 정도 이상의 차이를 보일 수 있음을 의미한다. 그래프상의 6일 부근이 끊어진 것은 측정중에 발생한 이상으로 측정데이터가 유실되었다. 또한 보다 실제와 가까운 시간 오차예측을 위해 루비듐 원자시계의 시간오차 변동에 대한 경향을 파악할 필요가 있다. 이를 위해 측정값에 대한 근사한 curve fitting을 하여 보았다. 그 결과 그림 4에서 보는 바와 같이 시간오차가 주기성을 갖고 변화되고 있음을 알 수 있다. 다시 말하면 9일 동안 약 2.5주기의 경향을 지니고 변동됨을 알 수 있다. 이 경우 정확한 주기함수를 얻는 것이 중요한 것이 아니고 여러 가지 요인에 의해 주기적으로 시간오차가 변동될 수 있으며, 식 (1)이 적용되기

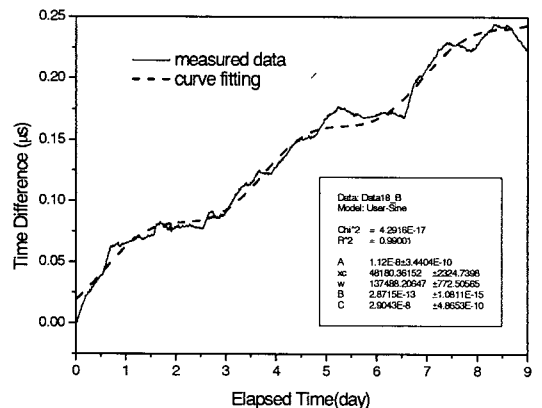


그림 4. 측정값에 대한 curve fitting
Fig. 4. Curve fitting of measured data.

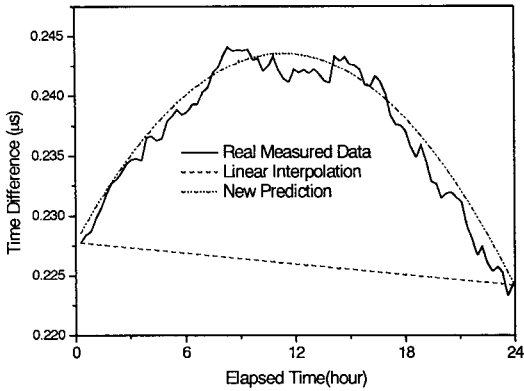


그림 5. 1일에 대해 직선적 보간법의 가장 나쁜 경우

Fig. 5. The worst case of linear interpolation method for 1 day.

위해 경년 변화가 직선적이어야 하는 전제조건에 위배된다는 사실이다. 따라서 누적시간 오차의 주기적인 변동폭 때문에 제한받을 수 있는 예측오차를 극복하기 위해 식 (1)을 적용하려면 경년변화의 방향이 바뀌지 않을 것으로 추정되는 fitting curve의 반주기가 중요한 의미를 갖고 있다. 따라서 반주기에 해당되는 1.8일의 관측시간 이내에서는 우리의 새로운 시간오차 예측법이 직선적인 보간법보다 이동원자시계의 사용시점에서의 시간오차 예측에 있어서 더욱 나은 특성을 보여줄 것으로 기대하는 요인이다. 실제값과 기존의 직선적 보간법에 의한 시간 오차 예측값의 차이, 그리고 우리가 새로이 제시하고 있는 장기안정도를 고려한 방법에 의한 시간 오차 예측값과 실제값의 차이를 비교해 보기 위해서 이동원자시계의 역할수행 기간을 각각 0.5일, 1일, 2일, 3일, 그리고 4일로 선택하고 이들에 대하여 계산하였다. 주어진 데이터의 효율성을 높이기 위해 각각의 관측시간별로 데이터를 부분적으로 겹치도록 나누어 0.5일에 대해서는 18개의 데이터 군을, 1일에 대해서는 9개, 2일에 대해서 8개, 3일은 7개, 그리고 4일에 대해서는 6개의 데이터 군을 만들었다. 그림 5는 1일에 대한 데이터군 중에서 직선적 보간법이 우리가 새로이 제시하고 있는 방식에 비해 현저히 나쁜 경우를 선택하여 보여주고 있다. 이 그림을 통해 직선적 보간법은 처음과 끝을 기준으로

