

광섬유 자이로스코프(Ⅱ)

이석정* · 배정철** · 홍창희***

The Fiber Optic Gyroscope (Ⅱ)

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

〈목 차〉

Abstract

1. 머릿말

2. 링레이저 자이로

2-1 Lock-in

2-2 Scale factor의 변동

2-3 바이어스의 변동

3. 광섬유 자이로

3-1 설계상의 문제점

3-1-1 잡음요인의 종류

3-1-2 광학바이어스

3-1-3 비가역잡음

3-1-4 샷트잡음 및 광원의 coherency

3-2 광섬유 자이로의 종류

3-2-1 DC바이어스법

3-2-2 위상변조형

3-2-3 주파수변조형

3-2-4 Heterodyne형

3-2-5 수동공진형

4. 맺음말

참고문헌

Abstract

Various types of optical gyroscopes have been proposed and researched to the present in the world. This paper provides an overview of the types of optical gyroscopes, and also introduces technical principles, characteristics, advantages and disadvantages for each type. Moreover, the critical problems in a design have been discussed.

1. 머릿말

전 항해학회지에 실린 광섬유 자이로스코프(Ⅰ)에는 원리를 비롯해서 광섬유 자이로스코프에 관

하여 전반적으로 간략하게 서술하였다. 이번에는 전세계적으로 지금까지 연구되어오고 있는 광자이로스코프의 여러가지 구성방식을 분류하고 각각의 구성특징과 장단점을 기술한다. 그리고 설계

* 종신회원, 한국해양대학교 전자통신공학과, 박사과정

** 정회원, 한국해양대학교 전자통신공학과, 박사과정

*** 정회원, 한국해양대학교 전자통신공학과, 교수

상의 문제점과 가장 실용적인 모델을 살펴본다.

먼저 광자이로를 출력을 검출하는 방식에 따라 분류해보면 다음과 같다. 광자이로는 각속도의 크기를 검출하는 것으로서, 시계 방향(CW)의 광파와 반시계 방향(CCW)의 광파 간의 발진 주파수차(Δf)로서 출력을 검출하는 링공진기형과 위상차($\Delta \phi$)로서 검출하는 간섭계형으로 대별할 수 있다. 전자는 능동형 링공진기와 수동형 링공진기

방식으로 구분할 수 있다. 여기서 능동형 링공진기 방식에는 링레이저 자이로(RLG)가 있으며, 수동형 링공진기 방식에는 광섬유 방식과 집적광학 방식이 있다. 링레이저 자이로에는 주파수 방식에 따라 2주파수 방식과 4주파수 방식이 있고 바이어스방법에 따라 2주파수 방식은 기계적 진동 방식과 자기미러 방식으로 나눌 수 있으며 4주파수 방식은 Faraday효과 방식과 Zeeman효과 방식으

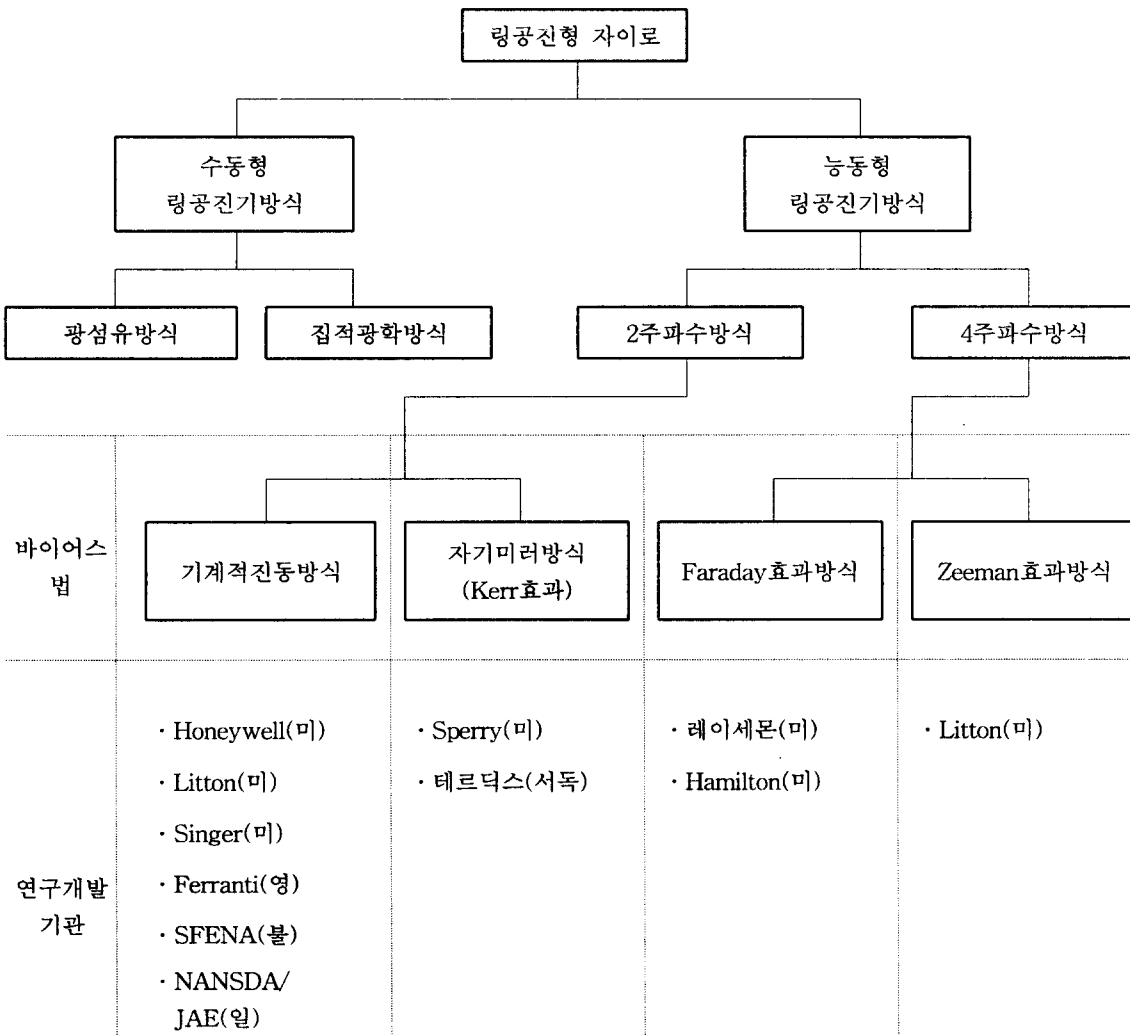


그림 1. 링공진기형 자이로의 분류

로 나눌 수 있다.

