원자 간섭계와 정밀 측정

DOI: 10.3938/PhiT.19.025

김 재 완

Atom Interferometry and Precision Measurement

Jaewan KIM

Atom interferometry utilizes wavelike nature of matter and benefits from the short de Broile wavelength of the matterwave. Recently, neutral atoms which are laser cooled down to a few μ K or even to a few nK, are used widening the applications of the atomic interferometers. Optical interferometers have been greatly used in precision measurements and atom interferometer can replace the optical interferometers providing better precision. In addition, atomic interferometers have unique feature that they are sensitive to inertial forces. Atomic inertial sensors such as gravimeters and gyroscopes are realized. Precision measurements of fundamental constants such as h/m and Newtonian G are also done by atomic interferometers and Einstein's equivalence principle is also on the test using atom interferometers. A space project to measure the general relativity and quantum gravity effects is also in progress. In this article, the basic principle of atomic interferometers and their many interesting applications are presented.

서 론

원자의 파동성을 이용하는 원자 간섭계의 개념은 빛의 파동성을 이용한 광학 간섭계와 이후 양자역학을 통해 터득한 물질파의 개념에 바탕을 두고 있다. 빛을 이용한 광학 간섭계는 마흐-젠더, 마이켈슨-몰리, 사냥, 파브리-페로 등 여러 과학자들에 의해 다양한 형태의 광학 간섭계가 제안되고 실현

저자약력

김재완 교수는 서울대학교 박사(2003)로써, 프랑스 Kasler-Brossel 연구소, 프랑스 국립표준연구소(LNE-SYRTE) 연구원(2003-2006)을 거쳐, 2006년부터 현재까지 명지대학교 물리학과 교수로 재직 중이다.
(jwkim@mju.ac.kr)

되었으며 현재에도 천문학, 광학적 특성 분석, 정밀 측정 등의 분야에서 널리 쓰이고 있다. 예를 들면 레이저 헤테로다인 간섭계를 이용한 위치변위 측정은 고도의 간섭성과 직진성 및 두 파장을 갖는 레이저 빔을 대상물체에 조사하여 물체의 변위에 따르는 레이저 빔의 파장변화를 검출하는 방식을 이용하기 때문에 수 나노미터(nm) 급의 정밀 변위도 측정이 가능하다. 이러한 레이저 간섭계를 이용하여 반도체 제조의 광식각공정, 원자현미경, 정밀 나노 소자 가공과 같은 극도의 정밀도를 유지해야 하는 제조 산업분야에 적용되어 사용된다. 한편 1960년대부터 중성자와 전자를 이용하여 입자의 파동성에 따른 회절 및 간섭에 대한 연구와 물질파 간섭계가 활발히 연구되어 왔으며 현재에도 핵 반응로 등에서 만들어지는 중성자를 이용한 간섭실험과 이를 물성연구에 응용하는 실험이 활발히 이루어지고 있다. 나아가 이러한 중성자나 전자 대신 그들보다 훨씬 질량이 커서 일반적으로 더 짧은 드브로이 파장을 가지는 원자를 이용한 원자 간섭계가 비교적 최근인 1990년대 초부터 개발되어 현재 매우 활발히 연구되고 있다. 원자 간섭계의 가장 중요한 특징은 빛과 달리 원자가 질량을 가지고 있으므로 원자 간섭계의 위상이 관성력, 원심력이나 중력 등의 영향을 받는다는 점이다. 이것을 이용하여 원자 자이로스코프(Gyroscope), 원자 중력계(Gravimeter) 등이 연구되고 있다.

