시간주파수 측정표준과 첨단기술

DOI: 10.3938/PhiT.19.031

권택용

Time & Frequency Standards and Cutting Edge Technologies

Taeg Yong KWON

We broadly describe the current state of the art in time and frequency measurement standards. An introduction with a historical background is followed by a description of the organizational protocol that maintains standard time. Current and future trends in atomic and optical frequency standards are reviewed within the context of research interest at KRISS. We conclude with a discussion of present and future needs and applications.

서론

1714년 영국에서는 경도(longitude)를 정확히 측정하는 방법을 찾아내는 사람에게 2만 파운드의 상금을 주는 경도법을 제정하였다. 항해를 위해서는 위도(latitude)와 더불어 정확한 경도의 측정이 요구된다. 정확한 시간을 알고 있으면 태양이나 별의 위치로부터 경도를 계산할 수 있고, 이를 위해서는 해양에서 계속 동작하는 정밀한 시계가 필요하다. 존 해리슨(John Harrison, 1693~1776)은 오랜 연구 끝에 2개월 동안 5초가 틀리지 않는 정확한 시계를 개발하여 1773년에 경도상을 수상하였다.

현대에도 시계는 항해 또는 항법에서 있어서 계속해서 중요한 역할을 하고 있다. 오늘날 거의 모든 비행기나 선박은 GPS(Global Positioning System)를 이용한 항법 시스템을 갖추고 있으며, 심지어 많은 자동차에도 이 시스템이 갖추어져 있다. GPS를 이용한 항법은 정확한 시간을 이용하여 위치

를 알아내고 이를 항법에 이용하는 방법이다. 항법뿐만 아니라 현대 사회에서는 통신, 방송, 인터넷, 우주 항공, 전력 등의 많은 분야에서 정확한 시계를 필요로 하고 있다.

시계는 태양의 주기적인 운동(실제는 지구의 자전과 공전 운동에 의한 현상이지만)을 이용한 해시계(sundial)로부터 물시계, 진자시계, 기계시계, 수정시계 등을 거쳐 현대에 이르러서는 원자시계로 발전을 거듭해 왔다. 오늘날 세계에서 가장 정확한 시계는 3억 년 동안 수초가 틀리지 않는 정확도를 갖고 있다.(정확도: $< 1 \times 10^{-15}$)^[1] 이와 같이 정확한 시계는 상대성 이론의 검증, 우주전파 망원경, 물리상수 검증 등의 첨단 기초 과학 분야에서도 중요하게 이용되고 있다.

시간의 단위인 초(second)는 주기적으로 반복되는 현상으로부터 구해지고, 주기(period)와 주파수(frequency)는 서로 역수관계이므로 시간과 주파수는 동시에 결정된다. 이러한 이유로 시간과 주파수는 함께 다루게 되고, 시간주파수(time and frequency) 측정표준이라는 표현이 널리 사용되고 있다.

시간주파수 측정표준의 활용분야

시간주파수 표준은 정보통신산업, 우주항공산업, 전력산업 등 다양한 전통산업분야와 지진관측, 기상관측, 우주전파 관측, 물리상수 측정 등 과학기술 분야, 그리고 유비쿼터스, 센서네트워크, 홈오토메이션 등과 같은 미래 첨단 산업 분야에 광범위하게 사용되고 있다.

정확한 시계는 앞서 기술한 바와 같이 위성항법에 있어서 핵심역할을 하고 있을 뿐 아니라 현재 많은 연구가 진행 중인 중단 없는 측위(seamless positioning)에 있어서도 꼭 필요한 요소이다. 중단 없는 측위를 위해서는 위성을 사용하지 않는 측위와 실내 측위가 요구되는데, 이때에도 높은 정확도의 시계를 필요로 한다.

