Optical Clocks

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

Atomic transition frequencies have become the most accurately-measured physical quantities, which have led to the second being defined based on the hyperfine transition frequency of ^{133}Cs since 1967. Recently, optical clocks based on the narrow optical transitions of a single ion in a Paul trap or neutral atoms in an optical lattice have shown their capabilities to surpass the best microwave clocks, and some of them have already reached uncertainty levels below 10^{-17} . Optical clocks, due to their ultimate accuracy, will serve not only to provide a new definition of the second but also to probe temporal variations of fundamental constants such as the fine structure constant and of the couplings of fundamental constants to forces like gravity. In this paper the fundamental aspects and current performance of optical clocks are reviewed.

‘시간’은 우리에게 가장 익숙한 개념 중의 하나이다. 하지만 또 한편으로는 가장 설명하기 힘든 개념이기도 하다. 원자시계 연구자들은 ‘시간’ 자체의 의미에 대한 탐구가 아니라 ‘시간 척도’를 정확하게 생성하거나 측정하는 연구를 하고 있다. 과거 천체의 운동을 기준으로 시간을 가늠하며 살 때 시간 표준은 천문 관측을 통해 알 수 있었다. 하지만 지구의 자전 및 공전 속도가 시간이 흐름에 따라 조금씩 달라지고 있다는 것이 알려지면서 1967년 이후부터는 세슘 원자의 고유 진동수를 기준

저자약력

유대혁 박사는 서울대학교 박사(2000)로 현재 한국표준과학연구원 시간센터장으로 재직 중이다. 미국 국립표준기술연구원(NIST) 객원연구원(2005-2006)을 거쳐 2008년부터 이터븀 광격자 시계 개발 연구 책임을 맡고 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 한국표준과학연구원에 재직 중이며 이터븀 광격자 시계 개발 연구를 하고 있다. (oneqlee@kriss.re.kr)

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

으로 시간 단위를 정의하여 사용해왔다. 천문이 아닌 원자 고 유진동수에 기초한 ‘원자시’가 시간 단위의 표준으로 등장하게 된 것이다. 현재 초(second)의 정의는 “세슘-133원자(^{133}Cs)의 바닥상태에 있는 두 초미세 준위간의 전이에 대응하는 복사선의 9 192 631 770 주기의 지속시간”이다. 따라서 현재 가장 정확한 시계는 세슘원자시계로 $2 \sim 3 \times 10^{-16}$ 수준의 불확도를 나타낸다. 이 값은 1억 년에 1초도 틀리지 않는 값이다.^[1]

많은 사람들은 왜 이렇게까지 정확한 시계가 필요한지 의문을 가지기도 한다. 일상을 살아가면서 우리가 경험하고 필요로 하는 시간의 정확도는 그리 크지 않아 보이기 때문이다. 하지만 우리가 사용하는 인터넷과 휴대폰이 제대로 동작하기 위해서는 훨씬 더 정확한 시계가 관련 시스템을 동기시켜야 하며 네비게이션 장비는 인공위성에 장착된 정밀 원자시계가 없다면 작동이 불가능하다.

원자시계는 고유진동수를 가진 원자의 시계 전이선, 주파수 발생기, 주파수를 측정하는 주파수계수기로 이루어져 있다(그림 1). 주기적인 변화를 일으키는 현상이 있으면 이를 이용하여 시계를 만들 수 있다. 하지만 표준이 되기 위해서는 누가 만들어도 일정 불확도 내에서 같은 시간/주파수를 나타내어야 한다. 표준으로 정의된 원자의 고유진동수를 기준으로 삼아 주파수발생기의 주파수를 일치시키면 표준을 구현한 원자시계가 된다.

REFERENCES

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

Fig. 2. Fractional frequency uncertainties atomic clocks based on microwave (Cs clocks) and optical transitions.^[2]

현재 세슘원자시계는 마이크로파 주파수 발생기의 출력을 세슘 원자의 약 9.2 GHz의 전이선에 일치시킴으로써 만들어진다. 이에 비해 광시계는 광주파수 영역의 고안정도 레이저 출력을 원자나 이온의 수백 THz에 해당하는 광주파수 전이선에 일치시켜 만들어진다. 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.

그림 2에 다양한 마이크로파 원자시계와 광시계의 불확도가 어떻게 개선되어 왔는지 나타나있다. 그림에 나타난 것처럼 광주파수 빛의 개발 이후로 마이크로파 원자시계에 비해 광시계의 발전 속도가 훨씬 빠르며 최근 세슘원자시계의 성능을 능가하였을 뿐 아니라, 알루미늄 이온 시계와 스트론튬 광격자 시계는 10^{-18} 수준의 불확도에 도달하였다.