원자 간섭계의 원리

정밀 측정에 사용되는 라만(Raman) 원자 간섭계의 기본적인 원리는 마흐-젠더(Mach-Zender) 광학 간섭계의 원리와 동일하다. 광학 간섭계에서 빛을 빔가르개(beam splitter)를 이용하여 두 개로 가른 후 거울을 이용하여 경로를 바꾸고 다시 빔가르개를 이용하여 두 빛을 합쳐 간섭무늬를 관찰하듯이, 원자 간섭계에서도 원자 물질파를 레이저 빛을 이용하여 가르고 다시 합쳐 원자 물질파의 간섭 현상을 관찰한다. 원자빔의 속도와 경로에 변화를 주는 방법은 공진조건을 만족하는 레이저 광선을 조사해서 광선의 운동량을 원자에 실어주는 것이다. 이때 내부 에너지가 바닥 상태인 원자가 들뜬 상태로 “반쯤만 가도록” 한다면, 원자는 바닥 상태이며 운동

Fig. 1. Basic principle of atom interferometry. (Left) Basic scheme of 3-pulse atom interferometer. (Right) Flux of atoms in the two internal states versus phase difference in the two paths.

량의 변화가 없는 상태와, 들뜬 상태이며 운동량이 광자의 운동량만큼 변한 상태의 선형조합으로 주어질 것이다. 즉, 내부와 외부 자유도 간의 얽힘과 함께 경로가 갈리게 된다. (그림 1) 그러나 가시광선대의 전이에서는 들뜬 준위의 수명이 수십 나노초에 불과하여 실제로는 서로 반대방향으로 진행되는 두 레이저 빛을 사용하여 두 바닥 상태 사이에 유도 Raman 전이를 일으킨다.

중력 가속도 측정: 원자 중력계

이러한 원자 간섭계를 이용하여 물질과의 위상 변화를 정밀하게 측정하여 여러 가지 물리 상수, 관성력 등을 정밀하게 측정할 수 있다. 특히 중력의 정밀한 측정은 아인슈타인의 일반 상대성 원리의 기본 가정이 되는 중력 질량과 관성 질량이 같다고 하는 등가원리(Equivalence principle), 중력과의 존재 여부 등을 검증하는 기초 연구뿐 아니라 지질학, 인공위성에 탑재된 중력계를 이용한 해저 지형의 탐사, 석유, 광맥, 지하수 등의 자원 탐사, 입력된 해저 지형을 이용하여 외부와 교신 없이 항해하는 심해 잠수함의 항법장치, 우주개발, 그리고 아직 다소 원시적인 방법으로 정의된 질량 표준을 기본 물리 상수를 이용하여 정의하려고 하는 새로운 국제질량표준의 확립 등, 다양한 연구에 그 필요성이 대두되면서 최근 매우 활발히 연구되고 있다. 최근 20여 년 동안 개발된 레이저 냉각법 등을 이용한 새로운 형태의 원자 간섭계가 출현함으로써 이를 이용하여 중력을 높은 정밀도로 측정하는 것이 가능하게 되었다.

중력을 정밀하게 측정하기 위해 사용하는 현재의 중력계에는 두 가지 형태가 있다. 하나는 중력의 절대적인 값을 측정하는 절대 중력계와 교정된 위치와 측정 위치 사이의 상대적인 값만을 측정하는 상대 중력계가 있다. 절대 중력계는 자유 낙하하는 물체를 이용하거나 진자의 주기를 측정하는 방법이 있고 상대 중력계는 LaCoste-Romberg 중력계와 Worden 중력계가 널리 쓰이는데 기본적으로 용수철에 질량을 매달아

Fig. 2. A relative gravimeter CG-5 (left) and an absolute gravimeter FG-5 (right).

