사낙간섭계 원리를 이용한 자이로의 원리와 발전 전망

심규민[†]

국방과학연구소

㉠ 305-600 대전광역시 유성구 유성우체국 사서함 35-3

(2012년 9월 7일 받음, 2012년 10월 7일 수정본 받음, 2012년 10월 8일 게재 확정)

사낙간섭계 원리를 이용한 자이로는 연구의 계기가 된 발명 또는 연구시기에 따라서 크게 3세대로 구분되어질 수 있다. 사낙간섭계 원리를 이용한 첫 번째 자이로인 링레이저 자이로는 레이저의 발명에 의해서 1960년대 부터 연구되어 왔으며, 사낙간섭계 원리를 이용한 2세대 자이로인 광섬유 자이로는 통신용 광섬유의 발명에 의해서 1970년대부터 연구되어 왔다. 원자의 파동성이 입증된 1990년대 후반에는 차기세대 자이로 개발을 위한 원자간섭계 연구가 시작되었다.

본 논문은 이러한 세 분류의 사낙간섭계 원리를 이용한 자이로의 동작원리, 응용분야, 그리고 발전전망에 대하여 논의하였다.

Principles and Prospects of Sagnac Interferometer Gyroscopes

Kyu-Min Shim[†]

Agency for Defense Development, Youseong P.O. Box 35-3, Daejeon 305-600, Korea

(Received September 7, 2012; Revised manuscript October 7, 2012; Accepted October 8, 2012)

Sagnac interferometer gyroscopes can be divided into three large generations using starting points of time or highlights of their research. As the first generational Sagnac interferometer, the ring laser gyroscopes have been studied since the 1960s by laser invention, and as the second generational Sagnac interferometer, the fiber optic gyroscopes have been studied since the 1970s by invention of optical fiber for communication. In the latter half of the 1990s, after having confirmed the wave theory of the atom, studies of atomic interferometers were started for a next generation gyroscope application.

This paper discusses the operation principles, application, and future prospects of these three generations of Sagnac gyroscopes.

Keywords: Sagnac interferometer, Ring laser gyroscope, Fiber optic gyroscope, Atom interferometer

OCIS codes: (120.4640) Optical instruments; (140.3370) Laser Gyroscopes; (060.2800) Gyroscopes; (020.1335) Atom optics

I. 서 론

간섭계란 가간섭성의 빛을 분리하여 서로 다른 경로를 경험하게 하고 다시 한 곳에 모아서 비교함으로써 경로간의 차이를 검출하는 장치이다. 빛의 파장을 측정함으로써 빛의 파동설의 계기가 된 1801년 영의 간섭실험 이후 마이켈슨(Michelson) 간섭계, 마하-젠더(Mach-Zehnder) 간섭계, 그리고 사낙(Sagnac) 간섭계 등 빛의 파동성을 이용한 다양한 형태의 간섭계가 개발되고 응용 되었다. 마이켈슨 간섭계는 절대좌표계에서 지구의 움직임을 측정하기 위해서 개발되었으며, 마하-젠더 간섭계는 경로상의 매개체 등에 의한 경로의 변화를 검출하기 위한 간섭계이다. 사낙간섭계는 마하-젠더 간섭계와 유사하나 특히 빛의 상대론적인 특성을 이용하여 회전

에 의한 경로차이를 검출할 수 있도록 고안된 간섭계이다^[1].

그림 1에서 볼 수 있는 바와 같이 고리를 서로 반대방향으로 진행하는 빛이 고리를 일주하여 본래의 위치로 돌아오기 까지 거리와 시간은 고리가 회전하는 경우에 식 (1), (2)와 같이 서로 다른 값을 갖게 된다.

$$L_+ = 2\pi R + R\Omega t_+ = ct_+ \quad (1)$$

$$L_- = 2\pi R - R\Omega t_- = ct_- \quad (2)$$

여기서 $L_{\pm}$ 와 $t_{\pm}$ 는 시계방향(cw)와 반시계방향(ccw)으로 회전하는 빛이 고리를 일주하는데 걸리는 경로길이와 시간, R 은 고리의 반경, Ω 는 고리의 회전 각속도, c 는 광속이다.

[†]E-mail: kmshim@add.re.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

FIG. 1. Schematic view of the Sagnac effect with the counter propagation light.