원자의 고유진동수를 기준주파수로 사용해야 하는 원자시계는 고유진동수를 변화시키는 요인을 제거하거나 제거할 수 없다면 그 변화값을 정확히 평가해야 한다. 고유진동수 변화의 가장 큰 요인은 원자의 운동에 의한 도플러 이동이다. 이를 제거하는 방법에 따라 두 가지 방식의 광시계가 존재한다.

그 중 하나인 이온 시계는 이온의 움직임을 제한하고 포획하기 위해 Paul trap을 이용한다(그림 3). 정전기장에는 퍼텐셜 최저점이 존재하지 않으므로 안정점 퍼텐셜을 생성한 후 MHz 수준의 주파수로 endcap과 ring의 양극과 음극을 교환하여 포획한다. 냉각 및 상태검출용 전이선을 이용해 이온을 냉각시켜 바닥상태에 준비한 후 시계전이선 레이저를 가하여 전이를 일으킨다. 이후 다시 냉각 및 상태검출용 레이저를 가하여 전이 상태를 측정한다. 이온이 들뜬상태로 여기되어 바닥상태에 이온이 없다면 형광신호가 보이지 않고 바닥상태에 존재한다면 형광신호가 나타난다. 그림 3에 나타난 것처럼 시계전

Fig. 3. Schematic of the Paul trap for single Hg^+ ion clock. The relevant Hg^+ energy levels are indicated, including the narrow $2S_{1/2} \rightarrow 2D_{5/2}$ "optical clock" transition. The data in the upper right-hand part of the figure show the number of 194 nm fluorescence photons detected in 10 ms detection bins vs time when both transitions are excited simultaneously.^[3]

이선 레이저를 가한 총 시간에 대해 형광신호가 검출되지 않은 횟수를 통계 처리하면 레이저와 전이선의 일치도를 알 수 있다. 이 정보를 바탕으로 적절한 알고리즘에 따라 시계 전이선 레이저에 되먹임을 주어 레이저의 주파수를 원자의 고유진동수와 일치시킨다. 이온 시계는 포획 지속 시간이 길어 긴 시간 연속 측정이 가능하다. 오랜 시간 측정하여 불확정성의 원리에 의한 에너지 불확도, 즉 주파수 측정 불확도를 낮추고 시계의 정확도를 높게 된다.

현재 이온 시계는 수은, 이터븀, 스트론튬, 인듐, 칼슘, 알루미늄 이온 등을 이용하여 미국 NIST, 독일 PTB, 영국 NPL, 일본 NICT 등에서 연구가 이루어지고 있다.

표 1에 현재 개발 중인 다양한 이온 시계의 불확도가 나타나 있다. 수은, 인듐, 알루미늄의 경우 냉각 및 상태검출용의 강한 전이선의 파장은 각각 194 nm, 159 nm, 167 nm의 극자외선 영역이다. 인듐의 경우 159 nm 레이저 개발의 어려움으로 인해 230.6 nm의 훨씬 약한 전이선을 냉각에 이용하고 있으며 수은의 경우 두 대의 레이저와 2차 조화파 및 합주파수 발생을 이용하는 복잡한 과정을 거쳐 194 nm의 레이저를 얻고 있다.

Wineland 팀은 그림 3처럼 하나의 이온에서 두 종류의 전이선을 모두 이용하지 않고 냉각 및 상태 검출과 시계 전이선

REFERENCES

- [2] N. Poli *et al.*, La rivista del Nuovo Cimento **36**, 555 (2013).
- [3] D. J. Wineland, Rev. Mod. Phys. **85**, 1103 (2013).

