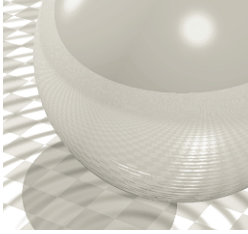


1. 서론

시간은 우주의 탄생부터 현재까지 계속 존재해 왔다. 2005년 9월 EBS에서 처음 방송을 시작했던 '지식채널e'의 첫 회 제목이 '1초'였다. 달팽이가 1 cm를 기어가고, 벌이 200번의 날갯짓을 하며 79개의 별이 사라지는 시간... 우주의 역사를 1년으로 환산하면 인류의 역사는 놀랍게도 1초밖에 되지 않는다. 그 적막한 시간과 공간의 끄트머리에 우리가 살아가고 있다. 인류에게 가장 오래된 시계는 천체였다. 우리의 조상들은 해가 뜨고 지는 반복적인 현상에 의지하여 시간을 측정하였다. 물시계나 당시 기술로는 뛰어난 정확도를 가졌던 기계식 시계, 우리에게 익숙한 수정 시계들이 존재하였으나 공식적으로 1967년 전까지 시간 표준은 지구의 자전과 공전을 중심으로 하는 천체의 운행을 기반으로 하였다. 과학기술의 발달과 함께 보다 정밀한 시간 척도가 필요해지면서 미세하지만 계속 변하는 천체의 운동이 아닌 변하지 않는 원자의 고유진동수가 시간표준으로 채택되었다. 현재 "초(second)는 세슘-133원자(^{133}Cs)의 바닥상태에 있는 두 초미세 준위간의 전이에 대응하는 복사선의 9 192 631 770 주기의 지속시간"으로 정의된다.

그림 1에 나타낸 것처럼 원자시계는 주파수발생기, 고유진동수를 가진 원자, 주파수를 측정하는 주파수계수기의 세 부분으로 이루어져 있다. 주파수발생기로부터 발생된 전자기파가 원자의 시계 전이선에 가해진 후 들뜬 상태의 원자수를 측정하면 가해진 전자기파와 원자 고유진동수의 일치도를 알 수 있다. 주파수발생기의 주파수가 원자의 고유진동수와 가까울수록 원자가 들뜬 상태로 전이할 확률이 높아진다. 현재 초의 정의에 따른 가장 정확한 시계는 세슘원자분수시계다. 세슘 원자를 레이저와 자기장을 이용한 자기광포획(Magneto-optical trap)으로 잡은 후 원자들을 위로 쏘아 올린다. 쏘아 올려진 원자들은 올라갈 때와 내려올 때 마이크로파 공진기를 두 번 거치게 되는데 최종적으로 들뜬 상태로 전이되는 원자수가 최대가 되도록 마이크로파를 조절한다. 이렇게 조절된 마이크로파는 원자의 시계전이선에 안정화되어 초의 정의를 실현하게 된다. 현재 세계에서 가장 정확한 세슘원자분수시계는 1억년에 1초도 틀리지 않을 만큼 정확하다 [1].

광시계는 세슘원자분수시계의 마이크로파 전이선 대신 광격자에 포획된 중성원자 또는 이온 트랩에 포획된 이온의 광주파수 전이선을 이용하게 된다.

하지만 두 종류의 광시계 모두 광주파수 전이선을 이용하므로 주파수 발생기와 주파수 계수기로 초미세

특집 ■ 원자물리

광시계

유대혁, 이상경, 박창용, 이원규*

* 한국표준과학연구원 시간센터

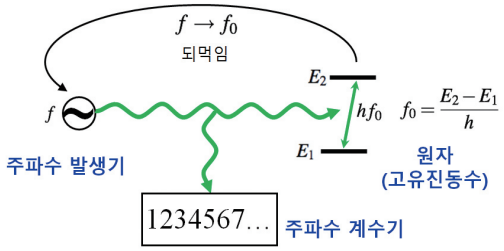


그림 1. 원자시계 구성도

선폭의 레이저와 광주파수 빗을 사용한다는 점에서는 동일하다. 광시계에 대해서는 다른 지면을 통해 다룬 바 있으므로 이 글에서는 광시계 개요와 함께 광격자 시계에서 10^{-18} 수준의 극한 불확도를 구현하기 위한 최근의 두 가지 연구 성과들을 간략히 소개하고자 한다 [2,3].