한편 광섬유자이로는 수동형 링공진기 방식과 간섭계형 방식으로 분류된다. 수동형 링공진기 방식은 광섬유 링공진기의 구성에 따라서 개회로형과 폐회로형으로 분류되며 간섭계형은 변조방식에 따라서 DC바이어스형, 위상변조형, 주파수변조형과 heterodyne검파형으로 나눌 수 있다. 또한 부품구성에 따라서 일반 광부품을 그대로 이용하는 Bulk optic형, crystal에 광부품을 집적화하는 집적광학형과 광섬유부품을 이용하여 in-line으로 구성하는 전체 광섬유화 방식이 있다.

2. 링레이저 자이로

링레이저 자이로(RLG)는 자이로 블록의 내부, 즉 cavity에서 레이저를 자가발전시키고 있기 때문에, 입력 각속도가 작게되어 주파수차가 200Hz(0.1°/s) 정도로 되고 CW와 CCW의 빛은 후방산란에 의한 당김현상을 일으켜 주파수차를 0으로 하는 것과 같은 상호작용이 생긴다. 이 현상을 Lock-in이라고 하고, Lock-in 영역에서는 RLG출력이 0으로 되는 불감대를 가진다. 이것이 RLG의 최대의 단점이다. 이 Lock-in 현상을 막기 위해, Lock-in 주파수 이상의 주파수를 항상 갖게 하도록 바이어스 주파수를 가하여 Lock-in 현상을 극복하는 방법을 바이어스법이라고 한다. 이 바이어스법의 종류를 포함하여, 링공진기형만 분류한⁽¹⁾ 것이 그림 1이다. 현재 실용화 되고 있는 RLG는 기계적 진동방식이다. 이 방식은 가장 단순하여, 내 환경성이 우수하고 신뢰성이 높다.

RLG에 사용하는 링레이저는 삼각형(Honeywell사, Singer사와 일본에서 개발)과 사각형⁽²⁾ (Litton사)이 있지만, 여기서는 이등변 삼각형의 링레이저로 구성되어 있는 RLG의 구성⁽³⁾에 관해서 설명한다.

그림 3를 보면, RLG는 음극1, 양극2의 방식(음극2, 양극1도 좋음)으로 되는 방전전류제어계, 발진주파수(빛의 파장)의 안정화를 위한 광로길이 제어계, dither 구동회로를 포함하는 Lock-in 제어계 및 광학검출계로 구성되고 있다.

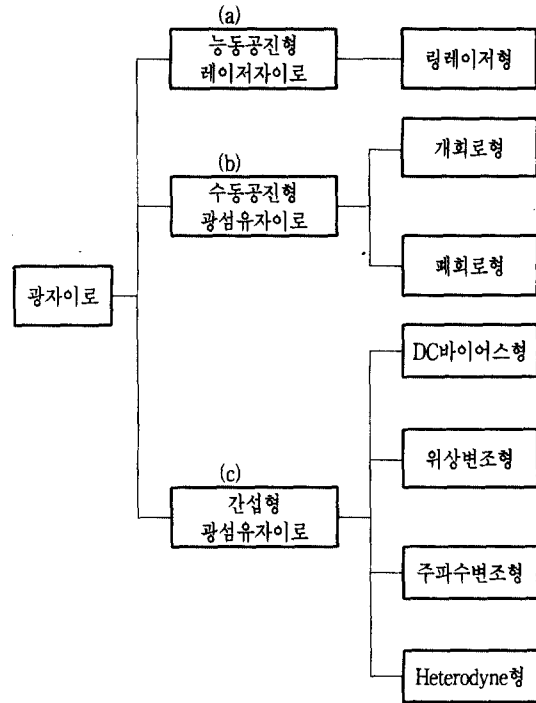


그림 2. 광섬유 자이로의 분류

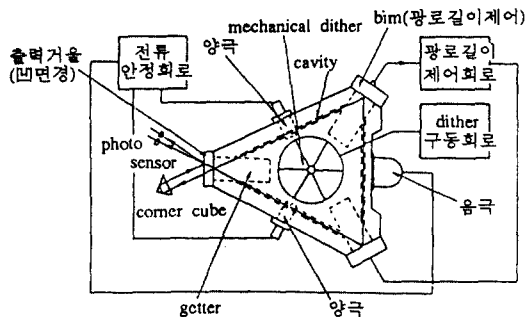


그림 3. RLG의 구조

다음은 RLG의 주요 문제점에 관해서 서술한다.

2-1 Lock-in

Lock-in rate(Ω_L)와 RLG성능은 밀접한 관련이

있고, 시계 방향(CW)의 광파와 반시계 방향(CCW)의 광파 간의 발진 주파수차(Δf)는 근사적으로 다음과 같이 나타내어진다.⁽⁴⁾

$$\Delta f = \frac{4A}{\lambda L} \Omega \sqrt{1 - \left(\frac{\Omega_L}{\Omega}\right)^2}$$

$$\Omega_L = \frac{r_s c \lambda^2}{32\pi A d} \quad (1)$$

여기서 r_s 는 거울의 산란 계수, d 는 cavity의 직경이다.

Lock-in을 보상하기 위하여, 그림 4에 나타낸 것처럼 기계적 진동을 첨가하여, Low rate 영역으로 보상하기 위한 것이지만, 이러한 dither을 첨가하면 random walk(R_w)현상이 나타난다. R_w 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.⁽⁵⁾

$$R_w = \sqrt{\frac{K}{2\pi}} \frac{\Omega_L}{\sqrt{\Omega_D}} \quad (2)$$

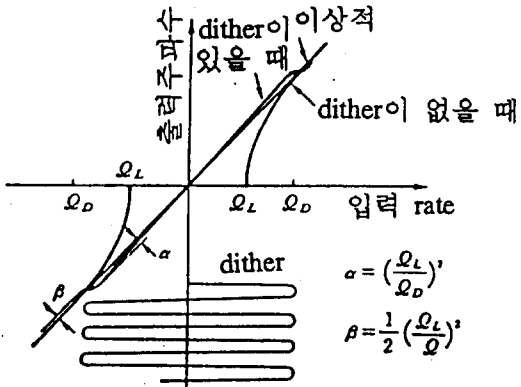


그림 4. RLG의 입출력 특성

여기서 K 는 scale factor, Ω_D 는 dither rate이다. 식(1)과 식(2)이 나타낸 것처럼, RLG의 성능 향상에는, Lock-in rate(Ω_L)를 가능한 한 작게 할 필요가 있다.