Table 1. Systematic uncertainties for various ion clocks.^[2]

Ion	Nuclear spin	λ_{cool} (nm)	Clock trans.	λ_{clock} (nm)	Natural linewidth $\Delta\nu$ (Hz)	obs. linewidth $\Delta\nu_{\text{obs}}$ (Hz)	rel. uncertainty
$^{27}\text{Al}^+$	5/2	279.5 ($^{25}\text{Mg}^+$)	$^1\text{S}_0$ - $^3\text{P}_0$	267	0.008	2.7	8.6×10^{-18}
$^{40}\text{Ca}^+$	7/2	397	$^2\text{S}_{1/2}$ - $^2\text{D}_{5/2}$	729	0.2	30	2.4×10^{-15}
$^{88}\text{Sr}^+$	0	422	$^2\text{S}_{1/2}$ - $^2\text{D}_{5/2}$	674	0.4	5	2.1×10^{-17}
$^{115}\text{In}^+$	9/2	231	$^1\text{S}_0$ - $^3\text{P}_0$	236	0.8	43	2×10^{-13}
$^{171}\text{Yb}^+$ (oct.)	1/2	370	$^2\text{S}_{1/2}$ - $^2\text{F}_{7/2}$	467	10^{-9}	7	7.1×10^{-17}
$^{171}\text{Yb}^+$ (quad.)	1/2	370	$^2\text{S}_{1/2}$ - $^2\text{D}_{3/2}$	436	3.1	10	4.5×10^{-16}
$^{199}\text{Hg}^+$	1/2	194	$^2\text{S}_{1/2}$ - $^2\text{D}_{5/2}$	282	1.7	6.7	1.9×10^{-17}

을 서로 다른 이온을 이용하여 구현함으로써 세계 최초로 10^{-18} 수준 (8.6×10^{-18})의 불확도를 가지는 이온 시계 개발에 성공하였으며 이 값은 약 37억 년 동안 1초 정도밖에 틀리지 않는 정확도이다.^[4] 좀 더 자세한 내용은 참고문헌 [5]에서 다루었으므로 간략한 원리만 설명하면 아래와 같다. 두 이온을 동시에 이온 트랩에 포획하면 두 이온은 동일한 이온 포획에 놓여 근거리에서 강한 쿨롱(Coulomb) 힘에 의해 같은 모드로 진동하게 된다. 하나의 이온을 냉각하게 되면 상호 작용을 통해 다른 이온도 함께 냉각이 이루어진다. Wineland 팀의 알루미늄 이온 시계는 선형 이온 트랩에 알루미늄과 베릴륨(Be)을 함께 포획하고 알루미늄 대신 베릴륨 이온을 냉각하여 최종적으로 알루미늄 이온을 냉각시킨다. 알루미늄 이온 냉각을 위한 167 nm 레이저를 개발하는 대신 베릴륨 이온을 313 nm 레이저로 냉각하여 결국 알루미늄 이온이 함께 냉각되는 ‘sympathetic cooling’을 이용하는 것이다. 냉각뿐 아니라 상태 검출을 위해서도 유사한 원리가 적용된다. 시계 전이선 레이저를 가한 후 알루미늄 이온의 들뜬 상태를 검출하기 위해서는 알루미늄 이온의 내부 전자 에너지 상태를 운동 에너지, 즉 포획된 원자의 진동 에너지 상태로 전이시킨다. 이때 진동 상태를 공유하고 있는 베릴륨 이온에도 알루미늄 이온의 진동 에너지 상태, 즉 내부 전자 에너지 상태가 전달되고, 결국 베릴륨 이온의 들뜬 상태를 검출함으로써 알루미늄 이온의 들뜬 상태를 읽을 수 있게 되는 것이다. 최근 인듐 이온에 대해서도 같은 원리를 이용한 이온 시계 개발이 진행 중이다. 인듐 이온과 칼슘 이온 또는 카드뮴 이온을 함께 포획하여 알루미늄 이온 시계 수준 이상의 이온 시계를 개발하려는 것이다.

또 다른 방식의 광시계는 중성원자를 이용하는 광격자 시계이다. 중성원자는 전하를 가지지 않으므로 이온 시계처럼 전기장으로 포획할 수 없다. 따라서 레이저를 이용한 레이저 쌍극자포획방식을 이용한다. 레이저 쌍극자포획은 강한 레이저광에 의해 원자에 유도 쌍극자모멘트가 생성되고 이 유도 쌍극자모멘트가 레이저와 상호작용하여 퍼텐셜의 최저점에 원자가 포획되는 현상이다. 적색(청색)이동 레이저를 가하면 원자들은 레이

Fig. 4. Counter-propagating lasers create a lattice potential that confines atoms in a region much smaller than the optical wavelength.^[6]

