최첨단 극한 기술: 광시계

DOI: 10.3938/PhiT.21.053

권택용·유대혁

Cutting-Edge Technology: Optical Atomic Clock

Taeg Yong KWON and Dai-Hyuk YU

An optical clock is an atomic clock that uses an atomic transition frequency in the optical region of atoms. The uncertainty of an optical clock is expected to go down to the 10^{-18} level. Since the 1940s, many researchers have contributed to the development of atomic clocks, and some of them have won the nobel prize for their research achievements. In this paper, the relation between the atomic clock and the achievements of novel prize winners is reviewed. An optical clock, an important application of the 2012 Nobel Prize winner's work, is described on the basis of its principle and applications.

서 론

원자시계는 원자 에너지 준위 사이의 공명에 의해 흡수 또는 방출되는 전자기파의 고유 주파수를 이용하여 일정한 주기 신호를 얻고, 이 신호를 이용하여 시계로 동작하도록 만들어진 것이다. 현재, 주로 사용되는 원자시계는 루비듐(Rb) 원자시계, 세슘(Cs) 원자시계, 수소메이저(H-maser) 등이 있는데, 이러한 원자시계에서 사용되는 원자 전이선의 주파수는 1 GHz ~ 10 GHz로 마이크로파 영역에 속한다. 최근, 마이크로파보다 주파수가 100,000배 이상 높은 가시광선 또는 자외선 영역에서의 원자의 전이를 이용한 원자시계에 대한 연구가 활발히 진행되고

있는데, 이런 시계를 광시계(optical clock 또는 optical atomic clock)라 하며 기존의 마이크로파 전이를 이용하는 시계를 마이크로파 원자시계(microwave atomic clock)라 한다.

원자시계는 1940년대에 처음으로 등장한 후 매우 빠른 속도로 그리고 지속적으로 발전하고 있으며, 최근에는 10^{-18} 불확도를 가진 광시계 개발 연구가 활발히 진행되고 있다.^[1] 광시계는 극저온으로 냉각된 이온이나 중성원자를 이용하는데, 지금까지 보고된 것 중 2010년 미국 국립표준기술연구소(NIST)에서 발표한 Al^+ 이온 광시계가 가장 정확한 원자시계로 불확도가 8.6×10^{-18} 이다.^[2] 이 시계는 1940년대의 초창기 원자시계에 비해 정확도가 10^7 배 이상 높다. 최초의 원자시계 이후 60여 년 동안 원자시계 연구분야에서 우수한 과학기술들이 발견 또는 발명되어 다른 연구분야에 파급되기도 하고, 반대로 다른 분야의 새로운 과학기술들을 원자시계에 적용하여 원자시계의 발전을 꾀하기도 하였다. 이러한 과정에서 원자시계와 관련된 연구분야의 여러 연구자들이 노벨 물리학상을 수상하였다. 본론에서는 원자시계와 노벨물리학상 수상 업적의 관계를 살펴보고, 2012년 노벨물리학상 수상 업적의 주요 응용분야로 주목받고 있는 광시계에 대해 기술하고자 한다. 그리고 끝으로 광시계의 활용 분야를 소개하고자 한다.

원자시계와 노벨 물리학상

1897년 William Thomson^[3]에 의해 원자 전이를 이용하여 시간을 측정할 수 있다고 처음으로 제안된 후 실질적으로 이러한 시계가 구현된 것은 1930년대의 Isidor Rabi의 연구 결과 덕분이었다. Rabi는 자기공명(magnetic resonance)에 대한 연구로 1944년 노벨물리학상을 수상하였으며, 1945년 원자빔의 자기공명을 이용하는 원자시계를 제안하였다. 1949년

저자약력

권택용 박사는 1996년 부산대학교에서 박사학위를 취득한 후 일본 계량연구소(NMIJ) STA fellow(1999-2000)를 거쳐 현재 한국표준과학연구원 기반표준본부 시간센터장으로 재직하고 있다. (tykwon@kriss.re.kr)

유대혁 박사는 서울대학교 박사(2000)로 현재 표준과학연구원에 재직 중이다. 미국 국립표준기술연구원(NIST) 객원연구원(2005-2006)을 거쳐 2008년부터 이터븀 광격자 시계 개발 연구를 하고 있다. (dhyu@kriss.re.kr)

REFERENCES

- [1] C. W. Chou *et al.*, Phys. Rev. Lett. **104**, 070802 (2010).
- [2] D.-H. Yu *et al.*, Phys. High Technol. **19**(5), 19 (2010).
- [3] W. Thomson and P. G. Tait, *Treatise on Natural Philosophy*, 2nd ed. (Cambridge University Press, Cambridge, England, 1879).

