광시계: 10^{-18} 불확도를 향해

DOI: 10.3938/PhiT.19.024

유대혁·박창용·이원규

Optical Clock: Toward 10^{-18} Uncertainty

Dai-Hyuk YU, Chang Yong PARK and Won-Kyu LEE

Atomic energy levels in well-isolated and controlled environments are highly stable and therefore make ideal references for highly accurate frequency standards or clocks. Current definition of a second, since 1967, is based on the Cs hyperfine transition frequency of around 9.2 GHz. After the development of the optical frequency comb, various optical clocks using the optical transition of hundreds of THz show enormous improvements and have now surpassed the best Cs clock in accuracy. In this paper the fundamental aspects, current performance and applications of optical clocks are reviewed and the potential for future improvements is considered.

서론

시간이라는 단위는 사람들이 일상적으로 경험하는 가장 친근한 물리량 중의 하나이다. 아침에 일어나 시계를 보며 하루를 준비하고 약속시간에 맞추어 사람을 만난다. 고대하던 월드컵 경기 시간을 확인하고 알람을 설정하기도 한다. 일상을 살아가면서 우리가 경험하고 필요로 하는 시간의 정확도는 그리 크지 않아 보인다. 하지만 우리가 사용하는 인터넷과 휴

대폰이 제대로 동작하기 위해서는 훨씬 더 정확한 시계가 관련된 시스템을 동기해야만 한다는 사실을 아는 사람은 그리 많지 않다. 대부분의 운전자가 애용하는 네비게이션 장비가 인공위성에 장착된 원자시계가 없다면 동작하지 못한다는 사실을 아는 사람은 더 적을지 모른다. 이처럼 우리의 일상을 보이지 않게 뒷받침하고 있는 것이 정밀 시계 또는 정밀 주파수 발진기이며 극한의 정밀도를 자랑하는 원자시계는 이 모든 시계들의 정합성을 유지하는 시각 유지 및 동기의 최정점에 위치하고 있다.

국제도량형체계에서 시간의 단위인 초의 정의는 1967년 이전에는 천체의 움직임, 즉 지구의 자전과 공전에 의해 정의되었다. 하지만 천체의 움직임에 존재하는 일 단위 또는 년 단위의 요동 때문에 주파수의 변동이 없다고 여겨지는 원자의 고유진동수를 기준주파수로 하여 1967년 제13차 국제도량형 총회에서 재정의되었다. 현재 초의 정의는 “초(second)는 세슘-133원자(^{133}Cs)의 바닥상태에 있는 두 초미세 준위간의 전이에 대응하는 복사선의 9 192 631 770 주기의 지속 시간”이다. 따라서 현재 가장 정확한 시계는 세슘원자시계로 3×10^{-16} 수준의 불확도를 나타낸다. 이 값은 6천만 년에 1 초도 틀리지 않는 값이다.^[1]

그림 1에 나타난 것처럼 원자시계는 크게 세 부분으로 이루어져 있다. 1) 변하지 않는 고유진동수를 가진 원자의 시계 전이선, 2) 고안정화 주파수발생기 3) 주파수를 측정하는 주파수계수기가 그것이다. 고안정화 주파수발생기로부터 발생된 전자기파는 원자의 시계 전이선에 가해진다. 주파수발생기의 주파수가 원자의 고유진동수와 일치할 때 원자가 들뜬 상태로 전이할 확률이 가장 크고 주파수가 고유진동수로부터 멀어질수록 전이 확률이 낮아진다. 주파수에 따른 들뜬상태 원자수를 측정하여 가장 많은 원자가 전이하도록 주파수발생기의 주파수를 조정하면 주파수발생기의 주파수와 원자의 고유진동수가 일치하여 초의 정의를 구현할 수 있다.

현재 세슘원자시계는 1) 세슘 원자의 바닥상태 초미세구조

저자약력

유대혁 박사는 서울대학교 박사(2000)로 현재 표준과학연구원에 재직 중이다. 미국 국립표준기술연구원(NIST) 객원연구원(2005–2006)을 거쳐 현재 이터븀 광격자 시계 개발 연구를 하고 있다.