저 세기가 가장 큰(작은) 곳에 잡히게 된다. 이 방식으로 원자를 포획하면서 원자의 움직임을 없애기 위해서는 레이저를 서로 반대방향으로 입사하여 정상파를 만들어야 한다. 그림 4에 나타난 것처럼 정상파의 주기는 레이저 파장의 절반에 해당되므로 원자는 레이저 파장의 절반 길이 내에 잡혀있게 된다. 1차원으로만 생성할 경우 레이저 진행방향에 수직인 방향으로 여전히 레이저 파장보다 긴 움직임이 존재하지만 전이를 일으키는 레이저를 광격자를 형성하는 레이저와 같은 방향으로 정렬하면 이러한 효과를 최소화시킬 수 있다. 레이저로 형성된 격자에 원자가 갇혀있게 되므로 광격자 시계라 불린다. 하지만 레이저에 의해 원자의 에너지준위가 변하게 되므로 광시계로 활용되지 못했으나 2002년과 2003년 동경대의 가토리 교수가 포획 레이저의 파장을 적절히 선택하면 시계전이선의 두 에너지준위가 같은 값만큼 변화되어 시계전이선의 주파수에는 변화가 없다는 것을 발견하면서 광격자 시계가 본격적으로 개발되

REFERENCES

- [4] C. W Chou *et al.*, Phys. Rev. Lett. **104**, 070802 (2010).
- [5] T. Y. Kwon and D.-H. Yu, Physics and High Technology **21**(12), 25 (2012).
- [6] M. Takamoto *et al.*, Nature **435**, 321 (2005).

Table 2. Systematic uncertainties for various optical lattice clocks.^[2]

Atom	Nuclear spin	λ_{cool} (nm)	Clock trans.	λ_{clock} (nm)	$\Delta\nu_{\text{nat}} (\Delta\nu_{\text{obs}})$	rel. uncertainty
^1H	1/2	-	$1S - 2S$	243 (2-ph.)	1.3 Hz (2 kHz)	4.2×10^{-15}
^{24}Mg	0	285	$^2S_0 - ^3P_1$	457	30 Hz (290 Hz)	7×10^{-14}
^{40}Ca	0	432, 657	$^1S_0 - ^3P_1$	657	375 Hz (250 Hz)	4.2×10^{-15}
^{87}Sr	9/2	461, 689	$^1S_0 - ^3P_0$	698	1 mHz (0.5 Hz)	6×10^{-18}
^{88}Sr	0	461, 689	$^1S_0 - ^3P_1$	689	7.6 kHz (14.5 kHz)	2.3×10^{-11}
			$^1S_0 - ^3P_0$	698	≈ 0 Hz (8 Hz)	2.9×10^{-15}
^{171}Yb	1/2	399, 556	$^1S_0 - ^3P_0$	578	10 mHz (1 Hz)	3.6×10^{-16}
^{173}Yb	5/2	399, 556	$^1S_0 - ^3P_0$	578	10 mHz (150 kHz)	8.5×10^{-11}
^{174}Yb	0	399, 556	$^1S_0 - ^3P_0$	578	≈ 0 Hz (4 Hz)	1.5×10^{-15}
^{199}Hg	1/2	254	$^1S_0 - ^3P_0$	265.6	100 mHz (11 Hz)	5.7×10^{-15}

기 시작하였다.^[7,8] 이 파장을 마법 파장(magic wavelength)이라 부르며 이터븀 원자의 경우 약 759 nm이다. 현재 스트론튬, 이터븀, 마그네슘, 칼슘, 수은 광격자 시계가 연구되고 있다. 광격자 시계는 수천 개에서 수만 개 정도의 원자를 동시에 포획할 수 있으므로 마치 같은 수의 이온 시계를 동시에 동작 시키는 것과 같은 효과를 얻을 수 있을 것으로 여겨졌다. 실제로는 광포획의 지속시간이 이온 포획에 비해 매우 짧아 원자 개수에 정비례하여 향상되지는 않지만 신호대 잡음비가 우수하여 훨씬 짧은 시간에 이온 시계의 안정도를 나타낸다는 것이 보고되고 있다.

표 2에 다양한 중성원자를 이용한 광격자시계의 불확도가 나타나 있다. 표 1의 이온 시계들의 경우 몇 가지 이온 시계가 이미 10^{-17} 수준 이하의 불확도를 달성하였으나 광격자 시계의 경우 미국 JILA의 스트론튬 광격자 시계만이 10^{-18} 수준의 불확도 개발을 보고하였는데 이온 시계를 포함한 모든 광시계 중 최고의 불확도를 달성한 것이다.^[9]

왜 이온 시계보다 더 많은 원자를 이용하여 성능이 우수할 것으로 기대된 광격자 시계 중에 10^{-17} 이하 불확도 수준을 기록한 시계가 단 하나일까? 연구 역사가 상대적으로 짧은 것 말고도 결정적인 이유가 있다.