현대는 정보통신의 사회이며, 점점 더 그 기술이 고도화되고 있다. 이러한 고도화된 정보통신산업을 위해서는 대용량,

저자약력

권택용 박사는 1996년 부산대학교에서 박사학위를 취득한 후 현재 한국표준과학연구원 기반표준본부 길이시간센터장으로 재직하고 있다.
(tykwon@kriss.re.kr)

REFERENCES

- [1] S. A. Diddams *et al.*, Science **306**, 1318 (2004).

Fig. 1. The SI base units and some of their links to atomic and fundamental constants.

초고속의 통신이 기본적으로 요구된다. 통신에 있어서 통신의 속도와 용량을 최종 결정하는 중요 요소 중의 하나는 통신망에 사용되는 시계의 정확도이다. 통신망에서는 많은 정보를 여러 곳에서 동시에 송수신하는 것이 필요하며, 이는 시분할(time division) 또는 주파수분할(frequency division) 기술을 통해 가능하게 된다. 두 기술 모두 궁극적으로는 통신망에 사용되는 시계의 정확도에 의존하게 된다. 이에 국제통신연맹(ITU, International Telecommunication Union)에서는 국제통신연맹 표준안 ITU-T G.811에 통신망 동기화 사용되는 시계의 최소요구 조건을 명시하고 있다.

지진이나 기상이변의 관측, 우주 관측 등에 있어서는 여러 지점에서 측정된 데이터들의 통계 처리가 필요하고, 이를 위해서는 측정의 정확한 시점 관리가 필요하다. 특히, 최근에는 장거리 간섭계(VLBI, Very Long Baseline Interferometer)를 구성하여 천체 관측, 대륙의 이동, 암흑물질의 중력렌즈 연구 등에 사용하려고 하는데, 이때 장거리 전파관측망간의 시각동기가 매우 중요하다. 세계 각국은 전국적인 또는 여러 국가 사이의 네트워크를 구성하여 보다 더 정밀한 측정이 가능한 VLBI 시스템을 구축하고 있다. 우리나라도 한국천문연구원 주도로 서울, 제주, 울산에 3대의 전파 관측대로 구성되는 KVN(Korean VLBI Network)의 구축을 진행하고 있다. 또한 인공위성을 이용하여 장거리 간섭계를 구성하여 중력파를 관측하려는 연구도 시도되고 있다. 이와 같은 장거리 간섭계에서 시각의 동기 수준이 측정 한계에 영향을 주기 때문에 더욱 정확한 시간주파수 표준에 대한 연구가 필요하다.

그림 1은 시간의 기본단위인 초와 다른 6개 기본단위 및 물리 기본상수와의 관계를 보여주고 있다. 최근에 개발된 실험형 원자시계의 경우 정확도가 10^{-16} 수준에 이르고 있는데, 이는 다른 어떤 기본단위보다 높은 정확도이다.

이와 같은 높은 정확도의 원자시계를 이용하면 여러 물리 상수를 정밀하게 측정할 수 있는데, 이는 물리상수의 공간적, 시간적 불변성을 검증하는데 원자시계가 사용됨을 의미한다.^[2] 또한, 정밀한 원자시계를 비행기 또는 인공위성에 탑재하여 중력에 따른 시간변화를 측정함으로써 상대성 이론을 검증하는 연구도 진행되고 있다.

시간주파수 표준

1초의 정의는 1967년 제13차 국제도량형총회(CGPM)에서 태양시(solar time) 기준에서 원자시(atomic time) 기준으로 변경되었는데, 새롭게 결정된 초의 정의는 다음과 같다.^[3]

초는 세슘 133 원자 (^{133}Cs)의 바닥상태에 있는 두 초미세 준위간의 전이에 해당하는 복사선의 9 192 631 770 주기의 지속시간이다.