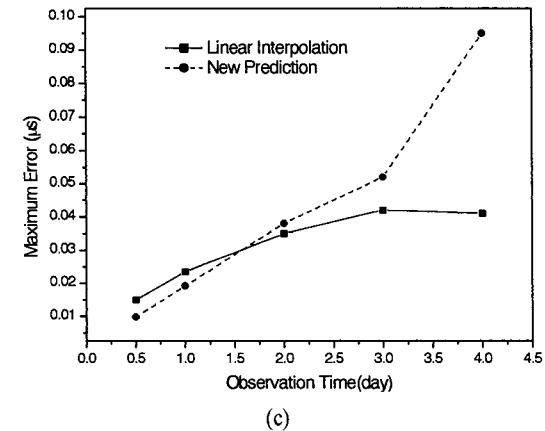
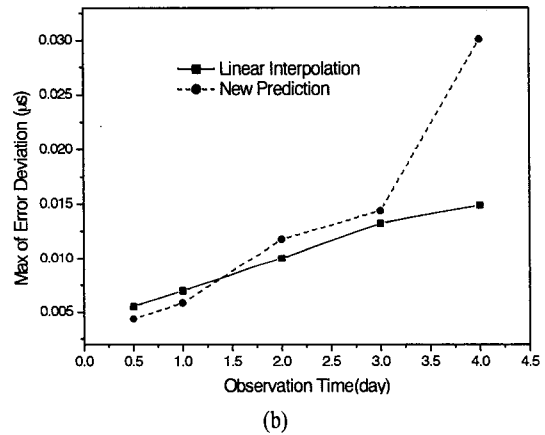
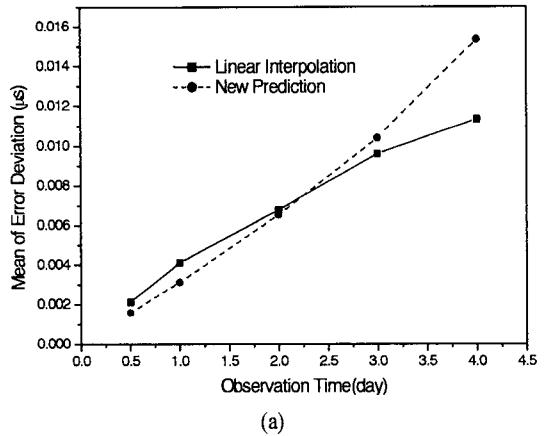


그림 6. 두 가지 방식에 대한 비교. (a) 오차분산의 최대치, (b) 오차분산의 평균치, (c) 최대오차.

Fig. 6. Comparison results between two method. (a) maximum of error deviation, (b) mean of error deviation, (c) maximum error.

로 중간의 임의의 시점에 대한 시간오차를 예측하기 때문에 우리가 주장하는 방식에 비해 경우에 따라 문제가 있을 수 있음을 알 수 있다. 각각에 대해 앞절에서 언급한 사용시점에 대한 시간오차예측 수식 (2)를 이용해 직선적 보간법에 의한 시간오차 예측을 0.5일, 1일, 2일, 3일, 4일의 관측시간에 대해 각각 18개, 9개, 8개, 7개, 6개씩 계산하고 각 관측시간별로 분산을 구해 보았다. 또한 우리가 새로이 제시하고 있는 방식에 대해서도 식 (3)을 통해 각 관측시간의 데이터군 별로 경년변화율을 구하고 이 값을 이미 알고 있는 초기시간차, 그리고 주파수 정확도와 함께 식 (1)에 대입하여 관측시간 0.5일, 1일, 2일, 3일, 4일별로 각각 18개, 9개, 8개, 7개, 그리고 6개를 구해 직선적 보간법과 마찬가지로 관측시간별로 분산을 구했다. 각 관측시간별 데이터군에 대한 실제값과 각각의 예측법을 통한 예측시간과의 차이의 분산을 구한다. 각 데이터군에 대한 분산값 중에서 최대치를 그림 6(a), 그리고 각 데이터군에 대한 분산값들의 평균치를 그림 6(b)에 나타내었다. 또한 각 관측시간별 데이터군들 중에서 실제값과의 차이가 가장 큰 값을 비교하여 그림 6(c)에 나타냈다. 이 결과를 통해 볼 때 앞서 언급한 curve fitting의 반주기와 비슷한 1.5일 보다 작은 관측시간에 대해서는 새로운 방식의 시간오차 예측법이 기존의 직선적 보간법에 의한 예측보다 좀더 정확하며 사용시점에서의 루비듐 원자시계 오차를 최대 10 ns 정도의 수준으로 예측할 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 이동측정을 위해 일반적으로 소요되는 기간인 12 시간 이내에서는 새로운 방식을 적용함이 보다 정확한 측정에 도움을 줄 것으로 판단된다. 그러나 관측시간이 반주기보다 길어질 경우 경년변화의 방향이 반대로 바뀌어질 수 있기 때문에 기존의 직선적 보간법이 오히려 좋은 특성을 보여주고 있다.