(dhyu@kriss.re.kr)

박창용 박사는 고려대학교 박사(2002)로 현재 한국표준과학연구원에 재직 중이다. 한국표준과학연구원 Post-doctor(2002–2003)를 거쳐 2003년부터 이터븀 광격자 시계 개발 연구를 하고 있다. (cypark@kriss.re.kr)

이원규 박사는 서울대학교 박사(2002)로 현재 표준과학연구원에 재직 중이며 이터븀 광격자 시계 개발 연구를 하고 있다. (oneqlee@kriss.re.kr)

REFERENCES

- [1] T. P. Heavner *et al.*, Proc. Symp. Freq. Stds. Metrology, 299 (2008).

Fig. 1. Three main parts of an atomic clock. 1) atomic reference 2) local oscillator 3) frequency counter.

전이선-약 9.2 GHz의 마이크로파 주파수 전이선) 2) 시계전 이선 주파수영역에 해당하는 마이크로파 주파수 발생기 3) 마이크로파 주파수 계수기로 구성되어 있다. 이에 비해 차세대 광시계는 1) 원자의 수백 THz에 해당하는 광주파수 전이선 2) 광주파수 영역의 전자기파를 발생시키는 고안정도 레이저 3) 광주파수 측정 및 마이크로파 비교가 가능한 광주파수 빔으로 구성되어 있다. 광시계는 세슘전이선의 주파수보다 $10^4 \sim 10^5$ 배 큰 주파수를 이용하여 1초를 세분할 수 있으므로 다른 조건이 동일하다면 그만큼 더 정확한 주파수 발생 및 측정이 가능하다. 길이영역에서 한 눈금이 더 세밀하다면 그만큼 정밀한 측정이 가능한 것과 같다. 원자 냉각 및 포획 기술, 1 Hz 이하 선폴을 가지는 고안정화 레이저 개발 기술이 이미 있었음에도 불구하고 최근에서야 차세대 광시계가 실현되고 있는 것은 광주파수 빔의 개발 덕분이다. 광주파수 빔은 광주파수와 마이크로파 주파수의 발생 및 측정 능력을 비약적으로 향상시켜 다양한 분야에 혁신적인 영향을 주고 있으며 이런 업적으로 2005년 노벨상이 수여되었다.^[2] 이어지는 본문에서 광시계의 기본요소, 최근 연구 결과 및 응용에 대해 소개한다.

기준주파수를 제공하는 원자

원자의 고유진동수를 기준주파수로 사용해야 하는 원자시계는 고유진동수 측정에 영향을 미치는 요인을 제거하거나 제거할 수 없다면 그 변화값을 알 수 있어야 한다. 고유진동수 측정을 방해하는 가장 큰 요인은 원자의 운동에 의한 도플러 이동이다. 이를 제거하는 방법에 따라 두 가지 방식의 광시계가 존재한다. 이온 시계는 이온의 움직임을 제한하고 포획하기 위해 Paul trap을 이용한다. 정전기장에는 퍼텐셜 최저점이 존재하지 않으므로 안장점 퍼텐셜을 생성한 후 약 1 MHz의 주파수로 양극과 음극을 교환하여 포획된 원자가

Fig. 2. Counter-propagating lasers creates a lattice potential that confines atoms in a region much smaller than the optical wavelength.^[4]

빠져나가지 못하게 한다. 현재 알루미늄, 칼슘, 스트론튬, 인듐, 이터븀, 수은 등의 다양한 이온을 이용한 연구가 이루어지고 있으며 가장 정확한 이온 시계는 알루미늄 이온 시계로 8.6×10^{-18} 의 불확도가 보고되었다.^[3] 이 값은 약 37억 년 동안 1초의 불확도만 보인다는 것을 나타낸다. 이온 시계는 포획 지속 시간이 길어 긴 시간 연속 측정이 가능하다. 따라서 불확정성의 원리에 의해 에너지 불확도, 즉 주파수 측정 불확도가 그만큼 작아지고 비례하여 시계의 정확도는 높아지게 된다.