이에 따라 세슘 133 원자의 바닥상태의 초미세준위 갈라짐은 정확히 9 192 631 770 Hz가 된다. 국제적인 시간주파수 표준은 각국의 표준기관에서 운영하는 원자시계와 1차 주파수표준기의 국제비교를 통해 생성된다.(그림 2) 각국의 표준기관에서는 상용 원자시계를 이용하여 UTC(k) (실험실 k에서 유지하는 세계협정시)를 생성하고, 인공위성을 이용하여 측정된 시각비교 데이터를 프랑스 파리에 있는 국제도량형국(BIPM, Bureau International des Poids et Mesure)에 보내게 된다. 우리나라는 한국표준과학연구원(KRISS, Korea Research Institute of Standards and Science)에서 5대의 세슘원자시계와 4대의 수소메이저 원자시계를 이용하여 UTC(KRIS)를 생성하고 시각비교데이터를 BIPM에 매달 보내고 있다. 현재, BIPM에는 세계 각국 70여 개의 실험실에서 400여 대의 원자시계 데이터가 보고되고 있다. 원자시계 400여 대의 가중평균(weighted average)을 취하여 자유원자시척도(EAL, Free Atomic Scale)를 계산하고, 각국 표준기관에서 보내온 1차 주파수표준기(PFS, Primary Frequency Standard) 데이터를 이용하여 EAL을 초의 정의에 맞도록 보정하게 된다. 이렇게 만들어진 시간척도를 국제원자시(TAI, International

REFERENCES

- [2] T. M. Fortier *et al.*, Phys. Rev. Lett. **98**, 070801 (2007).
- [3] BIPM: The International System of Units (SI), 8th edition (2006).

Fig. 2. Schematic diagram of the international time system.

Atomic Time)라고 한다.

여기서 1차 주파수표준기는 각국의 표준기관에서 개발하여 유지하고 있는 실험실형 원자시계를 말하는데, 1초의 정의를 실현하고 EAL을 보정하여 TAI를 생성하는데 사용되므로 진정한 시간주파수 표준의 원기라고 할 수 있다. KRIS에서는 KRIS-1이라고 명명된 광펄핑 세슘원자시계를 개발하여 2008년에 처음으로 보고하였으며, 이로써 KRIS도 TAI 생성에 기여하는 1차 주파수표준기를 보유한 기관이 되었다.^[4,5]

TAI에 윤초(leap second)를 도입하여 평균태양시와 보조를 맞춘 시간척도를 세계협정시(UTC, Coordinated Universal Time)라 하는데, TAI와 UTC는 현재 34초의 차이가 있다. TAI와 UTC는 정수초의 차이값을 제외하고는 똑같은 시간척도이다.

KRIS에서는 UTC(KRIS)를 UTC와의 차이가 항상 30 ns 이내가 되도록 유지하고 있다. 대한민국표준시(KST, Korea Standard Time)는 UTC(KRIS)에 9시간을 더하면 되는데, 이는 우리나라가 동경(동쪽의 경도) 135도를 표준자오선으로 사용하고 있기 때문이다.

우리나라의 표준주파수(KSF, Korea Standard Frequency)는 UTC(KRIS)의 비율(rate)로부터 얻어지는데, UTC(KRIS)의 UTC에 대한 상대적인 비율은 2×10^{-14} (1 d) 이하로 유지되고 있다. 이는 KSF가 국제 주파수표준과의 상대 차이값이 2×10^{-14} (1 d) 이하임을 의미한다.

국제 소급성(traceability)이 확보된 시간주파수 표준의 보급을 위해 KRIS에서는 다음과 같은 활동을 하고 있다. 즉 국내 산업체를 위한 측정시험 및 교정 서비스를 제공하고, 표준주파수국을 운영하면서 표준시 방송(호출부호 HLA, 방송주파수 5 MHz)을 하고 있으며, 인터넷을 통하여 타임서버(time.kriss.re.kr)로부터 한국표준시를 보급하고 있다.