Rabi의 제자였던 Norman F. Ramsey는 마이크로파에 원자 빔을 2회 통과시켜 얻은 분광신호를 이용하는 원자시계를 제안하였고, 이는 기존보다 훨씬 더 정확한 시계가 될 것으로 예측하였다. 이에 원자시계를 개발하는 연구자들은 Ramsey의 제안을 적용한 원자시계를 제작하였고, 좁은 선폭의 분광신호를 얻게 되어 시계의 정확도를 획기적으로 향상시키는 것이 가능하게 되었다. 이와 같은 Ramsey 분광법은 원자시계뿐만 아니라 다른 분야의 과학기술 발전에 크게 영향을 끼쳤고, 이러한 공로를 인정받아 Ramsey는 1989년 노벨상을 수상하였다. 원자시계의 발전에 크게 기여한 또 다른 연구는 원자의 광펌핑 원리를 발명한 것이다. 원자시계는 원자의 두 바닥상태 사이의 초미세 전이(hyperfine transition)를 이용하는데, 전이에 의한 흡수(또는, 방출) 신호를 얻기 위해서는 원자가 두 초미세 준위 중 한 준위에만 분포하여야 한다. 강한 자기장을 이용하는 Stern-Gerlach 실험을 적용하면 한 준위에 분포하는 원자만을 분리할 수 있지만, 이 방법에서는 강한 자기장에 의한 영향이 문제가 된다. Alfred Kastler는 광학적인 방법으로 원자의 상태를 조절할 수 있는 광펌핑 원리를 발명하였고, 이 공로로 1966년 노벨상을 수상하였다.

Rabi, Kastler, 그리고 Ramsey의 아이디어가 적용된 대표적인 시계가 광펌핑 세슘 원자빔 시계이다. 한국에서는 한국표준과학연구원이 2008년 KRISS-1으로 명명된 광펌핑 세슘 원자빔 시계를 개발하여 2009년 국제 등록하였다.^[4] 그림 1은 광펌핑 세슘 원자빔 시계의 동작 원리를 보여주고 있다. 고온의 Cs 오븐에서 증발된 원자는 원자빔 형태로 정렬되어 마이크로파 공진기를 지나게 되는데, 이때 원자에서 자기공명에 의한 초미세 전이가 발생하게 된다. 즉, Rabi에 의해 밝혀진 자기공명에 의한 전이가 발생한다. 그림에서 보는 바와 같이 U-자형 공진기를 이용하여 원자에서 두 번의 전이가 일어나도록 하면, 두 번의 상호작용간의 간섭에 의해 fringe 형태의 분광신호(Ramsey fringe)가 관측되는데, 이와 같은 방법으로 좁은 선폭의 분광신호를 얻는 것을 Ramsey 분광법이라고 한다. 그리고 원자빔이 마이크로파 공진기로 들어가기 전에 광펌핑 원리를 이용하여 원자의 상태를 조절한다. $F=3$ 준위와 $F=4$ 준위에 고르게 분포된 원자를 Kastler의 광펌핑 원리를 적용하여, 즉 레이저로 원자에서 광펌핑이 일어나도록 하여, 원자들이 $F=4$ 준위에만 분포하도록 한다. 정리하자면, Rabi에 의해 원자시계의 가능성이 제안되었고, Ramsey 분광법에 의해 좁은 선폭의 공진신호를 얻을 수 있게 되어 원자시계의 정확도가 크게 향상되었으며, Kastler의 광펌핑 원리에 의해 기존의 자석으로 원자를 분리하던 방식이 갖는 강한 자기장 문제가 해결되어 보다 정확한 원자시계의 개발이 가능하게 되었다.

Rabi와 Ramsey의 시계 방식과는 다른 방식의 원자시계 중

Fig. 1. Principle of an optical pumped cesium atomic beam frequency standard.