또 다른 방식의 광시계는 중성원자를 이용하는 광격자 시계이다. 중성원자는 전기장으로 포획할 수 없으므로 레이저를 이용한 레이저 쌍극자포획방식을 이용한다. 레이저 쌍극자포획은 강한 레이저광에 의해 원자에 유도 쌍극자모멘트가 생성되면서 레이저-원자 상호작용 퍼텐셜의 최저점에 원자가 포획되는 현상이다. 적색(청색)이동 레이저를 가하면 원자들은 레이저 세기가 가장 큰(작은) 곳에 잡히게 된다. 이 방식으로 원자를 포획하면서 원자의 움직임을 없애기 위해서는 레이저를 서로 반대방향으로 입사하여 정상파를 만들어야 한다. 그림 2에 나타난 것처럼 정상파의 주기는 레이저파장의 절반에 해당되므로 원자는 레이저 파장의 절반 길이 내에 잡혀있게 된다. 레이저로 형성된 격자에 원자가 갇혀있게 되므로 광격자 시계라 불린다. 하지만 레이저에 의해 원자의 에너지준위가 변하게 된다는 결정적 단점 때문에 광시계로서는 적합하지 않다고 여겨져 왔다. 하지만 2002년과 2003년 동경대의 가토리 교수가 포획 레이저의 파장을 적절히 선택하면 시계

참고문헌

- [2] T. W. Hänsch, Rev. Mod. Phys. **78**, 1297 (2006).
- [3] C. W. Chou *et al.*, Phys. Rev. Lett. **104**, 070802 (2010).
- [4] M. Takamoto *et al.*, Nature **435**, 321 (2005).

전이선의 두 에너지준위가 같은 값만큼 변화되어 시계전이선의 주파수에는 변화가 없다는 제안 및 계산결과를 발표하면서 광격자 시계의 본격적인 개발이 시작되었다.^[5,6] 이 파장을 마법 파장(magic wavelength)이라 부르는데 이터븀 원자의 경우 약 759 nm이다. 현재 스트론튬, 이터븀, 마그네슘, 칼슘, 수은 광격자 시계가 연구되고 있으며 보고된 가장 작은 불확도의 광격자 시계는 스트론튬 원자를 이용한 것으로 1.5×10^{-16} 의 불확도가 보고되었다.^[7] 광격자 시계는 수천 개에서 수만 개 정도의 원자를 동시에 포획할 수 있으므로 마치 같은 수의 이온 포획과 같은 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대되었다. 즉, 이온 시계에 비해 신호대 잡음비를 크게 향상시킬 수 있다는 것이다. 실제로는 광포획의 특성상 포획지속시간이 이온포획에 비해 매우 짧아 원자개수에 비례하여 향상되지는 않지만 이온 시계에 비해 통계불확도는 더 우수한 것으로 보고되고 있다. 현재 한국표준과학연구원의 광격자연구팀에서는 이터븀을 이용한 광격자 시계를 개발 중에 있다. 형성된 광격자에 원자를 포획하기 위해서는 광격자 퍼텐셜보다 낮은 에너지를 가지도록 원자를 포획하고 냉각하여야 한다. 이터븀원자의 경우 포획을 위하여 아르곤 레이저로 펌핑된 Ti:Sapphire 레이저를 사용한다. 레이저의 세기가 1 W, 초점의 지름이 약 30 μm 일 때 퍼텐셜의 깊이를 온도로 환산하면 약 70 μK 에 해당한다. 약 700 K의 오븐에서 발생하는 원자를 수십 μK 수준으로 냉각하기 위해서는 두 단계에 걸쳐서 원자를 냉각시켜야 한다. 먼저 399 nm 파장의 다이오드 레이저로 1차 자기광포획을 하여 mK 수준으로 온도를 낮춘다. 2단계로 1112 nm 다이오드 레이저를 MgO 도핑 PPLN(Periodically Poled Lithium Niobate)으로 체배하여 얻은 556 nm 파장의 레이저로 2차 냉각하면 약 30 μK 까지 온도를 낮출 수 있다. 포획의 효율을 높이기 위해서는 자기장을 적절히 변화시켜야 한다. 본 연구팀에서는 수천 개의 원자를 일차원 광격자에 포획하는데 성공하였다.