2-2 Scale factor의 변동

scale factor 즉 감도의 변동은 주로 방전 전류의 unbalance와 dither에 의한 Lock-in보정에 의한 것이다. 전자는 광로길이 제어에 의존한다. 후자는 식(1)과 그림 4를 참조하여

$$\Omega \leq \Omega_D$$

$$\frac{\Delta K}{K} = \left(\frac{\Omega_L}{\Omega_D}\right)^2$$

$$\Omega > \Omega_D \quad (3)^{(6)}$$

$$\frac{\Delta K}{K} = -\frac{1}{2} \left(\frac{\Omega_L}{\Omega}\right)^2$$

로 나타내어지지만, 결국 광로 길이제어를 충분히 행할 필요가 있다.

2-3 바이어스의 변동

RLG의 null shift(영점의 변동)의 주요인은 레이저 매질의 가스흐름에 의하며 이것은 방전전류의 차와 cavity에 대한 레이저 광로의 위치 관계에 기인한 비대칭성에 의한다. 또 공진주파수의 변화가 직접적으로 영향을 준다. 따라서 전원의 고안정화는 물론, 방전전류제어도 함께 광로의 변동에 영향을 준다.

3. 광섬유 자이로

이상적 상황에 있어서의 광자이로의 감도를 추정해 두는 것은 구체적 설계의 지침을 준다. 그림 2는 광학자이로의 기본적 분류를 나타내었다. (a)는 링레이저 자이로(RLG)인 능동공진기이며, (b)는 레이저 광을 외부로부터 링공진기에 도입하는 수동공진기이고 (c)는 간섭계형이다. 여기서 링레이저 자이로라고 불리우는 것은 (a)이고, 광섬유 자이로는 (b)와 (c)이다. Sagnac효과는 (a), (b)의 경우에는 광의 주파수변화, (c)는 위상변화로서 나타내어진다. 각각의 회전 검출의 한계 즉 Ω 의

불확정성 $\Delta\Omega$ 는 다음 식으로 주어진다.⁽⁷⁾

$$(a) \Delta\Omega \approx \frac{\lambda P}{4A} \frac{\Delta\nu}{\sqrt{n_p t}} \approx 0.006 \text{ deg/hr} \quad (4)$$

$$(b) \Delta\Omega = \frac{\lambda P}{4A} \frac{\Delta\nu}{\sqrt{n_p \eta D t}} \approx 0.01 \text{ deg/hr} \quad (5)$$

$$(c) \Delta\Omega = \frac{c_0}{LD} \frac{\lambda/2}{\sqrt{n_p \eta D t}} \approx 0.006 \text{ deg/hr} \quad (6)$$

여기서, $A=100\text{cm}^2$ (링을 둘러싼 면적), $P=35\text{cm}$ (링의 광로길이), $n_p=3 \times 10^{15}$ photon/sec (1mW, 레이저의 photon수), $L=1\text{km}$ (광섬유길이), $\Delta\nu=300\text{KHz}$ (공진기내의 레이저 스펙트럼 폭), $\eta_D=0.3$ photon/sec(광검출기에의 photon 수), $\tau=1\text{sec}$ ($B=0.5$ Hz, 광검출기의 시정수 또는 대역폭), $D=11.3\text{cm}$ (링의 직경)이다.

식(4)~(5)에서 알 수 있듯이 링레이저 자이로는 레이저의 자연방출에 의해 결정되고, 광섬유 자이로의 경우에는 광검출기의 shot noise에 의해 결정된다. 그림 5는 광섬유 자이로의 광섬유 길이에 대한 random drift를 각 파장에 관해서 계산한 결과이다⁽⁸⁾. 광섬유 길이가 1km 이상으로 되면 광섬유의 전달손실의 영향이 강하게 나타난다. 우선의 목표로서 광섬유의 손실을 α (dB/km)로 하면 $\alpha L=8.7\text{dB}$ 가 최적치로 되어있다. 그러나 광섬유를 길게하면 외부의 영향을 쉽게 받기 때문에,

이상은 어디까지나 지침으로서 생각하면 좋다.

광섬유 자이로에 있어서 random drift $\Omega_d(\text{deg}/\sqrt{h})$ 는 평균감도 $\Omega_{rms}(\text{deg}/h)$ 와 검출계의 대역폭 $B(=Vt$: 시정수)로부터 $\Omega_d=\Omega_{rms}/\sqrt{B}$ 로 나타내어진다.⁽⁹⁾ 이 drift는 비교적 단시간의 현상이지만, 실제로는 장시간의 scale factor의 변동도 고려하지 않으면 안된다.

이하에 현재 실용화에 아주 가까워진 간섭형 광섬유 자이로를 중심으로 설계상의 문제점에 관해서 서술한다.

3-1 광섬유 자이로의 설계상의 문제점

3-1-1 잡음요인의 종류

그림 6에 간섭계형 광섬유 자이로의 기본구성과 광섬유 자이로의 감도열화 및 드리프트 요인을 나타내었다. 이들 요인은 다음과 같다.^{(9),(10)}

- i) 레이저 광원 : 레이저의 진폭변동, 주파수변동, 레이저 편파변동, 샷잡음
- ii) 광검출기 : 샷잡음, 부하저항 열잡음
- iii) 광섬유 : 후방산란, 반사, 온도구배, 편파변동, 패러데이효과
- iv) 3dB 광결합기 : 결합기의 온도변동
- v) 광학 바이어스 소자 : 바이어스 소자의 온도, 광섬유와의 접촉오차

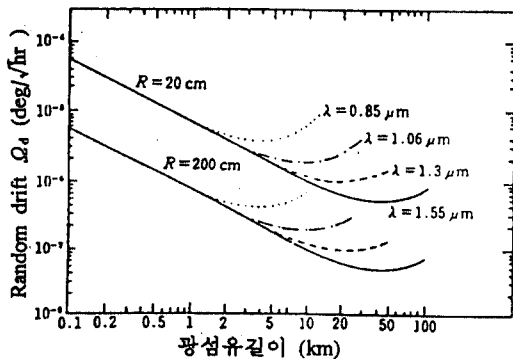


그림 5. 광섬유 자이로의 광섬유 길이와 random drift의 관계

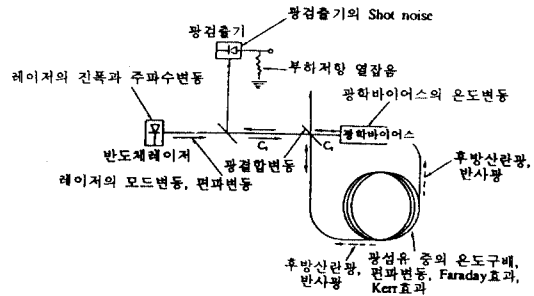


그림 6. 간섭계형 광섬유 자이로스코프의 기본구성과 잡음

3-1-2 광학바이어스

간섭계형 광섬유 자이로의 기본형에서는 그림 7 (a)에 나타난 것처럼 출력광은 $I=(I_0/2)(1+\cos \Delta \varphi)$ 로서 변화한다. 여기에는 $\Delta \varphi \rightarrow 0$ 즉, 저속회전에서는 $dI/d\Delta \varphi \rightarrow 0$ 로 되어 불감상태로 된다. 여기서 $I=(I_0/2)(1 \pm \sin \Delta \varphi)$ 로 되도록, 즉 그림 7 (b)에 나타난 것처럼 비가역인 $\pi/2$ 의 광학바이어스를 설치한다.