의 하나로 수소메이저가 있다. 1954년 Charles Townes와 그의 동료들의 연구로부터 메이저(Maser)가 발명되었으며, 잘 알려진 바와 같이, 메이저는 레이저의 발명으로 이어진다. Townes는 메이저의 원리를 발견한 공로로 Nicolay G. Basov, Aleksandr M. Prokhorov와 함께 1964년 노벨상을 공동 수상하였다. 원자시계의 일종인 수소메이저는 세계 여러 표준기관에서 표준시 및 원자시 생성에 지금도 중요하게 사용되고 있다.

1950년대에 Jerrold Zacharias는 원자를 위로 발사하여 중력에 의해 떨어지는 원자분수를 만들고 원자의 이동 경로에 마이크로파 공진기를 두면, 원자가 마이크로파 공진기를 두 번 지나면서 Ramsey 공진이 일어나는 원자분수시계를 제안하였다. 하지만, 진공속의 원자는 수백 m/s의 속력을 가지므로, 이러한 시계를 구현하는 것은 현실적으로 불가능하였다. 그러나 1980년대에 레이저를 이용한 원자의 냉각기술이 개발되면서 1950년대에 제안된 원자분수시계가 가능하게 되었다. 원자를 레이저 냉각하여 수 μK 의 극저온으로 냉각하는 기술을 개발한 공로를 인정받아 1997년 Steven Chu, Claude C. Cohen-Tannoudji, William Phillips가 노벨물리학상을 공동 수상하였다. 더 나아가 2001년도에는 원자의 온도를 더 낮은 온도로 냉각하고 Bose-Einstein 응집현상을 실험적으로 성공한 업적으로 Eric A. Cornell, Carl Wieman, Wolfgang Ketterle가 노벨상을 공동 수상하였다. 원자의 레이저 냉각기술이 가장 성공적으로 적용된 것이 원자분수시계이다. 극저온의 원자는 수 cm/s 속력을 가지고 느리게 움직이므로, 원자의 조작이 쉽고 트랩된 원자 구름의 형태가 빠르게 사라지지 않고 일정시간 동안 유지되는 것이 가능하다. 이러한 특성으로 인해 극저온의 원자를 대상으로 여러 가지 물리 실험이 가능하게 되었다. 원자시계에서는 원자와 마이크로파 사이의 상호작용 시간을 충분히 길게 함으로써 기존의 열원자빔으로 얻

REFERENCES

- [4] T. Y. Kwon and S. H. Lee, Phys. High Technol. **18**(4), 28 (2009).

을 수 있는 Ramsey 신호의 선폭에 비해 대략 100배 좁은 1 Hz 수준의 공진신호를 얻을 수 있게 되었다. 현재, 시간의 단위인 1초의 정의를 실현하고 국제원자시(TAI, International Atomic Time)를 생성하는데 사용되는 원자시계 중 가장 정확한 시계는 레이저 냉각된 원자를 이용하는 세슘원자분수시계로 불확도가 4×10^{-16} 이다.^[5] 그림 2의 (a)는 원자분수시계의 동작원리를, (b)는 한국표준과학연구원(KRISS)에서 개발 중인 세슘원자분수시계의 일부를 보여주는 그림이다. 레이저 냉각된 원자를 레이저 광압을 이용하여 위쪽으로 쏘아올리면 원자는 위로 올라갔다가 중력에 의해 다시 떨어지게 된다. 원자가 마이크로파 공진기에 들어가자 직전에 광펌핑을 이용하여 원자의 상태를 조절한다. 이후 냉각된 원자는 올라가면서 한번, 내려오면서 다시 한번 마이크로파공진기를 지나면서 자기공명이 발생하게 되어 Ramsey 분광신호로 관측된다. 즉, 세슘원자분수시계에는 Rabi의 자기공명, Kastler의 광펌핑, Ramsey의 원자분광, 그리고 Chu 등의 원자의 레이저 냉각기술이 종합적으로 이용되고 있는 것을 알 수 있다.