초미세선폭 레이저

적절한 퍼텐셜에 잡혀 도플러효과가 제거된 원자가 준비되었다면 시계 전이선에 맞는 레이저(이하 프로브 레이저)를 입사하여 들뜬 원자의 수가 가장 커지도록 레이저의 주파수를 유지하는 되먹임을 하여야 한다. 시계전이선의 자연선폭이 10 mHz 수준으로 매우 작으므로 프로브 레이저의 선폭이 광시계의 안정도를 결정한다. 따라서, 원자의 시계전이선에 안정화되기 전에 프로브 레이저의 시간영역에서의 주파수요동을 최소화하는 즉, 주파수영역에서 선폭을 최소화하는 것이 필수적이다. 이를 위해서는 초공진기(finesse 200,000 이상,

Fig. 3. Super-cavity supported by in-vacuum structure.

반사율 0.99999 수준)에 레이저를 먼저 안정화해야 한다. 따라서 초공진기의 핵심 조건은 공진기 길이 변동이 최소화되어야 한다는 것이다. 본 연구팀에서는 그림 3에 나타난 것처럼 온도에 의한 길이변동이 매우 작은 ULE(Ultra Low Expansion) 유리 재질로 만들어진 길이 약 10 cm의 초공진기를 사용하고 있다. 프로브레이저의 선폭을 Hz 이하로 안정화하기 위해서는 초공진기의 길이변동이 1펨토미터(fm) 이하로 안정화되어야 한다. 즉, 공진기의 길이변동이 원자핵 크기보다 작게 안정화되어야 한다는 것이다. 따라서 길이 변동을 일으키는 모든 요소들-온도, 진동, 음향 등-을 최소화해야 한다. 온도를 유지하기 위해 초공진기를 삼중 원통형 온도 안정화 층구조 속에 넣고 전체를 약 10^{-7} torr 진공조속에 설치하여 온도변화폭을 1 mK 이하로 안정화시킨다. 진공조는 무진동 테이블 위에 설치하여 바닥을 통해 전달되는 진동을 최소화하고 진공조와 무진동 테이블은 방음 상자에 설치하여 음향진동 영향을 제거한다. 본 연구팀에서는 두 가지 방법으로 초미세선폭레이저를 개발하고 있다. 1156 nm 다이오드 레이저를 PPLN을 이용한 이차조화파 발생 방식으로 578 nm 레이저를 얻거나 1319 nm Nd:YAG 레이저와 1030 nm Yb:fiber 레이저의 합주파수를 PPLN으로 얻는 방법이다. 본 연구팀에서는 합주파수 방식으로 프로브레이저를 발생시켜 Pound-Drever-Hall 방식으로 초공진기에 안정화하는데 성공하였다. Cavity ringdown 방식으로 측정된 초공진기의 finesse는 380,000이며 선폭은 수십 Hz 수준으로 추정된다.

REFERENCES

- [5] H. Katori, Proc. Symp. Freq. Stds. Metrology, 323 (2002).
- [6] H. Katori *et al.*, Phys. Rev. Lett. **91**, 173005 (2003).
- [7] A. D. Ludlow *et al.*, Science **319**, 1805 (2008).

정확한 선폭은 비슷한 성능을 가지는 이차조화파 방식 레이저와의 비교를 통해 측정할 예정이다.