광섬유를 진행하는 광은 $\varphi = knL$ (k:광의 파수)의 위상차를 갖는다. $\Delta \varphi = \varphi_우 - \varphi_좌 = \pi/2$ 가 되는 광학바이어스는 광섬유를 진행하고 지연($5 \mu \text{ sec/km}$)을 이용하면 용이하게 얻어진다.

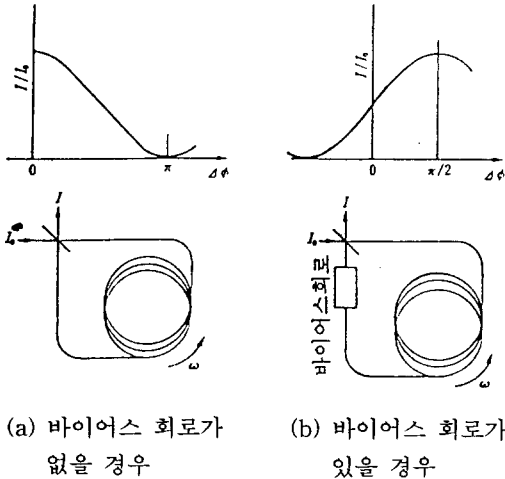


그림 7. 간섭계형 광섬유 자이로의 광학 바이어스의 효과

바이어스를 거는 방법으로서 DC바이어스와 AC바이어스의 2종류가 있다. DC바이어스법으로는 faraday회전법이나 직교편파법이 있지만, 온도 변동이나 쇼트잡음의 영향이 크기 때문에 현재는 전부 AC바이어스법이 채용되고 있다. AC바이어스는 3dB coupler의 근방의 한편의 arm에서 위상 변조 또는 주파수 변조를 행하는 것에 의해 얻어진다. 위상 변조는 광섬유를 PZT진동자에 감아서 광섬유의 신축을 행하게 하는 방법이나 LiNbO₃

등의 전기광학결정을 이용하는 방법으로 정해지고 있다.

현재 실용에 거의 가까운 위상변조에 의한 AC바이어스법에 관해서 고찰해 보자. 그림 7 (b)의 광학바이어스 회로에 변조도(진폭) α_m , 주파수 f_m 으로 $\alpha_m \cos 2\pi f_m t$ 인 위상변조가 가해지면, 출력 강도는 다음식으로 주어진다.⁽⁸⁾

$$I = I_0 \cos^2(\Delta \varphi - \alpha_m \sin \phi_T \sin 2\pi f_m t_0) \quad (7)$$

여기서, $\phi_T = \pi f_m T$, $t_0 = t + T/2$, $T = L/c$ 이다. 식(7)을 전개하면 다음과 같이 된다.

$$I = \frac{I_0}{2} [1 + J_0(\eta) \cos 2\Delta \phi + I_0 J_1(\eta) \sin 2\Delta \phi \sin 2\pi f_m t_0 + I_0 J_2(\eta) \cos 2\Delta \phi \sin 4\pi f_m t_0 + \dots] \quad (8)$$

여기서 $J_i(\eta)$ 은 i 차 Bessel함수이고, $\eta = 2\alpha_m \sin \phi_T$ 는 변조지수이다. 여기서 f_m 을 동기검파하면 PSD의 출력신호는

$$I = I_0 J_1(\eta) \sin 2\Delta \phi \quad (9)$$

로 된다. 위상변조기의 진폭 α_m 을 $\eta = 1.84$ 가 되도록 하면 $J_1(\eta)$ 는 최대로 되고 감도도 최대로 된다.

3-1-3 비가역잡음

광섬유 자이로에서는 2개의 광이 모두 같은 광로를 지나도록 하지 않으면 비가역적인 광학 바이어스가 더욱 부여되어 최대감도의 바이어스 포인트가 뒤떨린다. 비가역광학적 바이어스는 먼저 3dB coupler에서 생긴다.⁽⁷⁾ 그림 8 (a)에 나타난 것처럼 3dB coupler가 하나인 경우 시계방향 및 반시계방향의 광이 coupler에서 받은 위상차 φ_1 , φ_2 가 다르다. 즉, 시계방향은 coupler에서 2회의 투과(실선)가 있는 것에 대해서 반시계방향에서는 2회의 반사(점선)가 있다.

이것을 해결하는 방법으로서는 그림 8 (b)에 나타낸 것처럼 양측광을 한번 광원측에 되돌리고 광원측에 설치된 각각의 3dB coupler에 의해 광을 검출하는 구성으로 하면 좋다. 양광과도 링측의 3dB coupler에서 투과와 반사가 각각 1회이기 때문에 가역성이 유지된다.

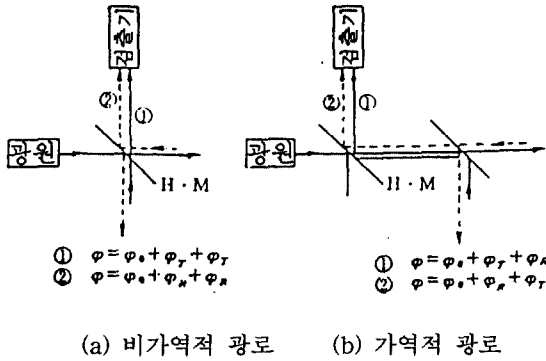


그림 8. 광 분리기(3dB coupler)에서 생기는 위상변화(T:투과, R:반사)

비가역성을 초래하는 것으로서 양방향의 두개의 광이 광섬유의 같은 장소를 다른 시간에 통과하기 때문에 생기는 전달시간의 차, 즉 시간적 비가역성이 있다. 외부불안요소로서는 광섬유코일에 증가하는 불균일한 온도변동 또는 축압이 있다. 편파보존성이 나쁜 광섬유코일에서는 편파면의 변동에 따른 비가역성이 있다. 어느 경우에도 광섬유코일로서의 엄밀한 온도제어나 내진성 등의 보호가 필요하다. 여기서 비가역성에 기인한 잡음에 관해서 이론적으로 검토한다.