원자시계의 정확도는 여러 가지 물리적인 요인에 의해 결정되지만, 가장 중요한 결정요인은 Q-값(Quality factor)이며, Q값은 공진선폭을 공진주파수로 나눈 값으로 정의된다. 마이크로파 전이를 이용하는 원자시계들 중에는 세슘원자분수시계의 Q값이 가장 높다. 세슘원자분수시계의 경우 공진선폭이 약 1 Hz, 공진주파수가 약 9.2 GHz이므로 Q값은 약 10^{10} 이 된다. 마이크로파보다 높은 주파수를 가지는 가시광이나 자외선 영역의 주파수를 이용하면 Q값을 높여 보다 더 정확한 원자시계를 만들 수 있다. 그러나 기존의 원자시계의 마이크로파와 가시광(또는 자외선) 주파수를 서로 비교할 수 없는 기술적 한계 때문에 광시계 개발연구가 활발하게 진행되지 못하였다. 이에 많은 연구자들이 마이크로파와 광주파수를 서로 비교하기 위한 연구를 수행하였는데, 두 주파수간의 약 10^5 배 차이를 극복하기 위해 다수의 주파수 체배기와 여러 대의 안정화 레이저를 이용하여 다단계의 주파수 체인을 형성하는 연구를 수행하였다. 하지만 이러한 시스템은 너무 복잡하고 구축하기도 어려우며, 전체 시스템의 안정적인 동작도 거의 불가능하여 현실적으로 주파수 비교에 적용할 수 없었다. 이러한 문제를 한 번에 해결한 것이 펨토초 광빔(femto-second optical comb)의 개발이다. 광빔을 이용하여 10^5 배의 주파수 차이를 간단하게 연결하여 비교하는 것이 가능해짐에 따라 가시광이나 자외선 영역의 공진주파수를 이용하는 광시계의 개발연구가 활발히 이루어졌다. 이러한 연구공로로 2005년 Roy J. Glauber, Theodor W. Hänsch, John L. Hall이 노벨상을 공동 수상하였다. 광시계의 경우 세슘원자분수시계보다 10^5 배 큰 Q값을 가지므로, 원리적으로는 세슘원자분수시계보다 10^5

Fig. 2. (a) Principle of an atomic fountain frequency standard and (b) the drawing of a Cs/Rb dual fountain frequency standard at KRISS.

배 더 정확한 원자시계의 개발이 가능하다.

광시계는 냉각된 이온 또는 중성원자를 이용하는데, 중성원자를 이용하는 경우에는 원자의 레이저 냉각기술이 사용되고, 이온을 이용하는 경우에는 이온 냉각기술이 사용된다(다음 절에 상세히 기술되어 있음). 1989년 이온 트랩 기술 개발로 Hans G. Dehmelt와 Wolfgang Paul이 노벨상을 공동수상하였으며(1989년 3명의 공동수상 중 1명은 Norman F. Ramsey 임), 2012년 올해에는 NIST의 David J. Wineland가 이온 냉각 및 양자상태 측정기술과 관련하여 Serge Haroche와 공동으로 노벨상을 수상하였다.

원자시계와 관련된 연구업적으로 노벨 물리학상을 수상한 과학자들과 그들의 연구업적을 표 1에 요약 정리하였다.

광시계

원자시계는 고유진동수를 가진 원자(의 시계 전이선), 고안정화 주파수발생기, 주파수를 측정하는 주파수계수기의 세 부분으로 이루어져 있으며^[2] 고안정화 주파수발생기의 출력을 원자의 시계전이선에 안정화한 후 그 출력을 이용함으로써 원자시계가 구현된다. 현재 초는 세슘-133 원자의 마이크로파 전이선을 기준으로 정의되어 있으나 광시계는 원자나 이온의 광주파수 전이선을 이용하게 된다. 따라서 고안정화 주파수 발생기는 초미세선폭의 레이저가 되며 주파계수기는 광주파수를 측정할 수 있는 광주파수빔이 된다. 광시계는 크게 이온

REFERENCES

- [5] K. Szymaniec *et al.*, Metrologia **47**, 363 (2010).

Table 1. Atomic clock and Nobel prize in physics.