광주파수 빔

펄스모드 레이저는 시간 영역에서 지속 시간 펄스초 수준의 레이저 펄스를 발생시킨다. 보다 자세한 내용은 참고문헌 [2]에 나타나 있으므로 원리에 대한 간단한 소개와 광시계 구성에서의 역할에 대해서만 설명하고자 한다. 시간영역에서의 펄스모드 레이저는 주파수영역에서는 일정한 간격의 주파수성분이 마치 빗처럼 나열된 모양으로 나타나게 된다. 시간영역에서는 짧은 지속시간을 이용한 펄스모드 시분해분광 등에 응용되어 많은 성과를 이루었다. 하지만 John L. Hall과 Theodor W. Hänsch의 선구적 연구로 주파수영역에서의 일정한 간격의 모든 주파수성분들을 절대 주파수값을 가지도록 안정화할 수 있게 되면서 주파수측정분야, 특히 광주파수측정 분야에서 유래 없는 성과를 나타내게 되었다. 광주파수 빔이 등장하기 전에 광주파수 영역의 절대주파수를 측정하기 위해서는 세슘에 의해 소급성을 가지는 마이크로파 주파수로부터 광주파수까지 매우 긴 주파수체배 과정을 거쳐야 했다. 체배 과정 하나하나마다 체배 및 위상안정화를 위한 엄청난 장비와 기술들이 동원되어 전체 시스템의 크기가 건물 두 층에 이르기까지 하였다. 하지만 광주파수 빔은 1 평방미터 정도의 광테이블 위에서 훨씬 정밀하게 광주파수를 측정할 수 있는 획기적인 장비이다.

눈금자로 어떤 대상의 길이를 측정할 때 눈금자를 사물과 비교하여 가장 가까운 눈금과의 차이를 측정하게 된다. 마찬가지로 어떤 레이저의 광주파수를 절대측정하고자 한다면 광주파수 빔과 비교하면 된다. 가장 간단한 방법은 측정하려는 레이저와 광주파수 빔을 발생시키는 펄스모드 레이저를 동시에 광다이오드에 입사하여 발생하는 맥놀이 주파수를 측정하는 것이다. 맥놀이 주파수 중 가장 작은 값은 레이저의 광주파수와 가장 가까운 광주파수 빔의 모드와의 주파수 차이값을 나타낸다.

광주파수의 절대값을 측정하려면 광주파수 빔 모드가 기준 주파수에 안정화되어야 한다. 그림 4에 나타난 것처럼 광주파수 빔의 모든 모드의 주파수는 단지 두 개의 변수에 의해 결정되므로 이 두 변수만 안정화하면 된다. f_r 는 펄스의 반복율이며 f_{CE} 는 carrier envelope offset 주파수로 펄스의 군속도와 위상속도의 차이로 인해 펄스의 정점과 위상의 정점이 일정한 속도로 달라지면서 생긴다. f_r 은 인접한 모드간의 맥놀이 주파수로 광다이오드로 쉽게 측정 및 안정화가 가능하며 f_{CE} 는 한 옥타브 이상의 스펙트럼폭을 가지게 만들어 낮은 주파

Fig. 4. Scheme of femtosecond laser frequency comb synthesizer.^[2]

수 부분을 체배하여 높은 주파수 영역과 맥놀이를 일으키는 self-referencing 방법으로 측정하여 안정화할 수 있다. 광주파수 빔을 안정화하는 데는 두 가지 방법이 있다. 하나는 f_r 과 f_{CE} 를 마이크로파 주파수표준기에 안정화하는 것이고 다른 방법은 광주파수 빔의 광주파수 영역의 한 모드를 광주파수표준기에 안정화하고 f_{CE} 를 self-referencing 방법으로 안정화하는 것이다. 전자의 경우 마이크로파 주파수표준기의 잡음이 광주파수 영역에까지 비례하여 전파된다는 단점이 있는 반면 후자의 방법은 광주파수표준기의 높은 안정도가 잡음성분의 비례 증가 없이 마이크로파 영역까지 전파된다는 강력한 장점이 있다. 이러한 광시계방식으로 안정화할 경우 각 모드가 어느 정도로 안정화되는지는 동일한 광주파수표준기에 안정화된 두 광주파수 빔의 모드를 광헤테로다인 방식으로 측정하면 알 수 있다. 최근의 연구에 따르면 측정된 안정도는 1 초 적분시간에 2×10^{-17} , 수천 초 적분시간에 10^{-19} 에 이르는 것으로 보고되었다.^[8] 한편 마이크로파 주파수를 단순히 광다이오드로 추출할 경우 광검출과정에서 증폭기 잡음, 세기-위상 전환 잡음 등의 여러 가지 요인이 추가되어 마이크로파 주파수의 안정도는 저하된다. 10 GHz 주파수를 1초 적분시간에 6.5×10^{-16} 까지 추출한 결과가 보고되었다.^[9] 최근에는 광다이오드의 잡음요인을 피하기 위해 balanced optical-microwave phase detector를 사용 광주파수영역에서 직접 위상을 측정하여 펄스 타이밍을 안정화하는 방식으로 10시간 적분시간에 1.9×10^{-19} 의 주파수 안정도가 추정되는 결과가 발표되었다.^[10]