광격자 시계와 이온 시계는 매우 다른 특성을 가지고 있다. 광격자 시계는 다수(약 10^4 개)의 원자를 광격자로 포획하지만 이온 시계는 하나의 이온을 Paul trap을 이용하여 포획한다. 또한 에너지 준위들도 다양하다. 따라서 시계 전이선의 주파수를 변하게 만드는 주요 요인들도 다르다.

표 3에 다양한 중성원자와 이온들이 1 K의 불확도로 300 K의 온도 환경에 놓여 있을 때 계산된 흑체 복사에 의한 주파수 이동과 불확도를 나타내었다. 표에 나타난 것처럼 알루미늄 이온 시계의 경우 높은 주파수의 에너지 준위를 가지고 있으므로 흑체 복사에 의한 시계 전이선 주파수 이동이 매우 작아

Table 3. Calculated BBR shift at T=300 K with a temperature uncertainty of 1 K for various neutral atoms and ions.^[2]

Atom / Ion	$ \Delta\nu_{\text{BBR}}/\nu_0 $	rel. uncertainty
Mg	3.9×10^{-16}	1.6×10^{-17}
Ca	2.6×10^{-15}	7.2×10^{-17}
Sr	5.5×10^{-15}	1.4×10^{-16}
Yb	2.6×10^{-15}	2.9×10^{-16}
Hg	1.6×10^{-16}	5×10^{-18}
Al^+	8×10^{-18}	3×10^{-18}
In^+	1.36×10^{-17}	1.6×10^{-18}
Sr^+	5.6×10^{-16}	2.2×10^{-17}
Yb^+ quad.	5.1×10^{-16}	2×10^{-17}
Yb^+ oct.	1.1×10^{-16}	5×10^{-17}

상온에서 1 K 정도 온도 변동이 있더라도 이로 인한 흑체복사 불확도는 10^{-18} 수준으로 매우 작다. 표 1에서 10^{-17} 수준 이하의 불확도를 달성한 이온 시계들 모두 흑체복사에 의한 불확도가 이미 10^{-17} 수준 이하임을 알 수 있다. 하지만 광격자 시계에 사용되는 이터븀, 스트론튬의 경우는 흑체 복사에 의한 영향을 상대적으로 매우 크게 받게 되므로 10^{-18} 수준으로 불확도를 낮추기 위해서는 흑체복사에 의한 주파수 이동 요인을 최소화하든지 정밀하게 평가해야만 한다. 전술한 것처럼 현재 광격자 시계에서 유일하게 그리고 모든 광시계 중 최고의 불확도를 달성한 미국 JILA 연구팀은 결정적으로 흑체복사에 의한 불확도를 획기적으로 줄임으로써 스트론튬 광격자 시계의 불확도와 안정도 모두 10^{-18} 수준으로 낮춘 결과를 얻는데 성공한 것이다. 발표된 스트론튬 광격자 시계의 불확도는 6.4×10^{-18} 으로 약 50억 년에 1초도 틀리지 않아 현재 모든 종류의

REFERENCES

- [7] H. Katori, Proc. Symp. Freq. Stds. Metrology, 323 (2002).
- [8] H. Katori *et al.*, Phys. Rev. Lett. **91**, 173005 (2003).
- [9] B. J. Bloom *et al.*, Nature **506**, 71 (2014)

Fig. 5. Characterizing BBR effects on the clock transition. a, A three-dimensional model of the clock vacuum chamber. The sensor mounted on an in-vacuum translator is depicted in its fully extended mode of operation. The entire clock chamber resides inside a BBR shielding box with an equilibrium temperature of 301 K. b, A photograph of the two glass tubes surrounding the trapped ^{87}Sr atoms (red arrow). The movable sensor (green arrow) has been retracted for its normal operation.^[9]

광시계 중 최고의 정확도를 보이고 있다. 이번 결과의 경우 특수한 진공조 구조 내에 흑체 복사의 영향을 직접 측정함으로써 흑체 복사에 의한 불확도를 낮출 수 있었다.