Year	Nobel prize winner	Achievements	Related clock type
1944	Isidor Rabi	resonance method for recording the magnetic properties of atomic nuclei	atomic clock
1964	Charles H. Townes, Nicolay G. Basov, Aleksandr M. Prokhorov	fundamental work in the field of quantum electronics, which has led to the construction of oscillators and amplifiers based on the maser-laser principle	H-maser
1966	Alfred Kastler	discovery and development of optical methods for studying Hertzian resonances in atoms	optically pumped
1989	Norman F. Ramsey, Hans G. Dehmelt, Wolfgang Paul	Ramsey: invention of the separated oscillatory fields method and its use in the hydrogen maser and other atomic clock, the other: development of the ion trap technique	optically pumped, fountain, optical
1997	Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji, William D. Phillips	development of methods to cool and trap atoms with laser light	fountain, optical
2001	Eric A. Cornell, Wolfgang Ketterle, Carl E. Wieman	achievement of Bose-Einstein condensation in dilute gases of alkali atoms	fountain, optical
2005	Roy J. Glauber, John L. Hall, Theodor W. Hänsch	contributions to the development of laser-based precision spectroscopy, including the optical frequency comb technique	optical
2012	Serge Haroche, David J. Wineland	ground-breaking experimental methods that enable measuring and manipulation of individual quantum systems	optical

트랩을 이용한 광시계와 광격자에 포획된 중성원자를 이용하는 광격자시계가 있다. 광격자시계를 중심으로 한 광시계의 현황과 응용에 대해서는 물리학과 첨단기술 2010년 5월호의 원자물리와 정밀 측정 특집호를 통해 다루었으므로 본 절에서는 이온 광시계, 특히 Wineland팀의 알루미늄 이온 광시계를 중심으로 핵심 기술 및 응용에 대해 소개하고자 한다.

현재 광시계로 활발히 연구되고 있는 이온에는 알루미늄(Al), 칼슘(Ca), 스트론튬(Sr), 인듐(In), 이터븀(Yb), 수은(Hg) 이온 등이 있다. 광시계의 이온이나 중성 원자는 외부 영향에 의해 변화되지 않는 고유진동수를 제공해야 하므로 1차적으로 도플러 효과에 의한 주파수 이동을 없애기 위해 냉각 후 포획되어야 한다. 따라서 고유진동수를 제공하는 좁은 선포의 전이선뿐 아니라 냉각, 상태 준비 및 검출용 전이선도 존재해야 한다.

대부분의 이온 시계는 그림 3의 방식으로 레이저의 주파수를 이온의 시계전이선에 안정화한다. 강한 냉각 전이선을 이용해 이온을 냉각시켜 바닥상태에 준비한 후 시계전이선 레이저를 가한다. 이후 다시 냉각 전이선에 레이저를 가해 이온의 상태를 검출한다. 이온이 들뜬상태인 준안정상태(metastable state)로 여기되었다면 형광신호가 보이지 않고 바닥상태에 존재한다면 형광신호가 나타난다. 그림 3의 오른쪽 그래프에 나타난 것처럼 시계전이선 레이저를 가한 횟수에 대해 형광신호가 사라진 횟수를 통계적으로 처리하면 레이저와 전이선의 일치 정도를 알 수 있다. 시계전이선 레이저를 변화시켜 사라

Fig. 3. In the electron-shelving scheme a single ion is detected by monitoring the fluorescence signal from the strong cooling transition.^[6]

Fig. 4. Spectroscopy and transfer scheme for spectroscopy (S) and logic (L) ions sharing a common normal mode of motion, the transfer mode, with excitation n .^[7]

진 횟수가 최대화되도록 되먹임을 주어 안정화한다.

수은, 인듐, 알루미늄의 경우 냉각 및 상태검출용의 강한 전이선의 파장은 각각 194 nm, 159 nm, 167 nm의 극자외선 영역이다. 수은의 경우 두 대의 레이저와 2차 조화파 및 합주파수 발생을 이용하는 복잡한 과정을 거쳐 194 nm의 레이저를 얻으며, 인듐의 경우 레이저 개발의 어려움으로 인해 230.6 nm의 훨씬 약한 전이선을 냉각에 이용하고 있다.

Wineland팀은 그림 3처럼 하나의 이온에서 두 종류의 전이선을 모두 이용해야 한다는 그간의 상식을 넘어 냉각 및 상태 검출과 시계 전이선을 서로 다른 이온을 이용하여 구현함으로써 현재 세계 최고의 정확도를 가진 알루미늄 광시계 개발에 성공하였다. 그림 4에 그 과정이 나타나 있다.