V. 결 론

원격지의 정밀한 시간/주파수원에 대한 측정 및 교정시 기준시간으로 상용의 루비듐 원자시계를 사

용할 경우 요구되는 이동원자시계의 사용시점에서의 누적시간 오차를 정확히 예측하기 위한 새로운 방법을 제시하였다. 기존에 일반적으로 사용되고 있던 직선적 보간법에 비해 경년변화를 고려하였기 때문에 실제에 보다 근접한 시간오차 예측법이라고 판단된다. 그러나 여러 가지 환경적인 요인으로 인해 루비듐 원자시계가 주기적인 시간오차 변동폭을 가질 수 있으므로 이러한 영향을 덜 받을 수 있는 단기적으로 사용될 경우 직선적 보간법보다 우수한 것으로 나타났다. 이동원자시계로의 역할을 현재 주로 이용하고 있는 바와 같이 12시간 이내에 마칠 경우 본 논문에서 제안하는 새로운 방식에 의해 10 ns 정도의 오차범위로 상용의 루비듐원자시계를 이용할 수 있어 관련 분야의 활용이 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Lindon L. Lewis, "An Introduction to Frequency Standards," *Proc. of IEEE*, vol. 79, no. 7, pp. 927-935, July, 1991.
- [2] M. E. Frerking, *Crystal Oscillator Design and Temperature Compensation*, New York: VNR, pp. 20-39, 1978.
- [3] R. Smith and L. J. Millott, "Synchronization and Slip Performance in Digital Network," *British Telecommunication Engineering*, vol. 3, pp. 99-106, July, 1984.
- [4] LaThare N. Bodily and Ronald C. Hyatt, "'Flying Clock' Comparisons Extended to East Europe, Africa and Australia using Portable Atomic Clocks," *HP Journal*, vol. 19, no 4, pp. 12-20, December, 1967.
- [5] Davad W. Allan, "Time and Frequency(Time-Domain) Characterization, Estimation, and Prediction of Precision Clocks and Oscillator," *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. UFFC-34, no 6, pp. 647-654, November, 1987.

김 영 범



1982년 2월: 충남대학교 전자공학과(공학사)
1989년 2월: 충남대학교 전자공학과(공학석사)
1997년 2월: 충남대학교 전자공학과 박사수료
1986년: 독일연방물리기술청(PTB)

시간주파수연구실 방문연구원(1년)
1982년~현재: 한국표준과학연구원 광기술표준부 책임연구원
[주 관심분야] 통신망 동기시스템 설계 및 평가, 원격지의 시각동기

박 동 철

1974년 2월: 서울대학교 공과대학 전자공학과(공학사)
1976년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과(공학석사)
1984년 12월: University of California, Santa Barbara(공학박사)
1976년~현재: 충남대학교 공과대학 전파공학과 교수
1977년~1978년: Ruhr University, Bochum, Germany, 방문교수
1994년~1998년: IEEE MTT Korea Chapter Chairperson
1998년~현재: IEEE EMC Korea Chapter Chairperson
2000년~현재: 한국전자과학회 회장
[주 관심분야] Microwave and millimeter-wave, passive devices, EMC/EMI topics and Antennas

정 낙 삼



1967년 2월: 서울대학교 문리과대학 물리학과(이학사)
1973년 5월: 미국 Purdue University(이학박사/물리학)
1973년 5월~1976년 6월: 미국 Purdue University, 연구원
1976년 7월~1999년 7월: 한국표

준과학연구원 선임연구원, 책임연구원, 연구위원 역임
1999년 8월~현재: 한국표준과학연구원 명예연구원
1989년~현재: 한국전자과학회 부회장('89~'95), 회장('96/'97), 명예회장('98~현재)
[주 관심분야] EMI/EMC, EMC 국제표준, 국제단위계(SI)