1950년대에 유도방출에 의하여 빛의 주파수와 위상을 일치시킨 레이저가 발명된 후에 사낙간섭계를 항법장치에 응용하기 위한 연구가 활발히 이루어져왔다. 항법장치에 응용하기 위한 사낙간섭계 개발은 과학사적 이벤트에 의해서 단계적으로 진행해 왔는데 이를 크게 3세대로 나눌 수 있다. 가장 먼저 개발된 1세대 사낙간섭계는 레이저 개발과 함께 이루어졌다. 고리형 He-Ne 레이저에서 서로 반대방향으로 빛을 발진시킬 때 고리가 회전하면 서로 반대방향으로 발진하는 빛의 주파수 차이가 발생한다. 이 현상을 이용하여 항법장치에서 회전을 측정하는 것이 링레이저 자이로이다.

또한 2세대 사낙간섭계 개발은 1970년대 통신용 광섬유 개발과 함께 이루어졌다. 광섬유 고리에 서로 반대방향으로 빛을 진행시킬 때 고리가 회전하면 서로 반대방향으로 고리를 회전한 두 빛 간에는 위상 차이가 발생한다. 이 현상을 이용하여 항법장치에서 회전을 측정하는 것이 광섬유 자이로이다.

이 두 세대의 사낙간섭계를 이용한 자이로를 광학식 자이로라고 하며, 기계식 자이로에 비하여 구조와 제작기술이 간단하고, 측정범위와 동작온도범위 등의 환경조건에서 장점을 가지고 있어서, 이 보다 약 20~30년 먼저 개발되어 사용되던 기계식 자이로를 대체하여 현재 널리 사용되고 있다.

한편 1900년대 초기에 드브로이(de Broglie)는 그동안 입자로만 인식되어 오던 물질이 파동성을 갖는다고 주장하였다. 이는 데이비슨(Davisson)과 거머(Germer)가 결정격자에 의한 전자빔 회절실험을 통하여 증명하였고, 1990년대에 레이저를 이용하여 원자를 냉각시킴으로써 전자보다 훨씬 무거운 원자의 파동성이 실험적으로 증명되었다. 이를 계기로 원자의 파동성을 이용한 간섭계 연구가 활발히 추진되고 있으며, 원자광학 연구자들은 원자간섭계가 기존의 광학간섭계에 비하여 획기적인 정밀도를 나타낼 수 있을 것으로 판단하고 원자를 제어할 구성품들을 개발하고 있다. 이 새로운 개념의 제 3세대 사낙간섭계인 원자간섭계는 현재 실험실 수준에서 구현되어 관성센서로의 응용이 연구되고 있다.

본 글에서는 이러한 레이저의 발명과 광섬유의 발명에 의해서 탄생한 1, 2세대 사낙간섭계 원리를 이용한 자이로와 원자 물질파의 입증에 의하여 탄생한 3세대 사낙간섭계의 동작원리를 설명하고, 기술현황 및 발전가능성을 검토하고자 한다.

FIG. 2. Conceptual diagram of the ring laser cavity with 4 mirrors and beat signal generation with combining prism and two photo-diodes.

II. 사낙간섭계 원리를 이용한 자이로 비교 분석

2.1. 제1세대 사낙간섭계(링레이저 자이로)

2.1.1. 동작원리

폐광로를 서로 반대방향으로 진행하는 두 빛은 폐광로가 회전하는 경우에 폐광로의 길이를 서로 다르게 인식한다. 이러한 효과에 의하여 폐광로를 레이저로 발진시키면 서로 반대방향으로 발진하는 빛의 주파수간에 차이가 발생하며 이 차이는 식 (3)에서 보는바와 같이 외부에서 입력되는 회전에 비례한다.

$$\frac{1}{2\pi} \frac{d\psi}{dt} = \frac{c}{\lambda_-} - \frac{c}{\lambda_+} = n \frac{c}{L_-} - n \frac{c}{L_+} \quad (3)$$

$$= \frac{4A}{\lambda L} \Omega$$

여기서 ψ 는 서로 반대방향으로 발진하는 빛의 위상차이 (Sagnac 위상), $\lambda_{\pm}$ 는 빛의 파장, n 은 빛의 모드 수, L 은 정지 좌표계에서 측정되는 폐광로의 길이로서 $L = \sqrt{L_+ L_-}$, 그리고 A 는 링레이저가 이루는 면적이다.

이 때 발생하는 발진주파수 차이는 그림 2에서 보는 바와 같이 프리즘을 이용하여 한곳으로 모아서 맥놀이 주파수로 측정하는데 이러한 원리를 이용한 사낙간섭계가 링레이저 자이로이다^[2,3].

폐광로는 3~4개의 반사경으로 구성된 링 형태의 레이저 공진기를 이루며 He-Ne 가스에 의하여 발진되는 링 형태의 레이저로서 링레이저라고 한다. 즉 링레이저 자체가 광원과 폐광로 역할을 동시에 하므로 빛이 폐광로를 일주하는 동안의 경로차이에 의하여 발진주파수의 차이가 발생한다.

링레이저 자이로는 여러 가지 오차요인들에 의하여 식 (4)와 같은 출력 특성을 나타낸다.

$$\frac{1}{2\pi} \frac{d\psi}{dt} = \frac{4A}{\lambda L} \Omega + \tau_{21} I_+ - \tau_{12} I_- + (c/L) [\rho_2 \sin(\psi + \epsilon_2) + \rho_1 \sin(\psi - \epsilon_1)] \quad (4)$$

여기서 I_1, I_2 는 cw 및 ccw 레이저 세기, τ_{12}, τ_{21} 는 모드 당기기와 모드 밀기에 의한 효과, ρ_1, ρ_2 반사경 후방산란에 의한 진폭, ϵ_1, ϵ_2 는 후방산란에 의하여 얻어진 위상각이다.

일반적으로 링레이저 자이로는 음극 한 개에 두 개의 양극을 대칭적으로 구성하고 두 개의 양극에 흐르는 전류의 세기를 같도록 조절함으로써 $\tau_{21}I_1 = \tau_{12}I_2$ 를 이루어 내부의 가스 흐름으로 인해 발생하는 랭뮤어(Langmuir)효과를 줄일 수 있다^[4]. 링레이저 자이로의 가장 주된 오차는 산란에 의한 결합(coupling)효과이다. 산란에 의한 오차는 식 (5)와 같이 임계각속도 이하에서 출력이 나타나지 않는 lock-in 현상을 유발한다.

$$\frac{1}{2\pi} \frac{d\psi}{dt} = \frac{4A}{\lambda L} [\Omega + \Omega_L \sin(\psi + \epsilon)] \quad (5)$$

여기서 Ω_L 은 lock-in의 크기이고, ϵ 은 초기위상이다. 이 현상을 제거하기 위하여 그림 3과 같이 lock-in 크기의 약 100배 이상 진폭을 갖는 각진동을 입력에 변조하고 출력에서 복조한다. 그러면 공진기 각진동에 의하여 나타나는 자이로의 출력은 식 (6)과 같다.

$$\frac{1}{2\pi} \frac{d\psi}{dt} = \frac{4A}{\lambda L} [(\Omega + \Omega_M(t)) - \Omega_L \sin(\psi + \epsilon)] \quad (6)$$

FIG. 3. Angular vibration by laser cavity dithering; those amplitudes are much bigger than lock-in threshold.

FIG. 4. Schematic diagram of the ring laser gyroscope including the laser cavity, dither spring, and electrical modules.

여기서 Ω_M 은 변조된 정현파 각진동 입력으로서 오차의 누적을 피하기 위하여 진폭이 불규칙적으로 변화되어야 한다.

링레이저 자이로의 구성도 그림 4에서 보는바와 같이 공진기 각진동 이외에도 링레이저 자이로를 정상적으로 구동하기 위해서는 광경로 제어, 방전전류 제어, 출력신호처리 기술 등의 전자제어 및 신호처리 기술이 요구된다. 그리고 특히 성능에 직접적으로 영향을 미치는 반사경의 산란을 최소화해야 한다. 이를 위해서는 반사경 기관의 super-polishing, ion beam sputtering coating 등의 반사경 제작기술과, 반사율 및 산란을 정밀 측정기술 등이 요구된다.

2.1.2. 입출력 특성 및 장단점

링레이저 자이로의 입출력은 제어가 없는 open loop구조이며, 입력에 대한 출력은 그림 5와 같이 주파수 형태이다. 회전입력에 의하여 cw와 ccw 신호의 주파수차이 발생하고, 두 신호를 간섭시키면 주파수 차이에 해당하는 맥놀이파가 발생하여 맥놀이 파동의 수를 계수하여 출력한다.

공진기의 길이가 증가하면 동일 입력에 대하여 출력주파수가 증가하지만 그 주파수의 크기가 현재 개발된 전자소자로 충분히 측정할 수 있는 수준이다. 예를 들어서 공진기 길이가 28 cm인 링레이저 자이로의 경우에 동작범위 500 deg/sec에서도 출력 주파수가 약 1 MHz 이하이다. 이를 4배의 분해능으로 검출하더라도 4 MHz 이하로써 일반적인 counter의 속도로 충분히 측정할 수 있다. 또한 환산계수의 선형성이 타 종류의 자이로에 비하여 월등히 우월한 특성을 가지고 있다. 이 밖에도 바이어스의 안정성이 우수하며, 특히 온도에 의한 영향을 비교적 적게 받는다.

이에 비하여 링레이저 자이로는 공진기 각진동에 의한 진동과 소음이 발생하며, 레이저 방전을 위하여 약 1 KV 정도의 고전압이 요구된다는 단점이 있다.

2.1.3. 응용현황 및 발전가능성

가. 응용현황

링레이저 자이로는 전세기계적으로 관성항법장치에 가장 보편

FIG. 5. Ring laser gyroscope input-output characteristics of the 16 cm and 28 cm laser cavity lengths with beat frequency detection by 4 times resolution.

적으로 적용되는 회전측정 센서이다. Honeywell사의 GG1320 자이로는 TALIN을 비롯한 0.8 nm/hr 급의 대부분의 관성 항법장치에 적용될 뿐만 아니라 측지장비, 함정, 잠수함 등을 비롯한 초정밀 항법장치에도 적용되고 있다. 또한 동사의 GG1308 자이로는 1 deg/hr~10 deg/hr 급으로써 약 4600개/월 이상 생산되어 HG-1700을 비롯한 전술무기에 다양하게 적용되고 있다. 이밖에도 프랑스의 Sagem사와 미국의 L3-com 사 등에서 링레이저 자이로 기술을 보유하고 있으며 특히 Sagem사는 다양한 크기의 자이로를 개발하여 Honeywell사와 경쟁하고 있다. 그리고 미국의 Litton사는 ZLG라고 하는 공진기 각진동이 없는 링레이저 자이로 및 이를 적용한 관성 항법장치 LN-120G를 개발하였는데 이는 UAV, AWAX 등 진동과 소음에 취약한 20여개 무기체계에 적용되고 있다.

나. 발전전망

링레이저 자이로 기술은 현재 가장 잘 발달한 기술이나, 반사경의 산란에 의하여 발생하는 오차를 추산하여 보상함으로써 랜덤워크(random walk)를 감소시키는 lock-in 오차 보상기술^[6]과 온도 및 온도 구배에 의한 오차를 추정하여 보상하는 기술 등에 있어서 개선여지가 있다. 그리고 링레이저 자이로의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 반사경의 산란은 현재 ion beam sputtering 기술에 의하여 한계에 도달되어 있으나 추후에 이를 뛰어넘는 박막 코팅기술이 나타날 수도 있을 것이다.

2.2. 제2세대 사략간섭계(광섬유 자이로)

2.2.1. 동작원리

광섬유 고리 안에서 서로 반대방향으로 진행하는 두 빛은 외부 회전입력에 비례하는 위상차를 발생시키며, 이는 광출력 세기변화로 나타난다. 그림 6은 광섬유 자이로의 동작원리와 구조를 보여준다.

광섬유 자이로는 고리형태로 감겨진 광섬유 고리가 회전을 검출하는 폐경로 역할을 하며 여기에 외부에서 레이저광원을 두 갈래로 나누어 서로 반대방향으로 입사시킨다. 광섬유 고리가 회전하면 서로 반대방향으로 진행된 빛이 광섬유 고리를 일주하고 다시 만날 때 두 레이저 빛 간의 경로차가 발생하며, 이에 의하여 식 (7)과 같은 위상차이 $\Delta\phi_s$ 가 발생되는 원리를 이용하여 회전을 측정하는 센서가 광섬유 자이로이다^[6,7].

FIG. 6. Conceptual diagram of the fiber loop for oppositely light propagation and interference signal detector.

$$\Delta\phi_s = \frac{2\pi}{\lambda} c\Delta t = \frac{4\pi RL}{\lambda c} \Omega = \frac{8\pi A}{\lambda c} \Omega \quad (7)$$

여기서 L 은 광섬유에 의한 광경로 길이, R 은 광섬유고리의 반경, 그리고 A 는 광섬유고리가 이루는 면적이다.

이 위상차에 따라서 식 (8)과 같이 빛의 세기가 변화되는데 이상적인 경우에 경로차이가 없으면 간섭무늬의 세기가 최대가 되고, 입력각속도가 인가되면 최대점이 이동한다.

$$I = \frac{I_0}{2} (1 + \cos\Delta\phi_s) \quad (8)$$

광섬유 자이로는 입력 각속도에 대한 자이로 출력 감도가 최대가 되도록하기 위하여 주로 폐회로 제어 형태를 갖는다. 그림 7에서 보는 바와 같이 간섭신호의 최대점의 이동을 검출하기 위하여 입력에 구형파를 변조하고 출력에서 이를 복조하여 간섭신호의 이동을 검출한다. 이 신호를 이용하여 제어회로에서는 간섭신호의 최대점을 다시 원점으로 복원시키는데 이 때 복원에 필요한 전압이 회전입력에 대한 실제적인 자이로 출력이다.

폐회로 제어기를 포함한 광섬유 자이로의 구조는 그림 8에 나타내었다. 입력에 구형파를 변조하고 간섭신호의 최대점을 다시 원점으로 복원시키는 기능은 IOC(integrated optic circuit)에서 이루어지며 전기장에 의하여 고리에 입사되는 두 빛의 초기위상에 차이가 발생하도록 변경시킨다. 광섬유

FIG. 7. Conceptual view of the modulated intensity outputs change by input rotation with square wave modulation.

FIG. 8. Schematic diagram of the fiber optic gyroscope including the laser source, the fiber loops, integrated optic circuit, and electrical modules.

고리의 길이는 온도 등에 의하여 변화되는데 이 효과를 고려한 변조된 빛에 의한 위상차이는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I = \frac{I_0}{2}(1 + \cos(\Delta\phi_s + \Delta\phi_m(t)))$$

$$\Delta\phi_m(t) = \phi_m(t) - \phi_m(t - \Delta\tau) - n_{eff}L$$
(9)

여기서 n_{eff} 는 서로 반대방향으로 진행하는 빛에 대한 광섬유의 굴절율 차이이다.

2.2.2. 입출력 특성 및 장단점

광섬유 자이로의 출력은 광경로 길이차이에 의한 빛의 위상차이로서 회전입력에 의한 출력 곡선은 그림 9에 나타내었다.

그림에서 보는 바와 같이 탑재체에 동일한 회전이 인가되는 경우에 광섬유의 길이가 길수록 위상차이가 커지므로 신호대 잡음 비를 고려하면 광섬유의 길이를 길게 하는 것이 성능 측면에서 유리하다.

또한 광섬유 자이로는 제작이 간단하고 진동을 일으키는 구조가 없으며 소모전력이 작다는 장점이 있다.

그러나 반대로 광섬유의 길이가 길어질수록 재평형에 필요한 전압이 상대적으로 커지므로 출력전압의 비선형성을 고려하여 동작범위를 축소가 불가피해진다는 단점이 있다. 또한 빛의 편광에 따른 굴절율 변화에 의하여 바이어스가 변동되므로 높은 품질의 편광유지 광섬유가 필요하고, 온도변화에 의한 광경로길의 변화가 바이어스에 작용하는 영향이 비교적 크다는 단점이 있다.

2.2.3. 응용현황 및 발전가능성

가. 응용현황

개발 초기부터 광섬유 자이로가 링레이저 자이로의 성능을 능가할 수 있을 것이라고 추정되어 왔으나 아직은 주로 중저

FIG. 9. Characteristics of the fiber optic gyroscope output interference intensities by input rotation for the loop length 200 m, 500 m, 1000 m.

급 관성항법장치에 사용되고 있다.

Litton(현재 Northrop Grumman)사는 광섬유 자이로 FOG-1000 및 이를 적용한 0.8 NM/hr급 LN-260/270 등의 항법장치를 개발하였으며 이는 소음과 진동 요구조건이 비교적 까다로운 SAR와 F-16 등의 체계에 적용되고 있다.

또한 동사에서 개발한 전술급 광섬유 자이로의 대표적인 제품은 LN-200으로써 Honeywell사의 GG1308과 유사한 영역에서 응용분야를 넓혀가고 있다.

프랑스 IXSEA는 광섬유의 길이를 약 2 Km 이상으로 설계한 광섬유 자이로를 개발하여 수상함이나 잠수함에 적용하기 위한 항법장치를 개발하여 적용체계를 찾고 있으며, Honeywell은 우주 탑재체 적용을 목표로 광섬유 자이로를 개발하였다.

나. 발전전망

광섬유 자이로는 제작이 간단하고 진동을 일으키는 구조가 없으므로 향후 링레이저 자이로가 적용되고 있는 영역을 부분적으로 대체할 수 있을 것으로 보인다. 그러나 온도에 민감한 바이어스 특성과 성능을 높이기 위하여 광경로 길이를 확장하는 경우에 측정범위가 축소 되거나 환산계수 비선형성이 증가하는 현상을 극복해야 할 것으로 보인다.

2.3. 제3세대 사낙간섭계(원자간섭계)

2.3.1 동작원리

원자간섭계는 빛을 대신하여 극저온 원자의 파동성을 이용하는 간섭장치이다. 원자간섭계는 광섬유 자이로와 유사한 형태를 가지며, 두 경로로 분리된 원자 물질파가 다시 간섭을 일으키면 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\phi_{atom} = \Delta\phi/2 = \frac{4\pi A}{\lambda_a v} \Omega$$
(10)

여기서 λ_a 는 원자 물질파의 파장이고, v 는 원자의 속도이다.

원자를 약 100 K 이하로 냉각하면 원자의 속도와 파장은 m/sec 및 μm 수준이 되며, 이에 따라서 이론적인 계산에 의하면 식 (11)과 같이 원자간섭계는 광학간섭계에 비하여 약 10^{10} 배 정도 정밀측정이 가능할 것으로 보인다. 원자간섭계를 이용한 초정밀 측정은 실험실에서 부분적으로 검증되어지고 있어서 원자간섭계 원리를 이용한 관성센서기술은 관성항법장치의 성능을 획기적으로 개선할 수 있는 핵심기술로 전망되어 많은 연구가 추진되고 있다^[8,9,10].

$$\frac{\Delta\phi_{atom}}{\Delta\phi_{light}} = \frac{\lambda c}{\lambda_a v} = \frac{mc^2}{\hbar\omega} \simeq 10^{10}$$
(11)

여기서 m 은 원자의 질량, w 는 빛의 각주파수, 그리고 $\hbar$ 는 플랑크 상수이다.

원자간섭계의 주요기술은 레이저 냉각(laser cooling)과 라

FIG. 10. Conceptual view of the atom slowing (cooling) by red detuned laser absorption and spontaneous emission.

FIG. 11. Conceptual view of the atom internal energy level transition by two lasers. The laser frequency difference is same to the atom level $|1\rangle$ and $|2\rangle$.

만(Raman) 전이이다.

레이저 냉각은 그림 10에서 보는바와 같이 레이저를 향해 다가오는 원자의 내부에너지 준위가 적색편이를 일으키는 현상을 이용한다. 레이저 주파수를 적당히 이격(detuning) 시켜서 다가오는 원자와 공진되도록 하면 원자가 레이저를 흡수하면서 속도가 감소되고, 흡수된 에너지는 방향성이 없는 자발방출에 의하여 방출된다.

라만전이는 그림 11과 같이 레이저 주파수 차이가 원자의 두 에너지 준위와 같은 두 레이저를 원자에 인가하여 원자의 에너지 준위가 이동되면서 운동량의 변화를 일으키도록 하는 것이다. 레이저의 조사시간에 의하여 원자가 분리, 반사, 간섭 되는데, 이때 발생하는 원자의 상태변화는 각각 다음 식 (12)~(14)와 같다^[8].

$$|1, p\rangle \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} |1, p\rangle + \frac{-i}{\sqrt{2}} e^{-i\Phi_1} |2, p + 2\hbar k\rangle \quad (12)$$

$$|1, p\rangle \Rightarrow -ie^{i\Phi_m} |2, p + \hbar k\rangle \quad (13)$$

$$|2, p + \hbar k\rangle \Rightarrow -ie^{i\Phi_i} |1, p\rangle \quad (14)$$

여기서 p 는 원자의 운동량, Φ 는 원자 에너지의 위상, k 는 파수이다.

그림 12는 라만전이에 의한 원자빔이 분리, 반사, 간섭 개념도를 나타내었다. 원자가 초기에 $\Psi >_{Start} = |1\rangle$ 준위에 존재하다가 분리, 반사, 간섭에 의하여 최종 위치에 도달할

FIG. 12. Conceptual view of the atom interferometer by atom beam split, reflection and interference detection with Raman transition.