그림 4처럼 두 이온을 동시에 이온 트랩에 포획한다. 이온 트랩에 포획된 두 이온은 쿨롱(Coulomb) 힘에 의해 같은 모드로 진동하게 된다. 이 진동은 조화진동자 운동으로 기술될 수 있다. 따라서 이온의 에너지 상태는 내부에너지 상태(전자 에너지)와 외부에너지 상태(진동 에너지)의 합으로 주어진다. 그림 4에서 스핀 에너지상태(화살표)로 표시된 것이 전자에너지 상태를, $n = 0, 1$ 로 기술된 것이 진동에너지 상태를 나타낸다. A 단계에서 두 이온을 모두 바닥 상태로 준비한다. 이때 두 이온이 같은 진동 모드를 공유하므로 S 이온을 레이저로 직접 냉각하지 않고 L 이온을 냉각하면 S 이온이 함께 냉각되는 ‘sympathetic cooling’이 일어난다. B 단계에서 레이저를 이용 S 이온을 중첩

REFERENCES

- [6] H. S. Margolis, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **42**, 154017 (2009).
- [7] P. O. Schmidt *et al.*, Science **309**, 749 (2005).

Fig. 5. Transfer of the $^{27}\text{Al}^+$ clock state to $^9\text{Be}^+$ for detection. Dotted lines denote the first vibrational excitation of the in-phase axial mode. The dashed line represents the virtual level of the $^9\text{Be}^+$ stimulated Raman transition.^[8]

상태로 만들고 C 단계에서 S 이온에 대해 적색 편이된 π 펄스 레이저를 가하면 B 단계의 전자 에너지 중첩 상태는 진동에너지 중첩 상태로 전이되며 동시에 같은 진동 모드를 공유하는 L 이온도 진동에너지 중첩 상태가 된다. D 단계에서 L 이온에 대해 적색 편이된 π 펄스 레이저를 가하면 진동 에너지 중첩 상태는 전자 에너지 중첩 상태가 된다. 결국 S 이온의 중첩 상태가 L 이온의 중첩 상태로 전이되는 것이다. 따라서 L 이온의 상태를 검출함으로써 S 이온의 상태를 알 수 있게 되는 것이다.

Wineland 팀의 알루미늄 이온 시계는 선형 이온 트랩에 알루미늄과 베릴륨(Be)을 함께 포획한다(그림 5). 알루미늄 이온을 S(Spectroscopy ion), 베릴륨 이온을 L(Logic ion)로 볼 수 있다. 알루미늄 이온의 냉각을 위한 167 nm 레이저를 개발하는 대신 베릴륨 이온을 313 nm 레이저로 냉각함으로써 알루미늄을 냉각한다. 냉각하여 두 이온 모두 바닥상태에 준비하는데 베릴륨의 경우 바닥 상태 초미세구조 전이선의 $F=2$ 인 상태로 준비한다. 267.4 nm의 시계 전이선 레이저를 조사하여 이온을 여기시킨다. 이후 상태를 검출하기 위해 알루미늄 이온의 상태를 베릴륨 이온의 상태로 전이하는 과정이 그림의 4, 5, 6번 과정을 통해 진행된다. 4번에서 상대적으로 강한 전이선에 레이저를 가하여 전자 상태와 진동 상태 모두 들뜬 상태로 여기시킨다. 같은 진동 모드를 공유하는 베릴륨 이온은 전자 상태는 바닥상태($F=2$)이면서 진동 상태는 들뜬 상태가 된다. 5번에서 라만 레이저를 이용한 이광자 여기를 통해 $F=1$ 상태로 베릴륨 상태를 전이시킨다. 6번에서 313 nm의 강한 전이선에 레이저를 가해 형광을 검출한다. 만약 알루미늄 이온이 들뜬 상태로 여기되었다면 4, 5번 과정이 발생하지 않으므로 베릴륨 이온은 $F=2$ 상태에 그대로 존재한다. 따라서 형광 신호가 발생한다. 하지만 알루미늄 이온이 들뜬 상태로 여기되지 않았다면 4, 5번 과정이 진행되어 베릴륨 이온은 $F=1$ 의 상태로 전이된다. 따라서 형광신호가 발생하지 않는 것이다.