용수철이 늘어난 길이로 중력을 측정하게 된다. 상대 중력계는 크기가 작고 가벼워 운반이 편리하고 측정 잡음이 적어 측정 시간이 짧은 장점이 있어 지질학, 자원 탐사, 인공위성 등에 널리 쓰이고 있다. (그림 1 참조) 이러한 상대 중력계는 반드시 절대 중력계로 중력을 오랜 시간에 걸쳐 측정하여 중력 값을 정확히 알고 있는 중력 표준 위치에서 교정을 거쳐야 하고 미국의 NIST, 프랑스의 BIPM 등 선진국의 국가표준 연구소에서는 주변 물체의 변화에 의해 중력이 영향을 받지 않도록 잘 제어되는 특정 위치에서 정밀한 중력 측정을 통하여 표준중력위치를 확립하고 있다. (이러한 위치들 사이에 국제 중력표준망(IGSN 71)이 형성되어 있으며 세계 1등 표준 중력점 4개를 비롯해 총 1854점이 있으며 우리나라도 4점이 포함되어 있다.) 현재 가장 널리 쓰이는 절대 중력계는 수년간 미국 NIST와 콜로라도 대학의 공동 연구에 의해 개발되고^[1] Micro-g Solutions Inc., Colorado, USA에 의해 상업적으로 생산되고 있는 FG-5 절대 중력계이다. 진공 안에서 빛을 되 반사시키는 일종의 거울 역할을 하는 코너큐브(corner cube)를 자유낙하시키고 시간에 따라 이 큐브에 반사된 빛과 스프링에 매달린 또 하나의 코너큐브에 반사된 빛 사이의 간섭을 이용한 광학 간섭계를 구성하여 시간에 따라 낙하하는 위치를 측정함으로써 중력 가속도를 약 10억분의 1의 정확도(20 nm/s^2)로 측정할 수 있다. 최근에는 이러한 중력계를 이용하여 약 200년 동안의 노력에도 불구하고 여전히 그 값이 정확히 측정되지 않은 Newton 상수 G 값을 많은 오차(systematic error) 요인들을 제거하고 정확히 측정하는 결실을 맺기도 하였다.^[2]

하지만 기존의 중력계는 피할 수 없는 단점이 있는데 우선

REFERENCES

- [1] T. M. Niebauer *et al.*, Metrologia **32**, 159 (1995).
- [2] J. P. Schwarz *et al.*, Science **282**, 2230 (1998).

Table 1. Performances of different kinds of gravimeters.

Type of gravimeter	Noise/ ($g \text{ Hz}^{-1/2}$)	Drift/ ($g \text{ day}^{-1}$)	Accuracy/ g
Spring/mass system	1×10^{-10}	3×10^{-8}	N/A
Cryogenic gravimeter	$< 10^{-12}$	2×10^{-10}	N/A
Falling corner-cube	5×10^{-8}	—	2×10^{-9}
Atom interferometer	2×10^{-8}	—	3×10^{-9}

스프링-질량 형태의 중력계가 최근 온도에 따른 스프링의 변화를 제거하기 위해 스프링을 초전도체를 이용한 자기 부상 방식으로 대체한 cryogenic 중력계가 개발되는 등 잡음과 drift를 많이 줄여^[3] 매우 낮은 잡음을 가지는 장점이 있는 반면 용수철의 온도 및 사용에 따른 변형 등에 의해 정확도가 현저히 낮은 단점이 있다. FG-5의 경우는 정확도는 높으나 잡음이 상대적으로 크고 시간 당 약 100번 정도의 측정밖에 할 수 없어 낮은 반복률(repetition rate)로 인해 정확한 측정을 하기 위해서는 장시간 기다려야 하는 단점이 있다. 또한 FG-5 역시 내부에 용수철 및 역학적 구조물이 있어 온도와 사용에 따라 측정값의 오차가 생기게 된다(표 1 참조). 레이저 냉각된 원자 간섭계를 이용하면 역학적 구조가 필요 없어 온도 압력 등의 환경에 영향을 받지 않아 높은 정확도를 가지며 원리적으로는 광 간섭계를 이용한 FG-5보다 높은 정밀도와 낮은 잡음을 가지는 이상적인 중력계를 만들 수 있다.

1991년 Stanford의 Steven Chu는(1997년 노벨상 수상) 1980년대 후반부터 개발된 원자냉각이라는 기술을 써서 1989년 Borde에 의해 새롭게 제안된^[4] 원자의 외부 자유도와 내부 자유도를 결합한 Ramsey-Borde 원자 간섭계를 실현하였다.^[5] Chu와 Kasevich 등은 이러한 원자 간섭계를 이용하여 지구표면에서의 중력가속도 g (gravimeter)와, 높이에 따른 g 값의 변화(gravity gradiometer), 그리고 h/m (원자) 값 등을 정밀하게 측정할 수 있었다. 원자 간섭계를 이용한 새로운 시도 중 빼놓을 수 없는 것이 사냐(Sagnac) 효과를 이용한 자이로스코프이다. 이는 광학적 간섭계에서와 같은 원리로 작동하며, 이미 위의 연구진 등에 의해서 구현되어 그 정밀도가 입증된 바 있다.^[5] 또한 원자 중력계를 이용하여 최근 일 반상대성 이론의 등가원리를 검증하거나 Newton 상수를 측정하거나 미세구조상수를 측정하는데 사용되는 등 응용 연구가 매우 활발하다. 미국의 NIST, 독일의 PTB, 프랑스의 LNE-SYRTE, 이탈리아의 IMGC 등 각 나라의 표준연구소와 미국의 Stanford 대학, MIT, 독일의 Max-Planck 연구소, Hannover 대학, 프랑스의 Kastler-Brossel 연구소, 폴리테크

Fig. 3. Atomic gravimeter at LNE-SYRTE.

닉(Polytechnique), 광연구소(l'Institut d'Optique) 등에서 연구용 원자 간섭계를 개발하여 보유하고 있으며 이를 이용하여 자이로스코프나 중력을 측정하는 중력계를 실현하는 연구에 매진하고 있다. 원자 중력계는 현재 기존의 FG-5 중력계와 잡음 및 정확도에서 비슷한 성능을 보이고 있으나^[6] (표 1 참조) 원자 냉각을 위한 레이저 장치, 진공 장치 및 진동 차단을 위한 스프링 장치 등이 실험실을 가득 차지하므로 운반 및 여러 대를 제작하는 것이 어려워 중력표준점의 확립, 항법 장치, 인공위성 탑재, 자원 탐사 등에서 기존의 중력계를 완전히 대체하지는 못하고 있어 이동성을 증가시키기 위한 소형화에 관한 연구가 진행되고 있다. 특히 프랑스 국립표준연구소 LNE-SYRTE와 명지대학교 원자광학연구실은 공동연구를 통해 원자 간섭계를 구성하되 진동을 차단하기 위해 낮은 진동수를 가지는 매우 긴 super spring 대신 진동을 지진계 혹은 가속계로 측정하여 레이저의 위상에 되먹임으로써 진동의 영향을 능동적으로 제거하는 방법을 개발하고 사용되는 레이저의 수를 줄이고 운반 가능한 광시스템을 개발하여 작은 크기의 운반 가능한, 중력 표준점 확립과 질량표준의 새로운 정의, 항법 장치, 우주정거장 혹은 인공위성에 설치될 수 있는 원자 중력계를 개발하고 있다.^[7-10]

이러한 원자 중력계는 아래에 기술한 기초 연구 및 응용 분야의 당면한 과제를 해결하는 초석을 제공할 수 있다. 이러한 연구 분야 및 주제는 모두 기존의 중력계의 정확도를 뛰

REFERENCES

- [3] J. M. Goodkind, Rev. Sci. Instrum. **70**, 4131 (1999).
- [4] C. Borde, Phys. Lett. A **140**, 10 (1989).
- [5] T. L. Gustavson *et al.*, Phys. Rev. Lett. **78**, 2047 (1997).
- [6] A. Peters *et al.*, Nature **400**, 849 (1999).
- [7] P. Cheinet *et al.*, Applied Physics B **84**, 643 (2006).
- [8] J. Le Gouët *et al.*, Eur. Phys. J. D **44**, 419 (2007).
- [9] J. Le Gouët *et al.*, Applied Physics B **92**, 133 (2008).
- [10] J. Le Gouët *et al.*, Optics Comm. **282**, 977 (2009).

Fig. 4. Watt Balance project. (Left) Gravity is balanced with the magnetic force on the coil, (Right) Induced current of the moving coil is measured. Uncertainty in the measurement of magnetic field is avoided.

어느 정밀한 측정을 요구하고 있으며 원자 간섭계를 이용한 중력계가 그 해답이 될 수 있다.

원자 간섭계의 응용 (1): 기초 연구 분야

Watt balance 프로젝트: 현재 물리량의 국제 표준 중에 유일하게 물리 기본 상수가 아닌 방법으로 정의되어 있는 질량 표준(진공 안에 보관된 일정한 합금 덩어리가 1 kg 원기)을 기본 물리상수를 이용하여 정의하려는 연구가 한창 진행 중이다. 그 중 대표적인 것으로서 프랑스 BIPM에서 추진하고 있는 Watt balance 프로젝트는^[11] 질량원기의 무게를 전자기적 힘으로 변환하여 질량을 플랑크 상수 등의 기본 물리상수로 정의하고자 하는 것으로서 중력가속 g 의 값을 정확하게 정밀하게 측정하는 것이 무엇보다 중요하다. 현재의 합금으로 만들어진 질량원기는 30년 동안 약 5×10^{-8} kg의 오차를 보이고 있으며 이보다 더 정확한 표준을 정의하기 위해서는 중력가속 g 의 값을 10^{-9} g 이하로 측정하는 것이 필요하다.

우주 개발 및 양자 중력 효과의 관찰: 원자 간섭계를 인공위성에 실어 우주 밖으로 내어 보내 일반 상대론적 효과 예를 들면 회전하는 지구 주위의 중력 변화(Lense-Thirring 효과)나 중력파를 관찰하는 연구가 진행 중이며 이를 위해 인공위성에 실을 수 있는 이동가능하고 견고한 고정밀 원자 간섭계 제작 기술이 개발되어야 한다.^[12]

원자와 물체 표면 사이의 van der Waals 상호 작용 측정 (원자 간섭계와 나노기술의 만남): 2005년 미국 애리조나 대학의 A. D. Cronin 교수팀은 빠른 속도로 움직이는 원자가 파장이 변하기 전에 얼마나 물체 표면 가까이 올 수 있는지를 원자 간섭계를 통해 직접 측정했다. 이들의 측정은 1920년대 후반 양자 물리학자들에 의해 제안된 빠른 속도로 움직이는

Fig. 5. HYPER project. Atomic interferometer on satellite measures the general relativistic effect around the rotating Earth.

원자의 파장이 표면으로부터의 거리에 따라 짧아지거나 길어진다는 이론을 처음으로 확인시킨 실험이다. 이 측정은 나노 기술자들에게 van der Waals 상호작용이라고 불리는 원자와 물체표면간의 힘으로 인한 문제없이 얼마나 작은 디바이스를 제작할 수 있는가에 대한 정보를 제공하여 줄 수 있을 것으로 기대되며 나노기술뿐만 아니라 더 정확한 센서와 양자역학을 연구하고자 하는 원자광학분야에도 지대한 공헌을 할 것으로 예상된다.^[13]

원자 간섭계의 응용 (2): 응용 연구 분야

독자적 정밀 항법 장치: 최근 항공, 우주 기술의 발달과 더불어 고정밀 항법 장치의 개발이 요구되고 있다. 현재 지표면 상에서 널리 쓰이고 있는 항법 장치의 기본이 되는 GPS는 인공위성에서 발신하는 시간 정보를 수신할 수 없는 경우, 예를 들면 심해의 잠수함과 같은 경우 무용지물이 될 수밖에 없다. 또한 대륙간 장거리 미사일의 경우 미사일이 날아가는 동안 지형의 변화에 따른 중력 변화로 그 궤도가 바뀌게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 현재 각국은 인공위성에 탑재된 재래식 중력계(스프링과 질량으로 이루어져 중력에 의한 질량의 변위를 측정함)를 이용하여 지표면과 해저에서 중력 지도를 작성하고 항해 또는 비행 도중 중력의 변화를 측정하여 위치를 파악하는 외부와 독립된 항법 시스템을 개발하는데 많은 관심을 기울이고 있다. 이러한 재래식 중력계는 각 나라 표준 연구소에 있는 중력기준점에 맞추어 교정을 하게

REFERENCES

- [11] http://www.bipm.fr/en/scientific/elec/watt_balance/.
- [12] <http://www.esa.int/science/hyper>.
- [13] J. D. Perrault *et al.*, Phys. Rev. Lett. **95**, 133201 (2005).