REFERENCES

- [8] L.-S. Ma *et al.*, IEEE J. Quantum Electron. **43**, 139 (2007).
- [9] A. Bartels *et al.*, Opt. Lett. **30**, 667 (2005).

Table 1. Optical secondary representations of the second as ratified by the CIPM in 2006.

Ion or atom	Clock transition	Frequency (Hz)	Fractional uncertainty
$^{199}\text{Hg}^+$	$5d^{10}6s^2S_{1/2}-5d^96s^2D_{5/2}$	1 064 721 609 899 145	3×10^{-15}
$^{88}\text{Sr}^+$	$5s^2S_{1/2}-4d^2D_{5/2}$	444 779 044 095 484	7×10^{-15}
$^{171}\text{Yb}^+$	$6s^2S_{1/2}-5d^2D_{3/2}$	688 358 979 309 308	9×10^{-15}
^{87}Sr	$5s^2^1S_0-5s5p^3P_0$	429 228 004 229 877	1.5×10^{-14}

광시계의 응용

광시계는 초의 정의를 구현할 뿐 아니라 극한의 정밀 측정 및 시간/주파수 동기, 양자컴퓨팅 응용 등 다양한 분야에서 활용되고 있다.

1. 초의 정의 구현

주파수는 어떤 다른 물리량보다 정확하게 측정이 가능한 물리량으로 국제단위계 소급성에서 중요한 위치를 차지하고 있다. 따라서 측정하고자 하는 물리량을 주파수로 환산할 수 있다면 높은 정확도의 측정이 가능한데 대표적인 예가 1983년에 정의된 길이단위이다. 길이단위는 빛의 속도를 기본상수 값으로 정한 후 빛이 진공중에 일정시간 동안 달린 거리로 정의되었다. 따라서 파장은 주파수와 동일한 정확도로 변환될 수 있는 물리량이 되었다. 현재 초의 정의는 세슘원자의 고유 진동수로 정의되어 있으나 광시계의 정확도가 이미 현존 최고의 세슘원자시계의 정확도를 능가하였다. 이를 반영하여 국제도량형 총회에서는 초의 2차 정의 목록에 스트론튬, 수은, 이터븀의 세 가지 이온과 스트론튬 중성원자를 등록하였다(표 1 참조). 2차 정의라는 표현에는 현재의 정의 아래에서는 2차 정의이지만 향후 재정의에 유력한 이온 및 원자라는 의미가 내포되어 있다. 따라서 언젠가는 원자의 광주파수로 초의 재정의가 이루어질 것으로 여겨지고 있지만 현재로서는 광격자 시계와 이온 시계 중 어떤 방식이 최종적으로 채택될지, 그리고 어떤 원자 또는 이온으로 결정될지는 미지수다. 따라서 전 세계 주요 국가표준기관에서는 다양한 원자와 이온을 이용한 광시계 개발을 위해 치열한 경쟁을 벌이고 있다. 심지어 미국의 NIST, 프랑스의 SYRTE, 독일 PTB, 영국 NPL 등에서는 광격자 시계와 이온 시계를 동시에 개발하며 차세대 초의 재정의에 대비하고 있다. 실제로 초의 재정의가 이루어지기 위해서는 여러 가지 선결 조건이 있지만 과학적으로 가장 중요한 과제는 현재의 정의 안에서 후보 이온 및 원자의 시계전이선 주파수를 정확하게 절대측정하는 것이다. 주파수 절대측정값이 공식적으로 받아들여져 초의 2차 정의에 등록

되기 위해서는 한 기관의 측정값이 아니라 여러 기관에서 독립적으로 측정한 값들이 불확도 범위 안에서 일치해야 한다. 현재 중성원자의 경우 스트론튬 원자의 시계전이선 주파수 값만이 등록되어 있으나 미국의 NIST, 일본의 NMIJ 그리고 본 연구팀이 독립적으로 이터븀 원자의 시계전이선 주파수 측정 및 비교 연구를 진행하고 있으며 다음 총회에서 이터븀 원자가 2차 정의에 등록될 수 있도록 노력 중에 있다.