비가역의 위상잡음 ϕ_E 는 식(9)에 있어서

$$I = I_0 J_1(\eta) \sin(2\Delta\phi + \phi_E) \quad (10)$$

로서 표시된다. 식(10)에서 Sagnac효과에 의한 위상이 $\Delta\phi=0$ 였더라도, $J_1(\eta)$ 의 scale factor의 변동으로 인해 최소감도가 보정되지 않는 것을 알 수 있다. scale factor의 안정화의 하나로서 위상 변조형의 광섬유자이로의 경우

$$\phi_T = \pi f_m T = \frac{\pi}{2} \quad (11)$$

로서, $f_m=1/2T=C_\omega/2L$ 로 되는 주파수로 변조하면

$$\eta = 2\alpha_m \quad (12)$$

로 되어 변조기의 변조에 의한 변동의 영향을 피할 수 있다.⁽¹¹⁾

비가역의 위상잡음 ϕ_E 는 다음식으로 주어진다.⁽¹²⁾

$$\phi_E \approx \epsilon^2 P \theta_p \sqrt{h L_\gamma} \quad (13)$$

여기서 ϵ^2 은 그림 7에 나타낸 2개의 3dB coupler 사이에 있는 편광자의 편광도(강도비), P는 광원의 편파도, θ_p 는 편광유지 광섬유와 편광자의 주축각도차이, h는 편광유지광섬유의 mode 결합계수, L_γ 는 무편광도 길이이다. L_γ 는 가우스형의 스펙트럼을 가진 광원의 경우에는 다음과 같이 표시된다.

$$L_\gamma = 2 \frac{\sqrt{\ln 2}}{\Delta\omega \tau_p} \quad (14)$$

여기서 $\Delta\omega$ 는 광원의 스펙트럼 폭, τ_p 는 편광유지 광섬유의 편파분산이다. 예를 들면 파장 0.8 μm , $\Delta\lambda=95\text{\AA}$ 의 SLD와 $h \approx 10^{-6} \text{m}^{-1}$ 의 편광유지 광섬유를 이용하면 $L_\gamma=7\text{cm}$, $\epsilon^2=10^{-5}$, $P=0.4$ 로 하면 $\phi_E=0.017\text{deg/hr}$ 이다. 실제 관측된 비가역 바이어스는 $\phi_E=0.035 \text{deg/hr}$ 였다. 편파변동에 관련하는 비가역변동로서 지자장에 의한 영향이 있다. 석영 glass는 $V=2.05 \times 10^{-6} \text{rad/Oe cm}$ ($\lambda=0.83\mu\text{m}$) 정도의 Verdet정수를 가진다.⁽¹³⁾

따라서 1km길이에 모두 지자장이 인가되면 최대 6° 정도의 Faraday효과에 의한 회전이 생긴다. 실제로는 광섬유코일의 축방향 성분밖에 자계가 인가되지 않기 때문에 실효자계는 2 cross beam 이하로 되어 있다. 이 Faraday효과는 비가역에서 10 deg/hr정도의 광학 바이어스로 된다.⁽¹³⁾ 특히 광섬유자이로의 가까이에 강자장이 있으면

출력은 크게 drift한다. 따라서 광섬유코일 전체를 자기 sealed할 필요가 있고, 그 효과가 인정되고 있다. 그 외의 비가역 광학 바이어스의 원인으로서는 광 kerr효과가 있다.⁽¹¹⁾ 이것은 3차의 비선형효과로, 3dB광 결합기의 분배비의 근소한 차가 문제로 된다. 광결합기에는 $1/2 \pm 10^{-2}$ 의 분배비가 요구되지만 광원의 coherence가 SLD처럼 낮으면 거의 문제가 없다.

3-1-4 샷트잡음 및 광원의 coherency

광원 및 광검출기는 저주파로 되면 변동이 크게 되는 말하자면 $1/f$ 특성을 가진다.⁽⁷⁾ 샷트잡음이 보이는 주파수는 광원에 의해서도 다소 다른점이 수 kHz 또는 수백 kHz에서 시작된다. 따라서 DC의 광학적 바이어스는 본질적인 문제점을 포함하고 있고, AC의 광학적 바이어스는 불가결하다. 샷트잡음 한계의 검출감도는 0.006 deg/hr이지만, 실제로는 다른 요인의 영향이 크다. 특히 레이저 광의 coherency에 기인한 광섬유중의 후방 Rayleigh 산란은 자이로의 감도를 대폭 저하시키는 큰 요인으로 된다. 간섭계형에서는 광섬유길이 가 길기 때문에 아주 중요한 문제이다. 즉, 광섬유코일의 중앙부에서 후방산란한 광과 원래의 광이 3dB coupler에서 간섭하여 이 간섭광이 Sagnac신호광으로 증가한다.⁽¹⁴⁾ 이 후방 Rayleigh 산란광은 불규칙적으로 변동하여 잡음원으로 된다. 그림 9에 나타낸 것처럼 감도 $\Delta\Omega$ 과 레이저의 coherence길이 l_c 또는 광원의 스펙트럼폭 Δf 는 $\Delta\Omega \propto \sqrt{l_c} \propto \sqrt{1/\Delta f}$ 의 관계로 나타내어진다.⁽¹⁵⁾ 따라서 coherency가 나쁜 광원이 감도향상의 중요한 조건으로 된다. 광섬유의 단면이나 융착접착부에서의 반사광도 무시할 수 없음을 알 수 있다. 일반적으로 반도체레이저의 coherence길이는 수 cm이기 때문에 이 광원에서는 감도로서는 1deg/hr이 한계이다. 한편 coherent길이가 짧은 LED 또는 SLD⁽¹⁶⁾를 이용하면 감도는 2항 정도 향상시킬 수 있다. 그래도 Rayleigh산란을 피한다고 하는 의미에서는 장파장대가 적당하다.