2008년 Wineland 팀은 베릴륨 이온을 이용한 알루미늄 이

Fig. 6. Frequency ratio measurement system for the comparison of $^{199}\text{Hg}^+$ and $^{27}\text{Al}^+$ optical clock frequencies. The two laser frequencies locked to ion clock transitions are compared by means of a femto-second optical frequency comb, to which both clock laser systems are linked by 300-m lengths of actively phase-stabilized optical fiber.^[9]

온 시계의 불확도를 2.3×10^{-17} 으로 보고하였다.^[9] 이 값은 약 14억 년에 1초 정도의 오차를 보이는 성능이다. 이후 베릴륨 이온 대신 마그네슘(Mg) 이온을 이용하고 트랩을 개선하여 2010년에는 8.6×10^{-18} 의 불확도를 달성하였는데 약 37억 년에 1초의 오차를 보이는 성능이다.^[10] 이는 현재 광격자 시계와 이온 시계 모두에서 최고의 불확도 수준을 기록한 것이다.

이런 극한의 정밀도를 가진 광시계는 미래의 초의 정의를 구현하는 1차 주파수 표준기로서의 역할뿐 아니라 기본 물리 법칙의 검증 등 다양한 연구에 응용되고 있다.

Wineland 팀을 포함한 원자시계 연구 그룹에서는 초미세구조 상수 α 값의 시간적 변화를 추적하고 있다. 천문학 분야 등에서 오랜 연구 주제 중 하나인 초미세구조 상수 α 값의 변화가 관심을 불러일으킨 이유 중 하나는 이 값이 현재 값과 다를 경우 탄소의 생성 가능성 등에 큰 영향을 주어 현재 우주와 인류가 존재하지 않을 수 있다는 이론적 예측 때문이다. α 값은 원자의 에너지 준위와 관련되므로, α 값에 따라 원자의 에너지 준위도 변하게 된다. 천문학 분야에서는 원거리 별에서 지구에 도달하는 다양한 방사선의 스펙트럼을 검출하여 빅뱅 이후 생성 시기가 다른 물질로부터의 스펙트럼 변화가 있는지를 추적하고 있는 반면에, 원자시계 분야에서는 서로 다른 원자의 에너지 준위를 시간에 따라 비교하여 값의 차이가 있는지를 추적하고 있다.

그림 6은 알루미늄 이온 시계와 수은 이온 시계의 주파수를 비교하는 실험 장치의 개략도이다. Wineland 팀에서는 알루미늄 이온 시계와 수은 이온 시계의 주파수를 1년에 걸쳐 비교하여 α 값의 시간 변화를 측정하였고 $(d\alpha/dt)/\alpha = (-1.6 \pm 2.3) \times 10^{-17}/\text{year}$ 의 측정결과를 발표하였다.^[5] 광시계를 이용하여 측정된 이 결과는 지금까지 측정된 결과 중 가장 높

REFERENCES

- [8] T. Rosenband *et al.*, Phys. Rev. Lett. **98**, 220801 (2007).
- [9] T. Rosenband *et al.*, Science **319**, 1808 (2008).
- [10] C. W. Chou *et al.*, Phys. Rev. Lett. **104**, 070802 (2010).

Fig. 7. Relativistic time dilation by moving ion clock. The fractional frequency difference between the moving clock and the stationary clock is plotted versus the RMS velocity of the moving clock. The solid curve represents the theoretical prediction.^[11]

Fig. 8. Test on the gravitational time dilation using ion clocks.^[11]

은 정밀도로 측정된 것이다.

또 다른 흥미로운 실험은 아인슈타인의 상대성 이론을 광시계를 이용해 검증한 것이다. 위에서 기술한 것처럼 Wineland 팀은 Al-Be 이온 시계와 Al-Mg 이온 시계를 개발 보유하고 있으며 각 시계의 불확도는 2.3×10^{-17} , 8.6×10^{-18} 이다. 동일한 알루미늄 시계의 주파수, 즉 시간을 서로 비교할 수 있으며 상대론적 효과로 인한 10^{-16} 이하의 주파수/시간의 변동도 측정이 가능하다.

그림 7에 나타난 두 알루미늄 시계 중 왼쪽은 트랩에 안정적으로 포획된 상태이며 오른쪽 시계에는 외부에서 전기장을 가하여 안정점에서 벗어나도록 만들었다. 오른쪽 시계의 경우 이온 트랩의 특성에 의해 수직방향의 진동 운동을 하게 된다. 외부에서 가하는 전기장의 세기에 비례하여 이온은 안정점에서부터 멀어지며 더 빠른 속도로 수직 진동을 하게 된다.

두 이온 시계의 시계전이선에 안정화된 레이저의 주파수를 비교하여 그 차이를 측정하면 둘 사이의 주파수 차, 즉 시간차를 알 수 있다. 아인슈타인의 상대성이론에 따르면 움직이고 있는 시계가 정지해 있는 시계보다 느려지는 ‘시간 늘어남 (time dilation)’ 현상이 발생한다. 유명한 쌍둥이 파라독스에 비유한다면 왼쪽 시계는 지구에 있는 쌍둥이를, 수직 진동을 하는 시계는 우주와 지구 사이를 반복적으로 여행하고 있는 쌍둥이로 볼 수 있다. 시간 늘어남 효과로 인해 지구에 남아

있는 쌍둥이가 훨씬 빨리 늙게 된다. 그림 7에서 움직이는 이온 시계의 RMS 속도를 변화시키며 주파수 변동을 측정한 결과가 상대성 이론의 이론값과 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

상대성 이론에 따르면 중력 또한 시계에 영향을 미치는데 약한 중력을 겪는 시계는 시간이 더 빨리 가게 된다. 이론값으로는 1미터당 1.1×10^{-16} 의 상대주파수 값의 변화가 일어난다. Al-Mg 이온 시계는 Al-Be 이온 시계보다 17 cm 낮은 위치에 있는데 그림 8에 나타난 것처럼 이 상태에서 두 이온 시계의 주파수를 13번 비교 측정한 후 Al-Mg 이온 시계의 위치를 33 cm 위로 이동시킨 후 다시 5번 측정하였다. 각각의 경우 총 측정 시간은 약 100,000초, 40,000초였다. 그림 8의 오른쪽 측정 결과로부터 얻어진 상대 주파수 변동은 $(4.1 \pm 1.6) \times 10^{-17}$ 으로 상대론적 예측과 잘 일치한다. 광시계가 가지고 있는 극한의 정밀도로 일상적으로 쉽게 접할 수 있는 속도와 거리에 대해 상대론적 효과가 측정되고 검증된 것이다.

결론

불확도 10^{-18} 을 목표로 개발되고 있는 원자시계는 시간과 주파수의 정밀 측정뿐만 아니라 우주 항공, 천문, 기초물리상수 검증, 초정밀 측정 등의 기초과학 분야와 항법, 자세대 통신, 미래 첨단 산업 등의 다양한 산업 분야에서 활용될 것이다.^[1,12]

현재, 시간의 단위인 초는 세슘원자의 초미세 전이에 의해 정의되는데, 이는 광주파수를 기반으로 하는 정의로 대체될 것으로 예상되고 있다. 시간 단위인 초의 정확도 향상은 다른 물리량과 물리상수의 측정 정확도 향상으로 이어질 것이다. 결국에는 과학기술 및 첨단산업의 발전에까지 광시계의 정확도가 과급될 것이다. 이에 세계의 여러 나라에서 광시계 개발 연구를 활발히 수행하고 있으며, 이러한 연구의 결과로 원자시계 분야에서 다수의 노벨 물리학상을 수상하는 연구성과가 나오고 있다.

국내에서는 한국표준과학연구원에서 보다 정확한 시간주파수 표준을 위해 지속적으로 원자시계 개발 연구를 수행하고 있으며, 광시계의 한 종류인 이터븀(Yb)을 이용한 광격자시계를 개발하고 있다. 2011년과 2012년에는 이터븀 광격자시계의 시계전이선의 절대주파수를 독자적으로 측정하여 보고한 바 있으며,^[13] 이는 미국 NIST, 일본 NMIJ에 이어 3번째이다. KRISS의 이터븀 광격자시계의 불확도는 5.3×10^{-15} 로 측정되었으며, 10^{-18} 수준의 광시계 개발을 목표로 연구가 진행 중이다.

REFERENCES

- [11] C. W. Chou *et al.*, Science **329**, 1630 (2010).
- [12] T. Y. Kwon, Phys. High Technol. **19**(6), 25 (2010).
- [13] C. Y. Park *et al.*, submitted to Metrologia in 2012.