원자시계의 개발 연구 현황

앞서 기술한 바와 같이 원자시계는 정밀 산업, 정보통신산업, 첨단과학 등의 다양한 분야에서 활용도가 매우 높고, 미래의 첨단 사회에서는 그 역할이 더욱 증대될 것으로 예측되고 있다. 이러한 주변 환경의 영향으로 원자시계의 개발연구는 활발하게 진행되고 있다. 원자시계의 연구는 크게 두 가지 방향으로 진행되고 있는데, 첫째는 보다 더 정확한 시계를 개발하기 위한 연구가 있고, 둘째는 다양한 분야에서 활용이 가능한 소형의 원자시계 개발 연구이다.

소형 원자시계로는 현재 루비듐(Rb) 원자시계가 가장 널리 사용되고 있다. 작은 것은 크기가 약 $2.3 \text{ cm} \times 7.8 \text{ cm} \times 1.1 \text{ cm}$ 밖에 되지 않는다. 하지만 램프를 이용한 전통적인 방식의 루비듐 원자시계의 경우 크기를 더 줄이는 것은 힘들기 때문에, 최근 이러한 한계를 극복하기 위한 연구들이 진행되고 있는데, 램프 대신에 다이오드 레이저를 사용하고 CPT (Coherent Population Trapping) 현상을 이용하여 아주 작은 원자시계를 개발하려는 연구들이 시도되고 있다. 미국의 표준기관인 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서는 초소형의 CSAC(Chip-Scale Atomic Clock)를 개발하였는데, 원자시계를 구성하는 물리부의 크기가 $4.2 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ 에 불과하다.^[6] 물리부는 원자로부터 시계 공진신호를 얻기 위한 원자셀과 광학계를 일컬으며, 다이오드레이저, 세슘원자셀, 포토다이오드, 온도조절용 히터(heater) 등으로 구성되어 있다. 실제 응용이 가능한 CSAC의 최종 크기는 1 cm^3 이하가 될 것으로 예측되고 있다.

다른 한편으로, 보다 높은 정확도의 원자시계 개발을 주요 목적으로 하는 연구가 있다. 이 경우는 크기에 구애받지 않고, 높은 정확도와 높은 안정도를 확보하는 것을 목표로 하고 있다. 이는 궁극적으로 측정 한계의 도전을 통해 시간의 기본 단위인 초의 정의 실현과 기초과학 분야로의 새로운 가능성을 추구하게 된다. 현재, 세계에서 가장 정확한 원자시계는 원자분수시계(atomic fountain clock)인데, 정확도가 10^{-16} 수준이다.^[7] 프랑스의 SYRTE, 미국의 NIST, 독일의 PTB, 영

REFERENCES

- [4] S. H. Lee *et al.*, Metrologia **46**, 227 (2009).
- [5] Taeg Yong KWON and Ho Seong LEE, Physics and High Technology **18**(4), 28 (2009).
- [6] S. Knappe *et al.*, Appl. Phys. Lett. **85**, 1460 (2004).
- [7] R. Wynands and S. Weyers, Metrologia **42**, S64 (2005).
- [8] H. S. Lee *et al.*, J. Korean Phys. Soc. **45**, 256 (2004).
- [9] T. Y. Kwon *et al.*, IEEE Trans. Instrum. Meas. **52**, 263 (2003).

Fig. 3. Diagram and photo of the cesium fountain clock at KRISS.

국의 NPL, 일본 NICT와 NMIJ 등의 표준기관에서는 원자분수시계를 개발한 바 있으며, 한국,^[8,9] 중국 등의 표준기관에서는 개발이 진행 중이다.