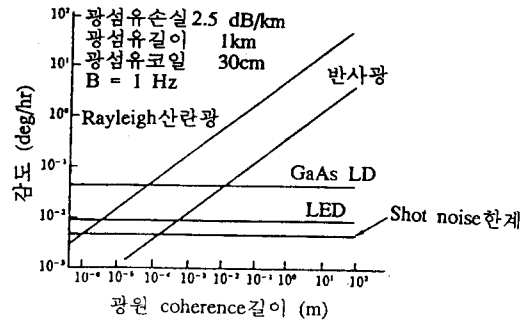


그림 9. 광원 coherence길이가 감도의 관계

3-2 광섬유자이로의 종류

광섬유자이로는 그림 8에 나타낸 것처럼 간섭계형과 링공진기형으로 분류된다. 간섭계형은 ① DC바이어스형, ② 위상변조형, ③ 주파수형, ④ heterodyne검파형으로, 링공진기형은 광섬유공진기의 구성에 의해 ① 개회로형, ② 폐회로형으로 분류된다.

3-2-1 DC 바이어스법

그림 7 (b)에 나타낸 것처럼 직류적으로 $\pi/2$ 비가역광학 바이어스를 부여하는 구성으로, Faraday 소자를 이용한 자이로⁽¹⁷⁾나, 3×3 자이로⁽¹⁸⁾가 시험되고 있다. 그러나 양쪽 다 Faraday소자의 온도특성이 나쁘기도 하고, 광결합기가 불안정하다고 하는 결점이 있다. 그렇지만 DC의 바이어스는 제 3-1절의 3-1-4에서 서술한 것처럼 레이저나 광검출기의 $1/f$ 의 잡음특성에 의해 고감도를 기대할 수 없고, 실용화도 될 수 없다.

3-2-2 위상변조형^{(7),(9)}

위상변조형 광섬유자이로는 전체 광섬유화가 가능한 구성 때문에 현재 주류를 이루고 있다. 당초는 bulk형 소자로 동작이 확인되었지만, 뒤에 서술하는 광섬유 결합기나 광섬유편광자의 출현에 의해 전체 광섬유화가 가능하게 되었다. 스탠 포드대학은 통상의 단일모드 광섬유를 이용한 전

체 광섬유화 광섬유자이로를 실현하여, 감도 0.02deg/hr, 시정수 1sec라고 하는 아주 양호한 결과를 얻었다.⁽¹⁹⁾ 이 광섬유자이로에 사용된 광섬유는 편광유지성이 없어서 수동의 편파제어기가 이용되어 있고, 장시간의 안정성에 문제가 있었다.

따라서 시스템의 안정화를 목표로 그림 10과 같이 응력부여형 편광유지 광섬유를 이용하였고, 전체 편광유지 광섬유화가 제안되었다.⁽²⁰⁾ 광섬유 coupler, 광섬유 편광자 및 광섬유코일에는 전부 PANDA형 광섬유라고 불리는 편광유지 광섬유가 이용되고 있다. 2시간 동작에서 감도 0.5 deg/hr 이라고 하는 안정적인 동작이 얻어졌다. 또, 편광유지 광섬유를 이용하지않는 구성도가 제안되고 있다. 복굴절결정⁽⁷⁾이나, 복굴절광섬유⁽²¹⁾의 편파분산을 이용하여 편파광을 무편파화하는 depolarizer를 이용하면, 통상의 단일모드 광섬유가 적용될 수 있다.⁽²²⁾

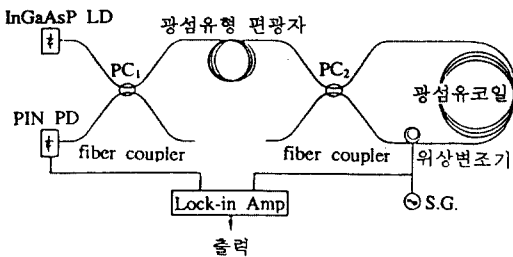


그림 10. 전체 편광유지 광섬유 자이로

위상변조형 광섬유자이로의 최대의 결점은 dynamic range가 작다고 하는 것이다. 즉 식(9)에서 알 수 있듯이, Sagnac효과에 의한 광검출기의 변화는 sine함수이기 때문이다. dynamic range를 향상시키는 방법으로는 다음의 3가지가 있다.

① 위상변조의 1차 및 2차의 위상검출⁽⁸⁾: 식(8)에서 $J_1(\eta)$ 와 $J_2(\eta)$ 항의 위상검출을 독립시키면

$$I_s = \tan^{-1} \left[A \frac{J_1(\eta)}{J_2(\eta)} \tan 2\Delta\phi \right] \propto 2\Delta\phi \quad (15)$$

으로 되고, Sagnac 효과에 의한 위상변화 $\Delta\phi$ 에 비례하는 출력이 얻어진다. 단, 2개의 광검출계의

직선성이 충분히 보정되지 않으면 안된다.

② 광검출기의 신호를 위상변조기와 같은 주파수로 변조하는 방법⁽²³⁾: gate스위치에 의한 2중변조에 의해, 스위치에서의 2단자출력광은

$$I_1 = K \cos(2\pi f_m t + \Delta\phi) \quad (16)$$

$$I_2 = K \cos(2\pi f_m t + \Delta\phi) \quad (17)$$

로 되어, 이 두가지 신호를 위상검출하면 $2\Delta\phi$ 를 검출할 수 있다. 이 방법에 의해 0~40 deg/sec의 회전에서 10^5 의 dynamic range가 얻어지고 있다. 이 시스템은 open loop이기 때문에 scale factor의 변동에 불안하다.

③ serrodyne법⁽²⁴⁾: 위상변조형에서 영위법이 실현가능한 방법으로 그림 11에 기본구조를 나타내었다. 위상변조기에 광학bias용의 정현파신호에 톱니파의 신호를 중첩한다.

위상 검파에서는 그림 12에 나타난 것처럼 (t-T)사이 DC성분이 얻어진다. $\Delta\phi = \pi$ 가 되도록 톱니파 신호의 진폭을 조정하면, 영위법과 등가의 feedback으로 되기때문에 10^5 의 dynamic range가 비교적 쉽게 실현될 수 있다. 이 방법에