Fig. 6. (Left) A satellite for GOCE project. (Right) Gravity anomalies measured by the gravimeter on satellite. Black or Red represents larger variations of gravity.

되는데 이 중력 기준을 원자 간섭계를 이용한 중력계를 이용하여 측정하고 나아가서 이동 가능한 원자 간섭계를 개발하여 개별 중력계를 대체하면 그 정밀도를 획기적으로 늘릴 수 있다. 이러한 시스템은 우선 군사적인 용도로 이용될 목적으로 개발되고 있으나 GPS가 그러하였듯이 미래에 높은 고도에서 운항하는 장거리 여객기 등 민간의 용도로 이용될 것으로 기대된다.

지질, 해저 지형 및 석유 탐사: 현재 배나 잠수함을 이용하여 밀도 변화에 의한 중력의 변화를 측정함으로써 해저 지형이나 지질 탐사 및 석유 탐사가 매우 활발하게 이루어지고 있으며^[14,15] 특히 인공위성에 중력계를 싣고 지구를 돌면서 전 지구적 지질 분포 및 변화를 관찰하여 지진 예보 등에 활용하려는 연구가 진행되고 있다.^[16] 이를 위해서는 높은 정밀도의 중력계가 필요하다. 원자 중력계는 이러한 이동 가능한 중력계를 교정하거나 대체함으로써 보다 효율적인 탐사를 가능하게 한다.

결론

지금까지 원자 간섭계의 기본적인 원리와 정밀 측정의 응용에 대해 간략히 살펴보았다. 특히 정밀한 중력 측정, 질량 표준의 새로운 정의를 위한 Watt balance 프로젝트, 독립적 관성 항법 장치, 지질 연구 등은 현재 원자 간섭계를 이용한 정밀 측정이 기대되는 분야로 현재 세계적으로 활발히 수행되고 있다. 또한 이러한 고정밀 원자 간섭계는 높은 결맞음성을 갖는 레이저 기술, 빛을 이용한 물질과의 조작 기술, 원자의 파동성, 즉 물질파의 성질을 연구하고 조작할 수 있는 기반 기술을 필요로 하므로 원자 간섭계 연구를 통하여 이러한 기반 기술을 확보하는 효과가 있다. 중력계뿐만 아니라 자이로스코프나 물리 기본 상수의 정밀 측정 등 많은 응용성이 있어 원자의 파동성을 획기적으로 증가시킨 극저온 원자 간섭계는 첨단 기술의 각축장인 21세기에 반드시 확보해야 할 기술이며 이를 이용한 연구가 활발히 수행되어야 할 필요가 있다. 상업적인 측면에서 보자면 자원탐사, 지질 및 해양 연구 등에 쓰이는 중력계를 생각한다면 천문학적인 숫자가 됨에도 불구하고 원천 기술은 한 두 회사가 독점하고 있으며 생산회사도 몇 개에 지나지 않는다. 또한 인공위성에 탑재되는 중력계 등 첨단 기술을 요구하는 중력계도 있어 당장은 아니지만 가깝거나 혹은 먼 미래에 원자 간섭계의 상업적 이용 가능성에 본 연구가 초석을 놓을 수 있을 것이다.

REFERENCES

- [14] B. D. Loncarevic, *Nature* **205**, 32 (1965).
- [15] M. A. Zumbege, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **67**, 3051 (1991).
- [16] <http://www.esa.int/export/esaLP/goce.html>.