2. 물리법칙의 검증

광시계 개발로 인한 비약적인 정확도 향상은 기본 물리법칙을 검증할 수 있는 능력 또한 비약적으로 향상시켰다. 대표적인 예가 아인슈타인의 상대성이론 검증 시도이다. 일반상대성이론에 의하면 중력효과가 배제된 실험은 시간적 공간적인 어떤 지점에서 행하더라도 같은 결과를 나타낸다. 이를 국소 위치불변(Local Position Invariance)의 법칙이라 부른다. 이에 따르면 물리상수값은 시간에 따라 불변해야 한다. 이를 검증하기 위하여 단위계의 영향을 받지 않는 차원이 없는 상수인 미세구조상수의 시간적 변화를 측정하기 위한 시도가 다양한 분야에서 이루어져 왔다. 대표적인 방법은 원자의 에너지 준위의 변화를 측정하는 것이다. 원자의 에너지준위는 미세구조상수의 함수인데 원자에 따라 달라진다. 따라서 미세구조상수가 변하면 서로 다른 원자는 서로 다른 에너지 준위 변화를 겪게 되므로 한 원자의 에너지 준위를 기준으로 다른 원자의 에너지준위를 측정하여 변화가 있다면 미세구조상수는 변하고 있는 것이다. 천문학에서는 우주 멀리 존재하는 퀘이서로부터 발생된 빛의 스펙트럼을 통해 이 변화를 측정하는 연구가 이루어져 왔다. 퀘이서로부터의 빛은 수광년을 걸쳐 지구에 도달하므로 이 기간 동안 미세구조상수의 변화가 있다면 분광선에 그 결과가 나타나게 된다. 하지만 천문학적 방식의 연구는 연구 그룹에 따라 결과들이 다르게 나타나면서 신뢰성에 의문을 가지게 되었다. 광시계를 이용하는 경우 수년에 걸쳐 서로 다른 두 광시계의 시계전이선을 비교하여 미세구조상수값의 변화를 추적해왔다. 현재 가장 불확도가 낮은 결과는 미국 NIST에서 알루미늄 이온 시계와 수은 이온 시계를 상호비교하여 측정한 것으로 미세구조상수값은 불확도 $2.3 \times 10^{-17}/\text{년}$ 이하에서 변화가 없는 것으로 나타났다.^[11] 다양한 종류의 광시계가 개발되고 있고 정확도 또한 향상됨에 따라 머지않아 훨씬 낮은 불확도로 미세구조상수의 변화를 측정할 수 있을 것으로 기대되고 있다.

REFERENCES

- [10] J. Kim *et al.*, Nature Photonics **2**, 733 (2008).
- [11] T. Rosenband *et al.*, Science **319**, 1808 (2008).

Fig. 5. General concept of the EGE mission. Clocks on the satellite and on ground are intercompared as the satellite orbits the Earth on a highly elliptical orbit.^[13]

국소위치불변법칙을 검증하는 또 다른 방식은 중력에 의한 적색이동을 측정하는 것이다. 광시계를 이용한 적색이동 측정은 동일한 원자를 이용한 광시계를 서로 다른 크기의 중력장에 위치시킨 후 주파수를 비교함으로써 이루어진다. 일반상대성이론에 따르면 중력이 클수록(작을수록) 시계는 느리게(빠르게) 가게 된다. 만약 서로 다른 중력장에 위치한 두 광시계의 주파수변화가 일반상대성이론에서 예측한 값과 차이가 난다면 국소위치불변법칙은 성립하지 않게 된다. 이 연구를 위해 위성 상 광시계를 탑재하여 지구에서 멀리 떨어진 궤도를 움직이게 하고 지구상의 광시계와 비교함으로써 중력에 의한 차이를 극대화하는 방법으로 검증하려는 시도가 이루어지고 있다.^[12,13]