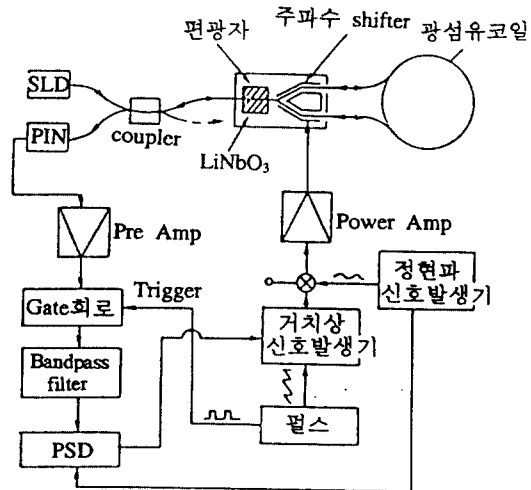


그림 11. LiNbO₃ 광 IC를 사용한 serrodyne방식의 기본구성

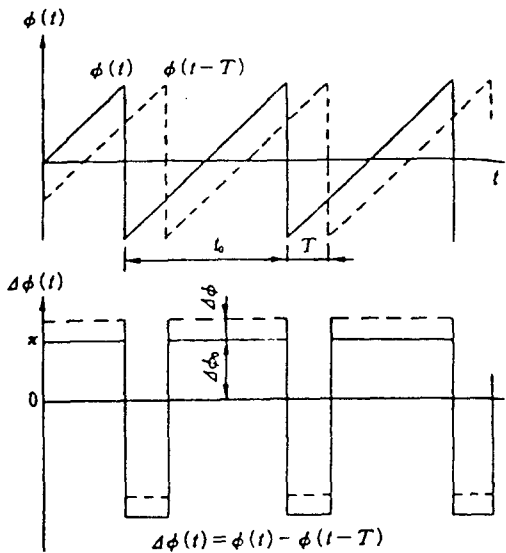


그림 12. serrrodyne방식에서의 거치상파 위상변조와 위상차 신호

는 LiNbO₃ 광IC가 이용되고 있고, 감도 0.1 deg/hr, 100mm ϕ × 35mmh라고하는 소형의 광섬유자이로가 실현되고 있다.⁽²⁵⁾ 단, LiNbO₃ 광IC와 광섬유의 접속점으로 부터의 반사를 방지하기 위한 연구등 실상적인 문제를 남기고 있다.

3-2-3 주파수 변조형⁽⁷⁾

10⁵정도의 dynamic range는 그림 13에 나타난 것처럼 주파수 변조형 광섬유 자이로에 의해 비교적 용이하게 얻어진다.⁽²⁶⁾ 이 방식은 본질적으로는 영위법이고, Sagnac효과에 의해 생긴 주파수 shift Δf를 상쇄시키도록 전압제어발진기(VCO)의 feedback에 의해, 초음파 광 변조기의 주파수를 변화시킴으로 실현된다. 주파수shift Δf는

$$\Delta f = \frac{2R\Omega}{n\lambda} \quad (18)$$

로 주어진다. 여기서 일반적인 Sagnac위상차에 관한 식과는 달리 식(18)에는 광섬유 코아의 굴절

율이 들어간다. 따라서 파장 0.8μm대를 이용하면 광섬유의 분산에 의해 주파수가 다른 좌우광에는 비가역 바이어스가 들어있다. 특히 정지시에 가까운 상태에서는 온도변화에 의한 영향이 크다. 이것을 방지하기 위해 그림 13에 나타난 것처럼 2개의 초음파 광변조기를 이용하지만, beam splitter에 대해서 완전히 대칭으로 배치하지 않으면 안되는 결점이 있다. 그래도 Ω=0.01 deg/hr을 얻기에는 R=10cm, λ=1μm로 하면 Δf=10 MHz로 되어, 초음파 광변조기의 중심주파수 100 Hz에 대해서 주파수 안정10⁻⁸이 필요하게 된다. 그러나 주파수 쉬프트를 용이하게 디지털 출력으로 변환할 수 있는 특징이 있어, 실용화에 가까운 광섬유 자이로이다. 현재 2 deg/hr정도가 얻어지고 있다. 즉 그림 13에 나타난 bulk구성은 LiNbO₃ 광 IC를 이용하여 소형화를 꾀하는 실험도 행해지고 있다.⁽²⁷⁾

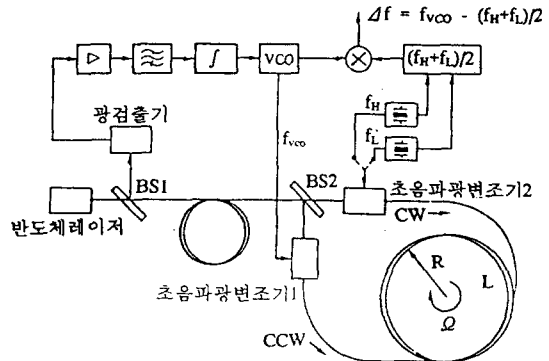


그림 13. 초음파 광변조기를 사용한 주파수 변조형 광섬유 자이로

3-2-4 heterodyne형⁽⁷⁾

이 방식은 주파수 변조 방식에 가깝지만, 초음파 광변조기를 광섬유 루프의 외측에 설치하고 있는 것이 특징이다. 그림 14은 광섬유 루프를 진행하는 좌우광을 모두 같게 하고, 광섬유의 분산에 의한 온도변동의 영향을 피하는 구성도 가능

하다. 그러나 구성이 다소복잡하여 주파수변조형에서도 공통적으로 안고 있는 초음파 광변조기의 온도변동에 의한 scale factor의 변화 등의 문제가 있다.

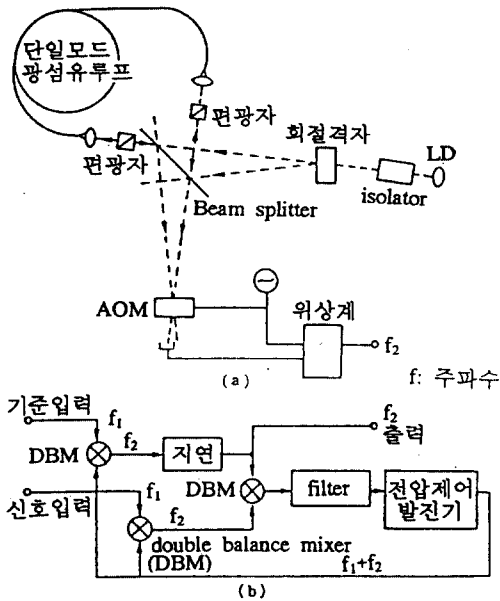


그림 14. Heterodyne형 광섬유자이로

3-2-5 수동공진형⁽⁷⁾

이 방식은 일명 링공진형으로 불리는 링레이저의 발상에 근거한 것이지만, 외부에서 레이저 광을 링공진기 내에 도입함으로써 저속 회전시의 좌우광의 Lock-in현상을 피할 수 있다. 이 광섬유자이로는 그림 15에 나타난 것처럼 꽤 복잡한 시스템이지만, fiber loop는 수 m로 놓고, 또 링의 finesse를 F로 하면, 간섭형보다 F/2배 감도가 높게 된다.⁽²⁸⁾

그리고 공진기에서의 광 결합법에 의해, (a)저결합형과 (b)고결합형으로 분류할 수 있다. 전자의 방법에서 finesse F=140 광섬유길이 3m에서 감도 0.5deg/hr, 시정수 1sec가 얻어지고 있다. 최근 후자의 방법에서 F=500이 얻어지고 있다.⁽²⁹⁾

간섭계형 광섬유 자이로와는 달리 coherence가 높은 광원이 필요하고, 후방산란의 영향이 무시될 수 없다. 이 해결법으로서, 그림 15와 같이 PZT 2에 변조를 깊게 거는 방법이 제안되고 있다. 개회로형의 공진기에서는 finesse가 그다지 높지않기 때문에 현재는 그림 15에 나타난 폐회로형이 주류를 이루고 있다. 링공진형은 간섭계에 비해 회로 구성이 복잡하고 2개의 초음파 광변조기의 불안정성이 아주 심하다고 하는 점에서 아직 실용화 하기에는 아주 먼 이야기이다.

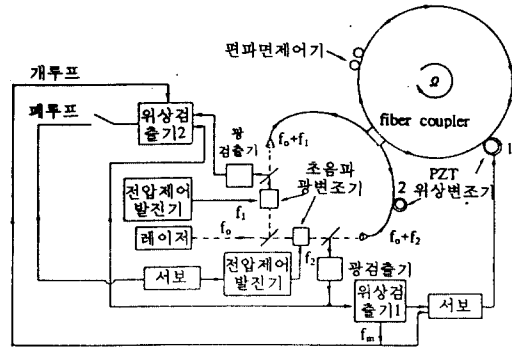


그림 15. 링공진형 광섬유 자이로

4. 맺음말

이상에서 살펴본 바와 같이 현재까지 가장 실용적인 광섬유자이로는 그림 10과 같은 전체 시스템을 편광유지 광섬유와 광섬유부품을 이용하여 광원에서 광검출기까지를 in-line으로 구성한 전체 편광유지 광섬유자이로이다. 광원으로는 그림 10의 InGaAsP LD대신에 0.85μm 파장영역의 초발광 다이오드(SLD)을 사용하며 광검출기는 PIN 다이오드나 APD를 사용한다. 개회로형으로 구조가 간단하고 변조방식은 위상변조방식이므로 PZT 실린더에 광섬유를 코일형태로 감고 전류를 가하면 PZT의 진동에 의해 광경로차가 발생하는 것을 이용하여 위상을 변조하게 된다. 이러한 구성방식은 구조가 간단하고 전체 광섬유화 되어있으므로 견고하고 외부잡음의 영향을 적게 받으므로 안정된 동작이 얻어진다. 앞으로 개발하게될

광섬유 자이로콤파스 시스템에도 이러한 방식의 광섬유자이로스코프를 이용하게될 것이다.

참 고 문 헌

- (1) 中神浩一 : 링그레이저자이로의現狀と應用, 第21回 飛行機シンポジウム(日本航空宇宙學會), pp.210-213(1983)
- (2) David C.Grant, Jr : The LITTON LC-2717 Laser Gyro, CH 1449-8/79, IEEE
- (3) 下平勝幸, 他: 宇宙用링그레이저자이로의研究開發について, 信學技報, 85, 128, pp.19-24(1985)
- (4) Frederick Aronowitz : The Laser Gyro, ACADEMIC PRESS, pp.133-200(1971)
- (5) F.Aronowitz, J.Killpatrick : Low Cost Laser Gyro Phase 1. Final Report, Inertial System Development Guidance and Directorate Technology LAB AD 051675, DAAK 40-77-C-0130, pp.1-23 (DDC 1978)
- (6) 太原, 他 : 레이저·자이로調査檢討報告書, 宇宙開發事業團(1979)
- (7) S.Ezekiel and H.J.Arditty : Fiber-Optic Rotation Sensors, 32, 1/374, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York(1982)
- (8) T.G.Giallorenzi, J.A.Bucaro, A.Dandridge, G.H.Sigel, Jr.J.H.Cole, S.C.Rashleigh, and R.G.Priest : Optical Fiber Sensor Technology, IEEE J.Quantum Electron., QE-18, pp.626-665(1982)
- (9) R.A.Bergh, H.C.Lefevre and H.J.Shaw : An Overview of Fiber-Optic Gyroscopes, IEEE J.Lightwave Tech.,LT-1, pp.91-107(1984)
- (10) 野田壽一 : 光레이저자이로스コープ, 計測と制御, 24, pp.818-822(1985)
- (11) R.A.Bergh, H.C.Lefevre, H.J.Shaw : All-Single-Mode Fiber-Optic Gyroscope with Long Term Stability, Opt. Lett., 6, pp.502-504(1986)
- (12) W.K.Burns : Phase Error Bounds of Fiber Gyro with Polarization-Holding Fiber, IEEE J.Lightwave Technol., LT-4, pp.8-14 (1986)
- (13) A.M.Smith : Faraday Effect in Single-Mode Optical Fiber Using an Injection Laser Light Source, Electron. Lett., 16, pp.206-208(1980)
- (14) 高田,野田, 他 : 偏頗保特光ファイバを使用した光ファイバ回轉センサ, 信學技報, MW 83-86, pp.31-38(1983)
- (15) E.Jones : Analysis of Noise and Bias in the Gyroscope, Conf. Proc. Opt. fiber Sensors, pp.138-142(1983)
- (16) C.S. Wang, W.H.Cheng, C.J.Hwang, W.K. Burns, and P.P.Moeller : High-Power Low-Divergence Superradiance Diode, Appl. Lett., 41, pp.587-589(1982)
- (17) S.C.Lin and T.G.Giallorenzi : Sensitivity Analysis of the Sagnac Effect Optical-Fiber Ring Interferometer, Appl. Opt., 18, pp.915-930(1979)
- (18) S.K.Sheem : Fiber Optic Gyroscope with(3×3) Directional Coupler, Appl. Phys.Letts, 37, pp.869-871(1980)
- (19) R.A.Bergh, H.C.Lefevre and H.J.Shaw : All Single-Mode Fiber Optic Gyroscope, Opt. Lett., 64, pp.198-200(1981)
- (20) K.Okamoto, K.Takada, M.Kawachi and J.Noda : All-PANDA-Fiber Gyroscope with Long-Term Stability, Electron. Lett., 21, pp.429-430(1984)
- (21) K.Boehm, K.Petermann and E. