

광섬유 자이로스코프 (I)

이 석 정* · 배 정 철** · 홍 창 회***

The Fiber Optic Gyroscope (I)

Seok-Jeong Lee · Jeong-Cheul Bae** · Tchang-Hee Hong****

〈 목 차 〉

Abstract

1. 광섬유 자이로스코프의 개발배경

2. 광섬유 자이로스코프의 원리

2.1 Sagnac 효과

2.2 가역적 작동(Reciprocity)

2.3 광학적 감도 제한

2.4 신호처리

2.5. 광섬유 자이로스코프의 오차

3. 광섬유 자이로스코프의 응용

참고문헌

Abstract

Fiber optic gyroscopes must be a promising technology that can replace conventional mechanical ones based on the principle of inertia of spinning masses. The advantages of fiber optic gyroscopes over mechanical ones include low cost, light weight, compact size and fast turn-on time. We will apply them to fiber optic gyrocompass for ships. Fiber optic gyrocompass for ships requires the north-seeking accuracy of $15^\circ/\text{hr}$, earth rotation rate, or better.

This article introduces the fiber optic gyroscope as a rotation sensor in the fiber optic gyrocompass system for ships that is planed to develop in our laboratory.

* 정회원, 한국해양대학교 전자통신공학과, 박사과정

** 정회원, 한국해양대학교 전자통신공학과, 박사과정

*** 정회원, 한국해양대학교 전자통신공학과, 교수

1. 광섬유 자이로스코프의 개발배경

자이로콤파스는 선박이나 항공기와 같은 항행체가 항행을 하는데 있어서, 없어서는 안될 중요한 장비이다. 그러나 기존의 기계식 자이로콤파스는 가격이 비싸고, 무게가 무겁고 크기가 크며, 워밍업 시간이 걸리는 등의 단점이 있다. 이러한 단점들을 보완할 수 있는 새로운 형태의 자이로스코프(또는 간단히 자이로)가 바로 광섬유 자이로이고,⁽¹⁾ 광자이로스코프에는 크게 링레이저 자이로와 광섬유 자이로로 나눌 수 있으며, 본 고에서는 향후 선박이나 자동차에도 널리 이용될 것으로 전망되는 광섬유 자이로에 대하여 소개해 나가고자 한다.

1913년 Sagnac은 관성공간에 대한 회전량을 측정하기위해 Sagnac 간섭계를 제안하였고⁽²⁾, 1925년 Michelson과 Gale이 지구자전량을 측정하기 위하여 광경로 2km의 링 간섭계를 실험하였다.⁽³⁾ 이처럼 광경로를 크게 한 이유는 광경로를 크게 하면 할수록 감도가 높아지기 때문이다. 그러나 광경로를 크게하면 할수록 그만큼 전체 실험장치의 크기가 커지고 장치를 정렬하기가 힘이 들며 세팅된 장치부품마다 진동 등의 외부환경적 요인에 의한 여러가지 신호잡음들이 생기게된다. 이러한 단점들을 보완하기위하여 즉 전체장치의 크기는 작게하고 광경로는 크게하기위하여 1962년 Rosental은 폐공진경로를 따라 여러번 공진할 수 있도록 링 레이저 자이로를 제안하였고,⁽⁴⁾ 일년 후인 1963년 Macek과 Davis가 첫 시험제작하였다.⁽⁵⁾ 현재는 링레이저 자이로기술이 완숙단계에 이르러 관성항법에 많은 응용이 되고있다.^(6,7) 그러나 링레이저는 광경로를 크게하면서 장치의 크기는 작게하는 문제는 해결하였으나 거기에도 한계가 있으며 또한 정렬하기가 힘이들고 장치부품마다 잡음이 생기는 문제는 해결하지 못하였다. 그런데, 1967년 Pircher와 Hepner가 이러한 문제를 해결할 수 있는 광섬유 자이로를 제안하였다.⁽⁸⁾ 광섬유 자이로는 광경로를 크게하기위해서 단지 광섬유의 길이를 늘이면 되기때문이다. 그후 1976년에 Vale와 Shorthill이 이러한 광섬유 자이로를 최초

로 시험제작하였다.⁽⁹⁾

2. 광섬유 자이로스코프의 원리

2.1 Sagnac 효과

모든 광회전센서들은 회전 각속도 Ω 에 비례하여 광로차 ΔL 이 발생하는 효과, 소위 Sagnac효과⁽¹⁰⁾를 이용하고있다. 1913년에 G. Sagnac이 발표한 이 간섭계를 Sagnac 간섭계라 하며, 이러한 간섭무늬가 나타나는 것을 Sagnac 효과라 한다.

그림 1과 같이 회전판에 수직하는 축 주위로 각속도 Ω 로 회전하는 반경 R인 회전판이 있을 때 원주를 따라 서로 반대방향으로 진행되는 광선이 겪게 되는 광로차 ΔL 은 다음과 같다.

$$\Delta L = \frac{4A}{c_0} \Omega \quad (1)$$

여기서 A는 광로에 의해 둘러싸인 면적, 즉 $A = \pi R^2$ 이고 c_0 는 진공에서의 광속이다.

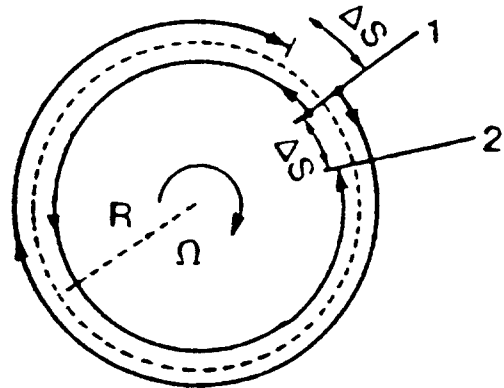


그림 1. 회전간섭계

그림 1에서 원주상의 주어진 점 1에서 동일한 빛이 원주를 따라서 시계방향(CW)과 반시계방향(CCW)으로 진행한다. 만일 회전판이 정지하고 있을 때, 즉 $\Omega = 0$ 일 때, 광속 c_0 로 진행되는 빛은

시간 $t = 2\pi R/c_0$ 동안에 동일한 거리 $2\pi R$ 을 진행한 후 출발점 1에 도달하게 될 것이다. 이제 각 속도 Ω 로 회전하고 있을 때, CCW빛은 다음 식 (2)에서와 같이 원주 $2\pi R$ 보다 짧은 거리 L_{ccw} 를 진행하고 나서 출발점인 점 2에 도달하게 된다.

$$L_{ccw} = 2\pi R - R\Omega t_{ccw} = c_{ccw}t_{ccw} \quad (2)$$

여기서 $R\Omega$ 는 링의 접선속도이고 t_{ccw} 는 거리 L_{ccw} 를 진행하는데 걸리는 시간이다. 한편, c_{ccw} 는 CCW방향의 광속을 나타내며, 진공중에서는 $c_{ccw} = c_0$ 이다. 마찬가지로 CW방향으로 진행하는 빛은 식 (3)과 같이 더 큰 원주길이 L_{cw} 를 겪게 된다.

$$L_{cw} = 2\pi R + R\Omega t_{cw} = c_{cw}t_{cw} \quad (3)$$

식 (2)와 (3)을 사용하여 각각 t_{cw} 와 t_{ccw} 에 관하여 식을 얻을 수 있고 또한 시계방향과 반시계 방향의 진행시간 차는

$$\Delta t = t_{cw} - t_{ccw} = \frac{2\pi R \cdot 2R\Omega}{c_0^2 [1 - (R\Omega/c_0)^2]}$$

이 된다. 여기서 $c_0 = 3 \times 10^8$ m/s 이고, $(R\Omega/c_0)^2$ 은 무시할 만큼 작은 값이다. 따라서 근사적으로 는

$$\Delta t = t_{cw} - t_{ccw} \approx \frac{4\pi R^2 \Omega}{c_0^2} = \frac{4A}{c_0^2} \Omega \quad (4)$$

가 되며, 그러므로 시간 Δt 동안 빛이 진행한 경로 길이 ΔL 은 식 (5)와 같이 주어진다.

$$\Delta L = c_0 \Delta t = \frac{4A}{c_0} \Omega \quad (5)$$

이것에 대한 위상 이동은 ν 를 광의 주파수라 할 때

$$\Delta \phi_s = 2\pi \nu \Delta t = 2\pi \nu (t_{cw} - t_{ccw}) \text{이다.}$$

따라서

$$\Delta \phi_s = \frac{8\pi A}{\lambda c} \Omega \quad (6)$$

이다. $\lambda (\lambda \nu = c_0)$ 는 진공 속에서 진행하는 광원의 파장이다. 진공이 아닌 어떤 굴절률 n 을 가진 다른 매질에서는 loop경과시간이 굴절률 n 만큼 증

가된다. 그러나 두 빛이 겪는 위상이동은 매질의 굴절률과 무관한 결과를 나타낸다. 이것은 Fresnel-Fizeau dragging 효과로 설명된다.⁽¹¹⁾ Sagnac 간섭계는 회전감지계의 감진 길이와 관계되어 있으므로 광섬유 회전 감지계 부분의 직경과 loop의 감진 수가 많으면 Sagnac 위상차는 증가한다. 따라서 광섬유로 회전 감지계를 구성하는 경우, 식(6)을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta \phi_s = \frac{2\pi LD}{\lambda c} \Omega \quad (7)$$

여기서 L 은 광섬유 길이, D 는 광섬유 코일의 직경, λ 는 진공 속에서의 파장이다. 관성항법 장치의 경우 10^{-2} deg/hr 정도의 회전률을 측정할 수 있어야 한다. 파장이 $1\mu\text{m}$, 광섬유 회전 감지계 coil의 직경이 0.1m 이면 10^{-2} deg/hr의 회전률을 가질 때의 위상차는 10^{-7} rad이 된다. 이것이 측정의 한계가 된다.⁽¹⁾

2.2 가역적 작동(Reciprocity)

Sagnac 위상차를 정확하게 측정하기 위해서는, 주위환경이나 다른 비가역효과 등이 생기는 요인들을 최소화 하도록 해 주어야 한다. 이러한 요인들의 제거는 자이로가 측정할 수 있는 범위의 한계를 넓혀 준다. 두 빛 사이에 광로가 다르게 되는 몇가지 요인을 살펴보자.

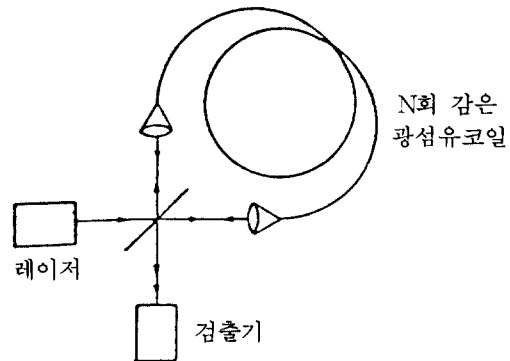


그림 2. Sagnac 간섭계

그림 2에서 CW빛은 광분할기에서 두번 반사하고, CCW빛은 광분할기를 두번 투과한다. 광분할기에서 투과와 반사가 서로 다르게 일어나면 그것들의 광로차가 다르게 된다. 또한 단일모드 광섬유를 포함한 간섭계에서 빛이 광섬유를 통과할 때 불규칙한 복굴절이나 주위환경에 의해 편광이 변하게 되므로 서로 간섭하는 빛에 대해서 동일한 광로를 주지 못한다. 이 때 나타나는 위상에러는 지구자전률에 해당하는 위상 이동에 비해 훨씬 큰 값을 갖게 된다. 위상에러를 줄이기 위해서는 광섬유를 통과한 두 빛이 같은 상태를 가져야 한다. 이러한 문제들은 그림 3과 같이 가역적 시스템(reciprocal configuration)을 구성하므로써 해결할 수 있다.⁽¹²⁾

그림 3과 같이 시스템을 구성하게 되면 빛이 광분리기를 투과와 반사할 때 CW와 CCW는 같은 위상을 갖고 같은 모드로 진행한다. 편광에 대한 효과는 그림에서처럼 편광기를 같은 입/출력단에 놓으면 두 빛이 동일한 편광을 갖게되어 편광 변화에 의한 광로차를 없애 준다. 이상적으로 제작한 편광기를 통과하여 돌아온 두 빛은 광섬유의 복굴절에 의한 위상차가 나타나지 않는다. 그러나 실제로 사용되는 편광기는 이상적으로 만들 수 없으므로 광섬유의 복굴절에 의해 작은 양의

위상에러를 발생한다.⁽¹³⁾ 이것은 편광기의 소광률(extinction ratio)에 관계되어 있으며, 제거하고자하는 편광의 진폭 투과율을 ϵ 라 하면, 이상적인 편광기는 $\epsilon = 0$ 이다. 편광에 대한 효과를 줄이는 또 다른 방법은 비편광 광원을 사용하는 것이다. 간섭계에서 광섬유에 존재하는 두 개의 편광 모드는 동일한 효과로 간섭을 한다. 따라서 한 모드로부터 나타나는 에러는 다른 모드에 의해 상쇄된다. 이러한 문제는 편광정도에 따라서 거의 완전하게 위상 에러를 상쇄시킬 수 있다. 위와 같은 문제의 해결로써 나타난 것이 선풍이 넓은 광원과 편광유지 광섬유를 사용하는 것이다. 이것은 간섭성 길이가 짧고 편광상태가 유지되므로 편광의 cross-coupling에 대한 에러를 줄일 수 있다.

2.3 광학적 감도 제한

앞에서 살펴본 바와 같이 광섬유 자이로에는 회전에 의한 Sagnac 위상차 외에 비가역 효과에 의한 위상 에러가 나타난다. 이러한 비가역 위상차는 여러가지 광학적 현상들로 자이로의 회전 감지계 부분이 미소회전 할 경우 Sagnac 위상차와 구별을 할 수가 없다. 비가역 위상차를 발생시키는 중요한 요소로는 Rayleigh 후방산란^(14,15), optical

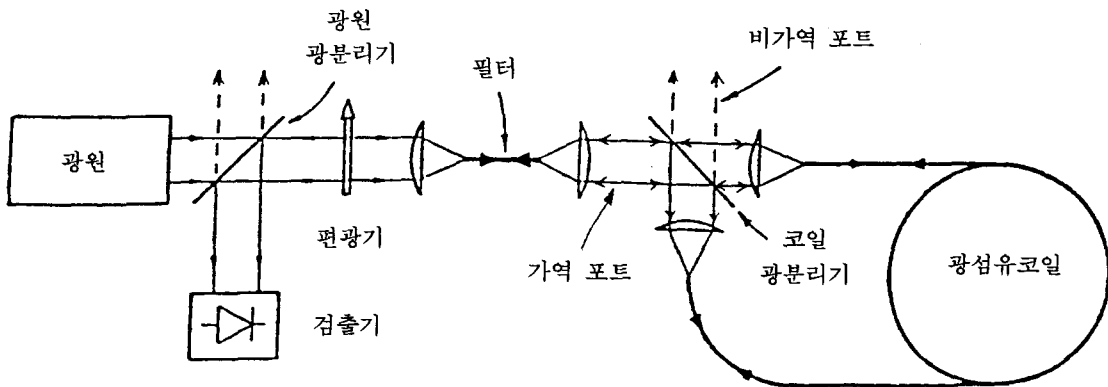


그림 3. Sagnac 간섭계의 가역적구성

Kerr 효과⁽¹⁶⁻¹⁸⁾, Faraday 효과⁽¹⁹⁾, 시간에 따른 주위 환경의 변화⁽²⁰⁻²²⁾ 등이 있다. 또한 기본적인 감도에 제한을 주는 요소로서, 광자의 양자화 잡음과 광검출기의 shot noise를 들 수 있다⁽²³⁾.

광섬유 자이로에서 회전감지계가 회전하게되면 두 역방향으로 진행되는 빛들 사이에 비가역 위상이동이 생기게 되며, 이것을 광검출기에서 측정하게 된다. 회전에 의한 비가역 위상이동 외에도, 광섬유 특성이나 광학적 성질 등에 의해 비가역 위상이동이 생기게 된다. 이 요인들은 Rayleigh 후방산란, 광섬유 복굴절에 의한 편광 상태의 변화, 광학적 Kerr효과 등으로서 측정값에 대해 중대한 어려로 작용하는데 적당한 광원과 시스템을 최적 조건으로 설계하면 이러한 비가역 효과를 줄이거나 제거시킬 수 있다. 일반 광섬유를 사용할 때 나타나는 문제점은, 시간에 따라 외부 환경 등의 변화나 광섬유의 복굴절 성질 때문에 나타나는 편광의 cross-coupling에 의해 비가역 위상차가 발생한다는 점이다. 자이로와 같은 간섭계형 센서에서는 편광에 의한 에러가 원래의 신호와 구별이 잘 되지 않으므로 이러한 문제들을 해결해야 한다. 이 해결책으로 개발된 것이 편광유지 광섬유이다. 이 광섬유를 사용하여 자이로를 구성하게 되면 빛이 광섬유 속을 진행하면서 계속 동일한 편광이 유지되므로 편광의 cross-coupling 등에 의한 비가역 위상차를 줄일 수 있고, 따라서 자이로의 감도를 향상시킬 수 있다.⁽²⁵⁾

2.4 신호처리⁽²⁵⁾

광섬유 자이로에서 높은 감도와 넓은 대역폭을 얻기 위하여 여러가지 신호처리 방식이 연구되어 왔다. 신호처리 방법에는 크게 개회로(open loop) 방법과 폐회로(closed loop)방법이 있으며, 최근에 제안된 것으로 synthetic heterodyne 방법과 이것을 개량한 디지털 신호처리방법이 도입되었다.

폐회로(closed loop)시스템에서는 회전에 의해 생긴 Sagnac 위상변화를 광섬유 감지기 내부에 비가역적 위상변화를 보상해주는 소자를 넣어서 비가역적 위상변화를 보상해주면 이 보상해주는

비가역적 위상변화량이 바로 Sagnac 위상변화가 된다. 그러나 이러한 전기적 혹은 광학적 feedback 소자를 자이로 내부에 넣을 경우 완전하게 광섬유만으로 이루어진 자이로를 구성하기가 어려워 광손실 및 외부의 영향으로 인한 잡음 등의 문제점이 발생하게 된다. 또한 이러한 feedback 소자를 고안하기가 힘들 뿐 아니라 구조가 복잡해지며, 폐회로(closed loop)의 경우 좋은 감도를 얻기가 어려운 단점이 있다.

개회로(open loop)시스템의 경우 Sagnac 위상변화는 광신호 검출기의 전류를 신호처리하여 측정한다. 이러한 접근방법은 광섬유 자이로에 PZT와 같은 좁은 대역폭을 가지는 위상변조기만 넣으면 되므로 구성이 간단해지고 따라서 광손실이 줄어들며 완전히 광섬유만으로 구성된 자이로를 손쉽게 구성할 수 있다. 이러한 개회로(open loop)시스템의 경우 높은 감도를 얻을 수 있으나 좁은 다이내믹레인지가 문제점으로 등장한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 single side band측정을 개회로(open loop) 자이로에 적용하는 방법이 있으나 이 경우 넓은 대역폭을 가지는 위상변조기가 필요하고 이것을 완전히 광섬유로 구성하기는 곤란하다는 단점이 있다. 그러나 최근 제안된 synthetic heterodyne시스템의 경우 좁은 대역폭을 갖는 PZT위상변조기를 이용한 평범한 개회로(open loop) 자이로에 광검출기 출력전류에 사각파를 곱해주어 그것의 조화파만 검출하여 광학적 위상변화를 낮은 주파수의 전기적 위상변화로 바꾸므로 Sagnac 위상변화를 측정하는 것이다. 이러한 방법의 잇점은 첫째, 개회로 시스템의 장점인 높은 감도를 계속 유지하는 것이다. 둘째로 넓은 다이내믹레인지를 가지는 장점이 있다. 이 방법은 아날로그 스위치 또는 multiplier와 전기적 밴드패스 필터를 이용하여 구성하게 된다. 그러나 이러한 아날로그 소자들의 결점인 온도 의존성과 drift문제로 회로의 안정성에 문제가 생기게 된다. 그리고 전기적 위상차를 정확히 측정하는 것이 어려운 난점이 있다. 따라서 synthetic heterodyne 검출방법을 개량하여 디지털로 신호처리하는 것을 필요로 한다. 이러한 신호처리 방법들은 넓은 다

이나믹레이저를 얻기 위해 계속 연구가 진행되고 있다.

2.5. 광섬유 자이로스코프의 오차

광섬유 자이로는 각속도 센서로서 회전에 의한 회전각속도 입력과 출력은 비례관계에 있지만, 현실에는 여러가지의 요인으로 오차가 생긴다.

1) 분해능

분해능은 각각의 각속도 입력에서 어느 만큼 작은 각속도를 검출할 수 있는가를 나타내는 특성으로 분해능이 나쁘면 완만한 커브에서의 출력각도에 오차가 발생한다. 예를 들면 분해능 $0.1^\circ/s$ 의 경우 10초간 선회하면 오차는 1° 가 된다. 직선에 가까운 완만한 커브를 고려하면 $0.05^\circ/s$ 의 분해능이 필요하다.

2) bias 오차

영점 즉 정지시의 자이로 출력을 bias오차라고 한다. 이 오차가 있으면, 항해체가 완전히 정지해 있어도, 그 장소에서 회전하고 있는 것 같은 오차가 발생하며, bias 오차가 $0.05^\circ/s$ 가 되면 1시간 만에 방향이 거꾸로 향하고 있는 것으로 된다. 항법용으로는 $0.01^\circ/s$ 이하가 바람직하고, 그이하이면 방향의 편차보정이 쉽다.

3) scale 오차

scale 오차는 입출력의 비례계수의 오차이다. 그 오차가 단순한 정수이면 보정이 용이 하지만 꼬불꼬불하게 좌우로 선회가 많으면 좌회전과 우회전의 불균형이 생기고 이 차이가 축적되어서 방향이 점차로 비틀어지는 원인이 된다.⁽²⁴⁾

3. 광섬유 자이로스코프의 응용

광섬유를 이용한 센서는 소형이면서 손쉽게 구성할 수 있으므로 그 응용범위가 확대되어 여러 산업 전반에 걸쳐 응용이 기대되고 있다. 광섬유 센서에는 광섬유 자이로를 비롯하여 전류센서, 전

압센서, 자기센서, 압력센서 등 많은 분야가 있다. 특히 광섬유 자이로는 광섬유 센서 중에서 가장 대표할 만한 것이다. 광섬유 자이로는 군사용, 산업용 등 그 응용범위가 매우 넓으며, 기존의 기계식 자이로나 링 레이저 자이로에 비해 부피가 작고, 견고하게 만들 수 있으며, 수명이 길다. 최근에는 광섬유 자이로를 소형화하여 자동차 항법 장치에 이용하려는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 또한 실험을 거쳐 실용화 단계에 이르렀다.⁽²⁴⁾

현재 관성항법에서 사용될 수 있는 자이로의 감도는 0.01 deg/hr 정도이다. 광섬유 자이로에서도 관성항법에서 요구하는 수준까지 이르게 되었는데, 이는 광섬유 자이로에 들어가는 모든 소자들(방향성 결합기, 편광기, 편광조절기, 위상변조기 등)이 광섬유로 개발되어져 있어서 빛이 자이로 시스템을 불연속점이 없이 통과하여 광 검출기에 도달할 수 있기 때문이다.

한편, 선박용 자이로컴파스로 이용될 때에는 지구의 자전속도($15^\circ/hr$)에 의한 Sagnac효과를 측정하여 진북을 찾아내도록 하면 되는데, 이 때 광섬유 회전면은 위도에 따라서는 약간 다르지만 지표면과 거의 수직이 되게 배치되어야 한다. 광섬유 회전축이 지자오선에 평행할 때 최대의 Sagnac효과를, 반대로 회전축이 지자오선에 수직일 때에는 최소의 Sagnac효과가 얻어지므로 이는 정북일 때 최대, 정동일 때 최소의 전압출력을 얻어내는 결과가 된다. 따라서, 선박에 사용되는 광섬유 자이로의 분해능은 지구의 자전속도만 측정할 수 있으면 된다. 즉, 지구의 자전 각속도는 $15^\circ/hr$ 정도이므로 선박용 광섬유 자이로컴파스의 감도는 관성항법부에 비하여 훨씬 낮더라도 훌륭한 자이로컴파스를 꾸며볼 수가 있다.

참고문헌

1. S. Ezekiel and H.J. Arditty, "Fiber-Optic Rotation Sensors and Related Technologies", Proceedings of the 1st International Conference, Springer Series in Optical Sciences, Vol.32, 1981, pp.3-5.

2. Sagnac, G., "L'éther lumineux démontré par l'effet du vent relatif d'éther dans un interférence de l'interféromètre en rotation uniforme," *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, Vol.95, 1913, pp. 708-710.
Sagnac, G., "Sur la preuve de la réalité de l'éther lumineux par l'expérience de l'interférographe tournant," *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, Vol.95, 1913, pp. 1410-1413.
3. Michelson, A.A., and H.G. Gale, *Journal of Astrophysics*, Vol.61, 1925, pp.401.
4. Rosenthal, A.H., "Regenerative Circulatory Multiple Beam Interferometry for the Study of Light Propagation Effects," *J.O.S.A.*, Vol.52, 1962, pp.1143- 1148.
5. Macek, W.M., and D.T.M. Davis, "Rotation-Rate Sensing With Travelling- Wave Ring Lasers," *Applied Physics Letters*, Vol.2, 1963, pp.67-68.
6. Ezekiel, S., and G.E.Knausenberger, eds., "Laser Inertial Rotation Sensors," *SPIE Proceedings*, Vol.157, 1978.
7. Chow, W.W, J. Gea-Banacloche, L.M. Pedrotti, V.E. Sanders, W. Schleich, and M.O. Scully, "The Ring Laser Gyro," *Review of Modern Physics*, Vol. 57, 1985, pp.61.
8. Fircher, G., and G. Hepner, "Perfectionnements aux dispositifs du type gyromètre interférométrique à laser," *French patent 1.563.720*, 1967.
9. Vali, V., and R.W. Shorthill, "Fiber Ring Interferometer," *Applied Optics*, Vol.15, 1976, pp.1099-1100(SPIE, MS8, pp.135-136).
10. E.J. Post, *Rev. Mod. Phys.* 39, 475, 1967; H.J. Arditty and H.C. Lefèvre, *Optics Lett.* 6, 401, 1981.
11. B. Malo et al, "Ultraviolet light photosensitivity in Ge-doped silica fibers: wavelength dependence of the light-induced index change", *Opt. Lett.* 15, 953-955, 1990.
12. Ulrich, R., "Fiber-Optic Rotation Sensing With Low Drift," *Optics Letters*, Vol.5, 1980, pp.173-175(SPIE MS 8, pp.170-172).
13. J.A. Greene, A. M. Vengsarkar, and K. A. Murphy, "Properties of two-mode grating", *Electron.Lett.* 28, 1847-1848, 1992.
14. S. E. Kanellopoul, V. A. Hanerek, and A. J. Rogers, "Photoinduced polarisation couplers in elliptical core optical fibres written using 532 and 266nm sources", *Electron.Lett.* 28, 1558-1560, 1992.
15. A. Kamal et al., "Holographically written reflective polarization filter in single-mode optical fibers", *Opt.Lett.* 17, 1189-1191, 1992.
16. F. Ouellette, "Phase matching of optical fibre photorefractive intermodal couplers in infra-red", *Electron.Lett.* 25, 1590-1592, 1989.
17. K O. Hill et al., "Efficient mode conversion in telecommunication fibre using externally written gratings", *Electron. Lett.* 26, 1270-1272, 1990.
18. F. Bilodeau et al., "Efficient, narrowband LP₀₁-LP₀₁ mode converters fabricated in photosensitive fibre: Spectral response", *Electron.Lett.* 27, 682-684, 1991.
19. F. Bilodeau et al., "Ultraviolet-light photosensitivity in Er³⁺-Ge doped optical fiber", *Electron.Lett.* 15, 1138-1140, 1990.
20. A. M. Vengsarkar, J. A. Greene, and K. A. Murphy, "Photoinduced refractive-index changes in two-mode, elliptical-core fibres: sensing applications", *Opt.Lett.* 16, 1541-1543, 1991.
21. S. LaRoche et al., "Photosensitive op-

- tical fibers used as vibration sensors, *Opt.Lett.* 15, 399-401, 1990.
22. A. M. Vengsarkar, J. A. Greene, B. R. Fogg and K. A. Murphy, "Spatially wighted, grating-based, two-mode, elliptical-core fibres vibration sensors", *Opt.Lett.* 16, 1707-1709, 1991.
23. C. P. Kuo, U. Osterberg, and G. I. Stegeman, "Long wavelength cutoff photo-induced gratings in photosensitive glass fibers", *Appl. Opt.* 29, 4430-4431, 1990.
24. Hirokazu Soekawa et al., "Fiber Optic Gyroscope for Vehicle Navigation System", Hitachi Cable No.13,1994.
25. Hervé Lefèvre, "The Fiber-Optic Gyroscope", Artech House,Inc, 1993, pp.1~2.