그림 5에는 JILA 연구팀이 흑체복사에 의한 불확도를 줄이기 위해 사용한 진공조 구조가 나타나있다. 흑체 복사 이론이 잘 정립되어 있으나 흑체 복사에 의한 원자 전이선의 주파수 이동을 정확히 측정하기 힘들게 만드는 요인은 크게 두 가지이다. 첫 번째는 흑체 복사는 원자마다 고유한 에너지 준위들이 달라서 원자별로 주요 전이선의 전이 세기 등의 파라미터값을 정확히 측정해야 한다는 것이며 두 번째는 주변 환경이 단일 온도의 흑체가 아니라는 데 있다. 전자에 의한 불확도를 줄이기 위해 최근 스트론튬과 이터븀의 경우 에너지 준위에 대한 정밀 이론 계산과 함께 주요 전이선 세기의 정밀 측정이 이루어짐으로써 두 번째 요인이 10^{-18} 불확도 달성의 걸림돌이 되어왔다. JILA 연구팀은 그림 5와 같은 진공조를 구성하여 이 문제를 해결하였다. 먼저 전체 진공조를 온도 안정화된 상자로 차폐하여 최대한 흑체 환경을 구성하였다. 이를 위해 레이저들은 파이버로 차폐 상자 내부로 이송하였다. 하지만 진공조의 다양한 부분들(진공조, 시창 등)은 서로 다른 온도 분포를 가지고 있다. 주변 온도 분포에 따라 실제 원자는 온도가 다른 여러 부분으로부터 발생한 복사선이 복합적으로 작용하게 된다. 단순히 진공조의 일부 온도를 측정하고 대략의 온도 분포만 적용해서는 실제 원자가 느끼는 온도값뿐 아니라 복사 스펙트럼도 알 수 없다. 즉, 정확하게 흑체 복사의 영향을 측정할 수 없게 되는 것이다. 이를 해결하기 위해 JILA 연구팀은 두 개의 복사 온도 탐침을 설치하였는데 하나는 원자 위치

서 2.54 cm 떨어진 곳에 고정하였고 다른 하나는 움직일 수 있도록 구성하였다. 원자시계 동작 전에 움직이는 탐침을 원자의 위치부터 고정 탐침 위치까지 움직여 온도 분포를 측정 한 후 실제 원자시계 동작 시에는 초록색 표시의 움직이는 탐침을 멀리 떨어뜨리고 고정 탐침으로만 온도를 실시간 측정한다. 이 결과는 모든 복사 스펙트럼이 적분된 복사 온도와 실제 진공조 모양 등을 감안하여 이론적으로 계산된 복사에 의한 스펙트럼 간 격차를 추정하는데도 사용된다. 이렇게 실시간 온도 측정과 단일 온도 흑체가 아니기 때문에 생기는 오차를 추정함으로써 흑체 복사에 의한 불확도를 3.7×10^{-18} 까지 줄일 수 있었다. 이외에도 동경대 가토리 교수 팀에서는 움직이는 광격자를 이용하여 포획된 원자를 액체 질소 환경의 원통 내부로 이동, 광격자 시계를 동작시킴으로써 흑체 복사에 의한 이동 값과 불확도 모두를 10^{-18} 수준으로 낮추는 연구를 발표하였다.^[10]

이외에도 한 개의 이온으로 동작하는 이온 시계와 달리 광격자 시계에서는 다수의 포획 원자들 간의 충돌에 의한 주파수 이동을 정확히 평가해야 하는데 다양한 방법으로 충돌 효과에 의한 불확도를 줄인 결과들이 발표되고 있으며 본 연구팀에서도 독자적 방식으로 충돌효과에 의한 불확도를 줄여 이터븀 광격자시계의 불확도를 2.9×10^{-16} 까지 낮추는데 성공하였다.^[11]

앞에서 설명한 것처럼 현재 초의 정의는 세슘원자의 고유진동수를 기준으로 정의되어 있으나 최근 원자의 광주파수에 기반한 광시계가 개발되고 있으며 이미 성능에 있어서 최고의 세슘원자시계를 능가하여 불확도가 10^{-18} 수준에 도달한 결과들이 발표되고 있다. 현재에도 세계 각 나라의 광시계 연구그룹은 1×10^{-18} 의 정확도를 목표로 광시계 개발에 박차를 가하고 있으며 우주의 나이를 137억 년이라고 한다면 우주의 탄생으로부터 지금까지 1초도 틀리지 않는 시계가 개발되고 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 항법예의 응용, 양자컴퓨팅의 실현, 초정밀 시각 동기 등에 이르기까지 우리의 미래에 다양한 차원에서 근본적인 영향을 주게 될 것이다.

REFERENCES

- [10] I. Ushijima *et al.*, arXiv:1405.4071 (2014).
- [11] S. K. Lee *et al.*, submitted.