원자분수시계는 레이저 냉각된 원자를 이용하는데, 이때 냉각된 원자의 온도는 수 μK 수준이다. 원자의 레이저 냉각기술은 1980년대에 발명된 기술로, 이 기술을 이용하여 원자를 냉각할 수 있을 뿐 아니라 원자의 위치와 속도를 조절하는 원자 조작기술도 가능하게 되었다. 원자분수시계에서는 원자를 레이저로 냉각한 후 레이저의 주파수를 조절하여 원자를 위쪽으로 쏘아 올린다. 원자가 발사된 후 모든 레이저를 끄면, 원자는 초기 속도를 가지고 위쪽으로 올라갔다가 중력에 의해 다시 아래쪽으로 떨어지게 되는데, 이때 원자들의 궤적이 분수와 같다하여 원자분수시계라고 불리고 있다. 기존의 원자시계에서는 열원자빔을 이용하므로 원자의 속력이 200 m/s 이상인데 반하여 원자분수시계에서는 원자의 속력이 1 m/s ~ 3 m/s이다.^[7-9] 이와 같은 느린 원자를 이용하면 열원자빔의 경우에 비해 100배 이상 좁은 선평의 시계 공진신호를 얻을 수 있고, 이는 시계의 정확도 향상에 직접 연결된다. 그림 3은 KRISS에서 개발 중인 원자분수시계 사진이다.

상용 원자시계, 광평평 원자시계, 원자분수시계 등은 대부분 세슘원자 또는 루비듐 원자를 이용한다. 이 원자들의 바닥상태에 있는 두 초미세준위 사이의 전이에 해당하는 주파수는 각각 약 9.2 GHz(세슘)와 6.2 GHz(루비듐)로 마이크로파 주파수 영역에 해당된다. 최근 마이크로파 영역보다 훨씬 주파수가 높은 가시광 또는 자외선 영역에서 시계전이선을 갖는 원자를 이용하여 보다 더 정확한 원자시계를 개발하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 이와 같이 기존의 원자시계와 달리 광 영역의 전이 주파수를 이용하는 시계를 광시계

(optical clock)라고 한다. 광시계는 주파수가 수백 THz이므로 세슘이나 루비듐의 시계전이선에 비해 주파수가 $10^5 \sim 10^6$ 배 높다. 원자시계의 정확도와 안정도는 일반적으로 원자공진의 Q값(quality factor)이 클수록 향상되고, 공진의 Q값은 공진주파수에 비례하므로, 공진 주파수가 높을수록 원자시계의 정확도와 안정도가 좋아지게 된다. 다른 요인을 제외하고 공진 주파수만을 고려한다면, 광시계는 마이크로파시계(microwave clock)보다 $10^5 \sim 10^6$ 배 향상된 정확도와 안정도를 갖는 것이 가능하다.

광시계는 중성 원자(neutral atom)를 이용하거나 이온(ion)을 이용하는데, 사용되는 원자와 이온은 Ca, Sr, Yb, Mg, H, Hg^+ , Yb^+ , Sr^+ , Al^+ 등으로 다양하다. 현재, 가장 높은 정확도와 안정도를 보여주는 광시계는 미국 NIST에서 개발한 Al^+ 이온을 이용한 광시계인데, 정확도가 10^{-17} 이하로 원자분수시계에 비해 10배 이상 높은 정확도를 보여주고 있다.^[10] 그 외 프랑스, 독일, 영국 등에서도 원자분수시계의 성능과 유사하거나 더 높은 정확도를 가진 중성원자 또는 이온 광시계를 발표하고 있다.

국제도량형 위원회(CIPM) 산하에 있는 시간주파수 자문위원회(CCTF)에서는 우수한 성능을 보여주는 광시계들의 주파수 측정값 중 일부를 초의 2차 표현으로 선택하였다. 그런데 아직까지는 원자분수시계보다 높은 정확도의 광시계는 채택되지 않고 있다. 그 이유는 보고되는 광시계의 개수가 아직 충분하지 않기 때문이다. 다시 말하면, 시간주파수 측정표준으로 채택되기 위해서는 최소한 2개 이상의 같은 종류의 시계의 평가 결과가 필요한데, 광시계의 경우 그렇지 못하기 때문이다. 이에 CCTF에서는 각국의 표준기관에 광시계에 대한 활발한 연구를 촉구하고 있다. 한편으로 CCTF에서는 멀지 않은 미래에 광시계가 마이크로파시계의 성능을 추월하게 될 것이고, 이에 따라 세슘원자에 바탕을 둔 초의 정의를 바꿀 필요가 있을 것임에 따라 초의 재정의에 대한 논의를 시작하였다.