2. 광격자 시계

원자의 고유진동수를 기준주파수로 사용해야 하는 원자시계에서 가장 크게 문제가 되는 것은 원자의 움직임에 의한 도플러 이동으로 고유진동수가 변한다는 사실이다.

도플러 이동에 의한 주파수 변화의 영향을 최소화하기 위해서는 어떤 방식으로든 원자의 움직임을 묶어두어야 한다. 중성 원자를 이용하는 광격자 시계는 이온 시계처럼 전기장을 사용할 수 없으므로 레이저를 이용한 쌍극자포획 방식을 이용해야 한다. 쌍극자포획은 강한 레이저광으로 원자에 유도 쌍극자모멘트를 생성하여 레이저-원자 상호작용 퍼텐셜의 최저점에 원자를 포획하는 방법이다. 적색(청색) 이동 레이저를 가하면 원자들은 레이저 세기가 가장 큰(작은) 곳에 잡히는데 현재까지 대부분의 광격자 시계는 적색 이동 레이저를 이용하고 있다.

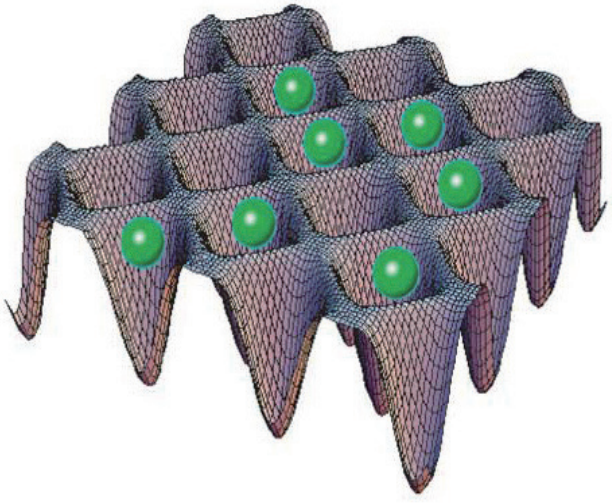


그림 2. 반대 방향으로 진행하는 레이저 광에 의해 생성된 광격자에 포획된 원자 [4]

주파수 이동을 최소화하면서 상호작용을 하기 위해서는 적어도 초미세 선폭의 레이저와 같은 방향의 원자 운동은 파장에 비해 충분히 작은 영역 안으로 제한되어야 한다.

그림 2에 나타난 것처럼 광격자 포획용 레이저를 서로 반대방향으로 입사하여 정상파를 만들게 되면 원자는 정상파 주기인 레이저 파장의 절반 길이 내에 잡혀있게 된다. 이렇게 레이저로 형성된 격자에 원자를 가둔다 하여 광격자 시계라 불린다.

하지만 레이저에 의해 시계 전이선에 해당하는 원자의 에너지준위가 변하게 되고 변화의 정도가 레이저 세기에 의존하므로 초정밀 시계로 활용하기에는 적합하지 않다고 여겨져 왔다. 2002년과 2003년 동경대의 Katori 교수가 포획 레이저의 파장을 적절히 선택하면 시계전이선의 두 에너지준위가 같은 값만큼 변화되어 시계전이선의 주파수에는 변화가 없다는 제안과 실험을 발표하면서 광격자 시계 개발이 본격화되었다 [5,6]

이 파장을 마법 파장(magic wavelength)이라 부르는데 이터븀 원자의 경우 약 759 nm 이다. 현재 중성원자의 광격자포획을 이용한 연구는 이터븀, 스트론튬 등의 원자를 이용하여 한국표준과학연구원 시간센터 외에도 미국의 NIST, JILA, 프랑스의 SYRTE, 일본의 동경대, NICT, NMIJ, 독일의 PTB 등에서 이루어지고 있다.

최근 광격자 시계의 불확도를 10^{-18} 수준으로 낮추는데 걸림돌이었던 흑체 복사에 의한 주파수 이동효과를 줄일 수 있는 방법들이 제시된 후 이전 최고 수준이었던 알루미늄 이온 광시계보다 낮은 6.4×10^{-18}의 불확도를 가지는 스

트론튬 광격자 시계가 보고되었다 [7]. 이는 약 50억 년에 1초 정도 밖에 틀리지 않는 불확도이다. 현재 한국표준과학연구원 시간센터에서는 이터븀을 이용한 광격자 시계를 개발 중에 있다.

현재 불확도는 2.9×10^{-16}로 보고된 이터븀 광격자 시계로서는 최고 수준의 불확도를 보인다. 2013년에는 미국 NIST, 일본 NMIJ에 이어 세계 3번째로 Yb 광격자 시계의 절대주파수 측정 및 불확도 평가를 성공적으로 수행하여, 그 결과를 발표한 바 있다 [8].

3. 이온 시계

이온 시계는 이온의 움직임을 제한하고 포획하기 위해 그림 3에 나타난 것과 유사한 Paul trap을 이용한다. 정전기장에는 퍼텐셜 최저점이 존재하지 않으므로 안장점 퍼텐셜을 생성한 후 MHz 수준의 주파수로 endcap과 ring의 양극과 음극을 교환하여 포획된 원자가 빠져나가지 못하게 한다.

냉각 및 상태검출용 전이선에 맞추어진 파장의 레이저를 이용해 이온을 냉각시켜 바닥상태에 준비한 후 시계전이선 레이저를 가한다.

이후 다시 냉각 및 상태검출용 레이저를 가하면 이온의 상태를 알 수 있다. 즉, 이온이 들뜬상태로 여기되면 형광신호가 보이지 않고 바닥상태에 존재한다면 형광신호가 나타난다. 그림 3에 나타난 것처럼 시계 전이선 레이저를 가한 횟수에 대해 형광신호가 사라진 횟수를 통계적으로 처리하여 레이저와 전이선의 일치 정도를 측정한 후 시계 전이선 레이저에 되먹임을 주어 안정화한다. 현재 이온 시계는 수은, 이터븀, 스트론튬, 인듐, 칼슘, 알루미늄 이온 등을 이용하여 미국 NIST, 독일 PTB, 영국 NPL 등에서 연구가 이루어지고 있으며 현재까지 보고된 가장 정확한 이온 시계는 NIST의 알루미늄 이온 시계로 8.6×10^{-18}의 불확도가 보고되었는데 이 값은 약 37억년동안 1초 정도밖에 틀리지 않는 정확도이다 [10]. 이온 시계는 포획 지속 시간이 길어 긴 시간 연속 측정이 가능하다. 따라서 오래도록 측정하게 되면 불확정성의 원리에 의해 에너지 불확도, 즉 주파수 측정 불확도가 그만큼 작아지고 비례하여 시계의 정확도는 높아지게 된다.

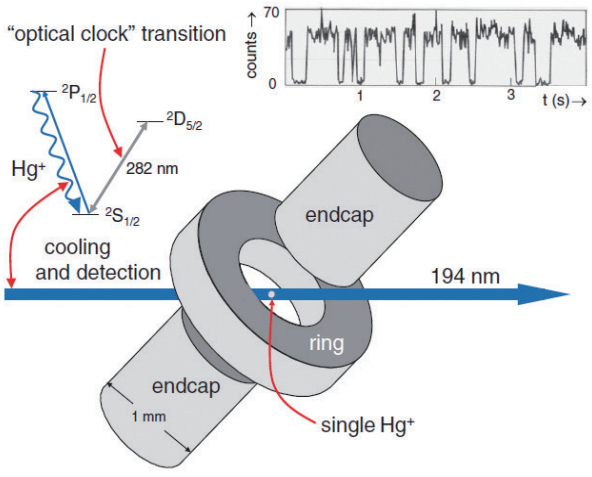


그림 3. 수은 이온의 포획을 위한 Paul trap. 수은 이온 시계 개발에 사용되는 에너지 준위와 들뜬 상태 측정 방법 [9]

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.

Wineland 팀은 그림 3처럼 하나의 이온에서 두 종류의 전이선을 모두 이용하지 않고 냉각 및 상태 검출과 시계 전이선을 서로 다른 이온을 이용하여 구현함으로써 세계 최초로 10^{-18} 수준의 불확도를 가지는 알루미늄 광시계 개발에 성공하였다. 참고문헌 [3]에 좀 더 자세한 다룬 바 있으므로 간략히 원리를 설명하면 다음과 같다.

두 이온을 동시에 이온 트랩에 포획하면 두 이온은 쿨롱(Coulomb) 힘에 의해 같은 모드로 진동하게 된다. Windland 팀의 알루미늄 이온 시계는 선형 이온 트랩에 알루미늄과 베릴륨(Be)을 함께 포획한다. 알루미늄 이온의 냉각을 위한 167 nm 레이저를 개발하는 대신 베릴륨 이온을 313 nm 레이저로 냉각하면 결국 알루미늄 이온이 함께 냉각되는 'sympathetic cooling'이 일어난다. 다음으

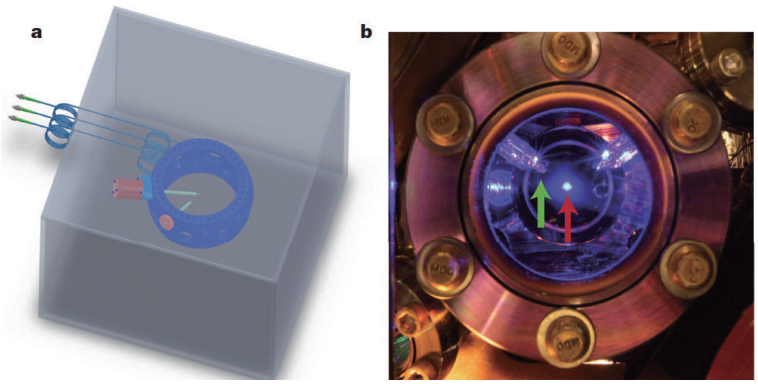


그림 4. 흑체 복사에 의한 시계 전이선 주파수 이동을 정밀 평가하기 위한 진공조. a, 온도 안정화된 차폐통 내부의 진공조에 장착된 이동 및 고정 온도 센서. b, 포획 원자(빨간색) 및 이동 온도 센서(초록색) [7]

로 시계 전이선 레이저를 가한 후 알루미늄 이온의 들뜬 상태를 검출하면 된다.

이를 위해서는 알루미늄 이온의 내부 전자 에너지 상태를 운동 에너지, 즉 포획된 원자의 진동 에너지 상태로 전이시키면 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.

4. 10^{-18} 불확도 광격자 시계 연구

광격자 시계와 이온 시계는 매우 다른 특성을 가지고 있다. 광격자 시계는 다수(약 10,000개)의 원자를 광격자로 포획하지만 이온 시계는 하나의 이온을 Paul trap을 이용하여 포획한다. 따라서 시계 전이선의 주파수를 변하게 만드는 주요 요인들도 다르다. 알루미늄 이온 시계의 경우 높은 주파수의 에너지 준위를 가지고 있으므로 흑체 복사에 의한 시계 전이선 주파수 이동은 매우 작다. 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. 최근 광격자 시계 최초로 10^{-18} 불확도를 보고한 JILA의 스트론튬 광격자 시계의 경우 특수한 진공조 구조 내에 흑체 복사의 영향을 직접 측정함으로써 흑체 복사에 의한 불확도를 낮출 수 있었다 [7]. 이외에도 동경대 Katori 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.

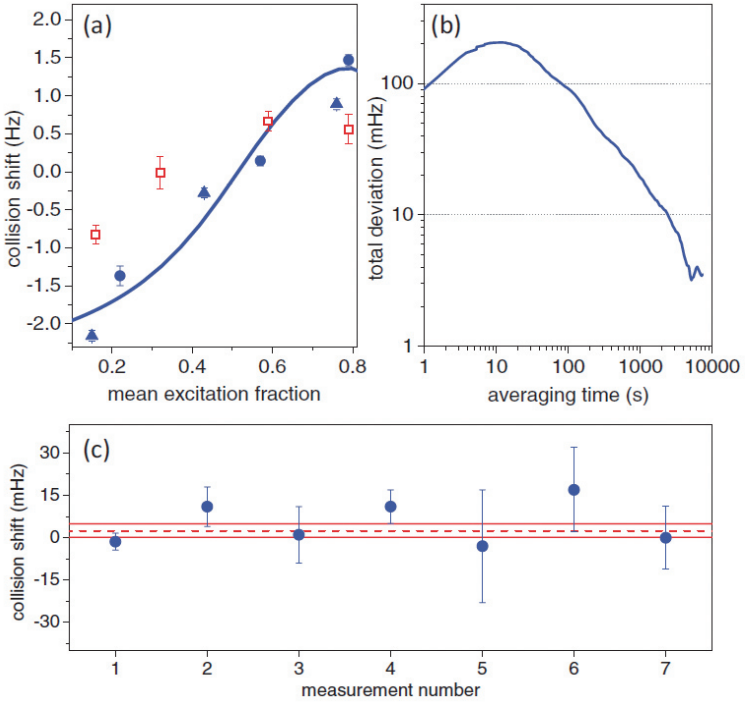


그림 5. (a) spin-unpolarized sample(open square), spin-polarized sample 수직(solid triangle)/수평(solid circle) 여기 상태에 따른 충돌효과. (b) 충돌효과 상쇄조건에서의 측정에 따른 total deviation. (c) 충돌 효과 측정 [11]

한 개의 이온으로 동작하는 이온 시계와 달리 광격자 시계에서는 다수의 포획 원자들 간의 충돌에 의한 주파수 이동을 정확히 평가해야 한다. 최근 NIST에서는 이터븀 원자들간의 충돌로 인한 주파수 이동에 대한 이론 및 실험 결과를 발표하였다. 이에 따르면 여기 확률을 0.51로 유지할 경우 주파수 이동이 없는 상태로 만들 수 있으며 이때 불확도 10^{-18} 수준으로 충돌효과를 평가할 수 있음을 보고하였다 [11]. 이외에도 2차원 광격자에 원자를 포획하여 1차원 광격자에 비해 보다 더 높은 원자 밀도를 얻으면 오히려 주파수 이동이 줄어드는 결과를 얻을 수 있다는 실험결과가 보고되었으며 포획가능 원자 수를 극대화하여 충돌 효과를 추정하는 방법도 보고되었다.

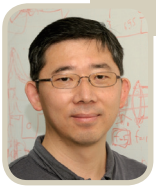
5. 결론

광시계는 최근 활발한 연구를 통해 10^{-18} 수준의 불확도를 달성하였으며 이런 극한의 주파수 측정 능력은 다양한 분야에서의 응용에 활용되어 중요한 연구결과를 낳고 있다. 멀지 않은 미래에 초의 정의가 바뀔 것이다. 광시계 개발로 인한 비약적인 정확도 향상은 기본 물리법칙을 검증할 수 있는 능력 또한 비약적으로 향상시켜 미세구조 상수의 시간적 변화 검증, 아인슈타인의 상대성이론 검증 연구들이 이어지고 있다. 광시계의 극한의 측정 능력이 이전에 가능하지 않았던 새로운 과학적 발견을 견인하는 미래를 기대해본다.

참고문헌

[1] Ruoxin Li, K. Gibble, and K. Szymaniec, Metrologia 48, 283 (2011).
[2] D.-H. Yu et al., Physics and High Technology 19(5), 19 (2010).
[3] T. Y. Kwon and D.-H. Yu, Physics and High Technology 21(12), 25 (2012).
[4] M. Takamoto et al., Nature 435, 321 (2005).
[5] H. Katori, Proc. Symp. Freq. Stds. Metrology 323 (2002).
[6] H. Katori et al., Phys. Rev. Lett. 91, 173005 (2003).
[7] B. J. Bloom et al., Nature 506, 71 (2014).
[8] C. Y. Park et al., Metrologia 50, 119 (2013).
[9] D. J. Wineland, Rev. Mod. Phys. 85, 1103 (2013).
[10] C.W Chou et al., Phys. Rev. Lett. 104, 070802 (2010).
[11] A. D. Ludlow et al., Phys. Rev. A 84, 052724 (2011).

약 력



유대혁

- 2013년 3월 – 현재
  한국표준과학연구원 시간센터, 센터장
- 2005년 6월 – 2006년 5월
  미국 NIST Boulder 방문연구원
- 2002년 3월 – 현재
  한국표준과학연구원 시간센터, 책임연구원
- 2000년 8월
  서울대학교 물리학과, 이학박사

이상경

- 2012년 4월 – 현재
  한국표준과학연구원 박사후 연구원
- 2011년 2월
  한국과학기술원 물리학과, 이학박사

이원규

- 2002년 3월 – 현재
  한국표준과학연구원 시간센터 책임연구원
- 2002년 2월
  서울대학교 물리학과 이학박사

박창용

- 2003년 12월 – 현재
  한국표준과학연구원 시간센터, 책임연구원
- 2002년 3월 – 2003년 11월
  한국표준과학연구원, 박사후 연구원
- 2002년 2월
  고려대학교 물리학과, 이학박사