경우에 최종위치에서의 상태 $\Psi >_{final}$ 는 다음 식 (15)~(17)과 같다^[8].

$$\Psi >_{final} = \alpha |1\rangle + \beta |2\rangle \quad (15)$$

$$\alpha = -\frac{1}{2} \exp[i(\Phi_2 - \Phi_1)] (1 + \exp[i(\Phi_3 - 2\Phi_2 + \Phi_1)]) \quad (16)$$

$$\beta = -\frac{i}{2} \exp[-i\Phi_2] (1 - \exp[-i(\Phi_3 - 2\Phi_2 + \Phi_1)]) \quad (17)$$

여기서 Φ_1, Φ_2, Φ_3 는 분리, 반사, 간섭 각 시점에서의 원자에너지 위상이다.

그러므로 $|1\rangle, |2\rangle$ 상태에 있을 원자의 수 I_1, I_2 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_1 = |\alpha|^2 = \frac{1}{2} [1 + \cos(\Phi_3 - 2\Phi_2 + \Phi_1)] \quad (18)$$

$$I_2 = |\beta|^2 = \frac{1}{2} [1 - \cos(\Phi_3 - 2\Phi_2 + \Phi_1)] \quad (19)$$

이에 따라서 원자간섭계의 출력은 광섬유 자이로의 경우와 유사하게 식 (20)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = \frac{1}{2} (1 \pm \cos(\Delta\Phi_{atom})) \quad (20)$$

여기서 $\Delta\Phi_{atom} = \Phi_3 - 2\Phi_2 + \Phi_1$ 이다.

원자간섭계의 구성 개념도는 그림 13과 같이 원자를 냉각하는 모듈과 냉각원자를 분리, 반사, 간섭시키는 모듈, 그리고 레이저를 공급하는 레이저 생성 모듈로 구성 되어 있다.

2.3.2. 입출력 특성 및 장단점

원자간섭계의 입출력 특성은 그림 14와 같이 나타나며 광섬유 자이로와 유사한 특성을 갖는다. 다만 두 개의 원자 상

FIG. 13. Schematic diagram of the Raman atom interferometer including the laser cooling, raman transition and optical part.

FIG. 14. Characteristics of the atom interferometer outputs by input rotation for the atom velocity 30 cm/sec and closed loop area 0.01 m².

태를 독립적으로 측정해도 출력을 알 수 있다는 점이 다르며, 특히 입력의 작은 변화에도 출력은 급격히 변화된다는 점이 크게 달라졌다. 이것은 광섬유 길이가 1000 m인 광섬유 자이로에 비해서도 분해능이 약 10⁶배 이상 증가하였음을 알 수 있다. 이러한 현상은 고정적인 회전을 정밀하게 측정하는 데 있어서 큰 장점이 될 수 있다.

그러나 동시에 입력각속도가 크게 변화되는 경우에 측정값의 모호성을 일으킬 수 있다는 단점이 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 연속적인 측정을 통하여 입력의 변화 이력을 누적시키는 방법이 필요하나 레이저 냉각을 통하여 원자를 준비하는 시간이 필요하므로 현재로서는 불가능하다.

2.3.3. 응용현황 및 발전가능성

가. 응용현황

현재 미국의 Stanford 대학교, 프랑스의 SYRTE, 독일의 Leibniz 대학 등 여러 연구기관에서 회전 뿐만 아니라 중력의 정밀 측정과, 일반상대성이론 검증 등을 위하여 원자간섭

계를 연구하고 있다. 특히 미국의 DARPA에서는 PINS계획을 통하여 관성항법장치에 적용 가능한 자이로 개발을 추진하고 있다.

현재에는 대부분 실험실의 광학테이블에서 구현되고 있으며 성능은 바이어스 안정도가 60 μ deg/h, 환산계수가 5 ppm 수준이다. 그리고, 동작범위를 넓히고 소형화하기 위한 노력이 진행되고 있으며, 그 일환으로 광학격자나 원자도파로 등의 기술이 활발히 연구되고 있다^[11,12].

나. 발전전망

원자간섭계는 획기적인 정밀도를 가지고 회전을 측정할 수 있을 것으로 예측되고 있으나 항법장치에 적용되기 위해서는 아직 극복해야만 될 몇 가지 문제점을 안고 있다. 첫 번째는 측정의 연속성이 확보 되어야 한다. 이를 위해서는 한 번의 측정을 위하여 원자를 냉각시키는 데 걸리는 시간을 단축하거나, 연속적인 원자레이저가 개발되어야 한다. 둘째는 측정범위를 확대해야 한다. 이를 위해서는 원자를 구속시킨 상태에서 경로를 따라 이동시키는 기술이 필요하다. 셋째는 가속도와 회전을 명확히 구분할 수 있는 신호처리 기술이 확보되어야 한다. 원자는 빛과 달리 질량을 가지고 있으므로 회전에 의한 경로변화와 가속도에 의한 경로 변화를 명확히 구분할 수 있는 설계가 필요하다. 마지막으로 진공챔버와 레이저시스템을 효율적으로 소형화해야 한다.

III. 결 론

링레이저 자이로는 바이어스 안정성과 환산계수 선형성이 높고, 넓은 측정범위와 작은 온도민감도 등을 달성하여 현재 가장 성숙된 기술로서 전세계적으로 운행되고 있는 항법장치의 대부분에 적용되고 있다. 앞으로도 정밀한 신호처리 기술 및 반사경 개선에 의하여 성능개선의 여지가 남아 있다.

광섬유 자이로는 제작이 간단하고 진동을 일으키는 구조가 없으므로 향후 링레이저 자이로가 적용되고 있는 영역을 부분적으로 대체할 수 있을 것으로 보인다. 이를 위해서는 온도에 민감한 바이어스 특성과 성능을 높이기 위하여 광경로 길이를 확장하는 경우에 측정범위가 축소 되거나 환산계수 비선형성이 증가하는 현상을 극복해야 할 것으로 보인다. 원자간섭계는 획기적인 정밀도를 가지고 회전을 측정할 수 있으나 항법장치에 적용되기 위해서는 아직 극복해야만 될 몇 가지 문제점을 안고 있다. 첫 번째는 측정의 연속성이 확보와 측정범위를 확대가 요구된다. 둘째는 가속도와 회전을 명확히 구분할 수 있는 신호처리 기술이 확보되어야 하고, 마지막으로 진공챔버와 레이저시스템을 효율적으로 소형화해야 한다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 자기도파로, 광학격자 등과 같은 새로운 기술이 시도되고 있으므로 좀 더 지켜봐야 할 것으로 판단된다.

References

1. E. J. Post, "Sagnac effect," *Review of Modern Physics* **39**, 475-493 (1967).
2. F. Aronowitz, "The laser gyro," in *Laser Application* (Academic Press, New York, USA, 1971), vol. 1, pp. 133-199.
3. K. Bohm and R. Rodloff, "Optical rotation sensors," *Optical Sensors* **6**, 422-464 (1992).
4. T. J. Podgorski and F. Aronowitz, "Langmuir flow effect in the laser gyro," *IEEE J. Quantum Electron.* **4**, 11-17 (1968).
5. D. A. Tazates, J. G. Mark, and A. M. Calabassas, "Apparatus and method for correcting ring laser gyroscope phase error at turn around," US Patent, No.5004344, Apr. (1991).
6. R. A. Bergh, H. C. Lefevre, and H. J. Shaw, "An overview of fiber-optic gyroscope," *J. Lightwave Technol.* **2**, 91-107 (1984).
7. S. Merlo, M. Norgia, and S. Donati, "Fiber gyroscope principles," *Handbook of Fiber Optic Sensing Technology* (John Wiley & Sons Ltd, USA, 2000).
8. R. M. Godun, M. B. d'Arcy, G. S. Summy, and K. Burnett, "Prospects for atom interferometry," *Contemporary Physics* **42**, 77-95 (2001).
9. E. M. Rasel, M. K. Obethaler, and H. Batelaam, "Atom wave interferometry with diffraction gratings of light," *Physical Review Letters* **2**, 2633-2637 (1995).
10. T. T. Gustavson, A. Landragin, and M. A. Kasevitch, "Rotation sensing with a dual atom interferometer Sagnac gyroscope," *Quantum Grav.* **17**, 2385-2398 (2000).
11. N. H. Dekker and C. S. Lee, "Guiding neutral atoms on a chip," *Physical Review Letters* **84**, 1124-1127 (2000).
12. B. Canuel and F. Leduc, "Six-axis inertial sensor using cold atom interferometry," *Physical Review Letters* **97**, 010402, 1-4 (2006).