3. 측지

중력에 의한 적색편이가 측정된다는 것은 측지학에서의 정밀 측정이 가능하다는 것을 뜻한다. 초의 정의가 지오이드 상에 존재하는 원자의 주파수로 정의되어 있으므로 각 국가에서 운용하고 있는 원자시계는 높이에 따른 보정을 수행해야 한다. 원자시계의 높이가 1미터 변하면 주파수는 1×10^{-16} 변한다. 따라서 1×10^{-18} 불확도의 광시계가 개발된다면 1 cm의 변화를 측정할 수 있게 된다. 이것은 현재 위성 데이터를 이용하여 측정되는 중력장 분포 결과보다 훨씬 정밀한 측정이 가능하다는 것이다. 시간 분해능까지 향상된다면 언젠가는 전지구적 대양의 흐름, 화산, 지진 등으로 인한 중력의 변화까지 측정하여 지구 환경에 대한 이해와 재난에 대한 경보가 가능할 것이라는 희망 섞인 관측을 하는 연구자들도 있다. 하지만 이를 위해서는 대륙에 걸쳐 멀리 떨어져 있는 광시계를

같은 정밀도로 비교할 수 있는 시각비교 연구의 발전이 필요하며 이를 위한 다양한 시도 또한 이루어지고 있다.

4. 기타

현재의 GPS 위성항법은 위성에 탑재된 마이크로파 원자시계를 이용하여 위치를 측정하고 있다. 차세대 위성항법 체계에서 광시계를 탑재한다면 시각측정능력은 그만큼 향상될 것이며 만약 다른 불확도 요인들 - 전리층 지연 측정 등 - 을 줄이는 연구가 이루어진다면 위치 측정 능력 또한 향상될 것이다. 이온 시계를 이용하여 미래의 양자컴퓨팅을 구현하려는 시도는 어떤 다른 방식보다 큰 가능성을 보여주고 있으며^[14] 광격자 시계를 이용한 양자컴퓨팅도 제안되고 있다.^[15] 한편 광파이버를 이용한 장단거리 시간주파수 동기 성능의 획기적 향상으로 전파망원경의 분해능 향상, 가속기 시설에서의 정밀 펄스-프로브 실험의 정밀도 개선 등도 이루어지고 있다.

결론

현재 초의 정의는 세슘원자의 고유진동수를 기준으로 정의되어 있으며 가장 정확한 세슘원자시계는 수천만 년에 1초도 틀리지 않을 만큼의 성능을 보여주고 있다. 하지만 원자 냉각 및 포획기술, 레이저 안정화 기술, 광주파수 빔 개발, 초고분해 분광의 발전 등으로 인해 원자의 광주파수에 기반한 광시계가 개발되고 있으며 이미 성능에 있어서 최고의 세슘원자시계를 능가하고 있다. 세계 각 나라의 광시계 연구그룹은 1×10^{-18} 의 정확도를 목표로 광시계 개발에 박차를 가하고 있다. 이것은 만약 빅뱅으로부터 현재까지 137억 년이 흘렀다는 것을 받아들인다면, 우주의 탄생으로부터 지금까지 1초도 틀리지 않는 시계가 개발 중에 있는 것이다. 어떤 다른 물리량에서도 구현하지 못한 극한의 주파수 정확도는 아인슈타인의 일반상대성 이론 등 기본 물리법칙을 검증하려는 근원적인 기초 연구에서부터 광시계를 이용한 정밀 측지, 중력장 변화 측정, 보다 정밀한 위성 항법에의 응용, 양자컴퓨팅의 실현, 초정밀 시각 동기 등에 이르기까지 다양한 차원에서 근본적인 영향을 주게 될 것이다.

REFERENCES

- [12] <http://www.spaceopticalclocks.org/>.
- [13] S. Schiller *et al.*, *Exp. Astron.* **23**, 573 (2009).
- [14] D. Hanneke *et al.*, *Nature Physics* **6**, 13 (2010).
- [15] A. J. Daley *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 170504 (2008).