KRISS에서는 Yb 원자를 이용한 광격자 시계(optical lattice clock)를 개발 연구를 수행하고 있는데, 10^{-17} 수준의 정확도를 목표로 하고 있다.^[11] 서로 반대방향으로 진행하는 두 레이저를 이용하여 서로 교차하는 정상파(standing wave)를 만들고, 이를 이용하여 정상파의 마디와 골이 격자 모양을 이루도록 하면 이른바 광격자(optical lattice)를 형성할 수 있

REFERENCES

- [10] C. W. Chou *et al.*, Phys. Rev. Lett. **104**, 070802 (2010).
- [11] D. H. Yu *et al.*, Proc. EFTF 2010 (Noordwijk, Netherlands, 2010), p. 98.

다. 그리고 형성된 광격자의 마디 또는 골에 각각 1개씩의 냉각된 원자를 포획할 수 있다. 중성 원자를 이용하는 광시계의 경우 한 개의 이온(single ion)을 이용하는 이온 광시계에 비해 많은 원자를 이용하므로 관측되는 신호의 크기가 크고, 따라서 신호 대 잡음비가 높으므로 보다 좋은 성능이 기대된다. 반면에, 중성 원자들 간의 충돌에 의한 효과에 의해 시계의 성능이 저하되는 단점이 있다. 광격자 시계에서는 많은 중성 원자를 이용하면서도 충돌에 의한 단점을 극복할 수 있는데, 이는 형성된 광격자에 원자를 포획함으로써 원자간 충돌을 막을 수 있기 때문이다.

결 론

시간주파수 표준은 국민의 일상생활에서 필요로 하는 표준 시에서 시작하여 철도, 항공 등에서 교통 체계 관리를 위한 시각 동기, 정보통신 산업의 망 동기, 항법을 위한 정밀시각, 유비쿼터스 등과 같은 미래 첨단 산업에 이르기까지 이용범위가 광범위하므로 반드시 갖추어야 할 국가적인 인프라이다. 뿐만 아니라 시간주파수 표준은 7개 기본단위 중 가장 정확한 측정표준으로서 다른 측정표준의 정확성을 높이는 역할을 담당하고 있다.

시간주파수 측정표준이 국가 발전에 보다 많은 기여를 하기 위해서는 측정표준의 확립과 더불어 표준 보급 시스템의 확보가 중요하다. 선진국의 경우 다양한 시간주파수 표준 보급체계를 유지하고 있다. 예를 들면, 미국에는 GPS 위성, 장파 표준방송, 단파 표준방송, 로란(Loran), 인터넷 타임서비스 등 다양한 보급시스템을 운영하고 있다. 특히, 미국은 활용도가 높고 상호 보완적인 역할을 할 수 있는 GPS 위성과 장파 표준방송 시스템을 함께 운영함으로써 시간주파수 표준을 필요로 하는 분야에 충분히 보급하고 있을 뿐 비상시에도 안정적인 보급이 가능하도록 하고 있다. 그렇지만 우리나라의 경우 아직 표준시 보급을 위한 위성이나 장파 표준방송 시스템은 갖추지 못하고 있다. 국내에서 많은 사용자들이 미국의 GPS 위성신호에 의존하고 있는데, GPS 위성은 미국의 군사적인 목적으로 설치된 것임을 고려할 필요가 있다. 즉, 미국의 입장에서 유사시에는 사용을 허락하지 않을 수 있다는 것이다.

우리나라가 선진국으로 발전하고 미래 첨단 산업 사회로 발전해 나아가기 위해서는 시간주파수 측정표준의 확립, 유지, 향상과 함께 폭 넓은 활용을 위한 전국적인 보급시스템의 확대가 필요하다.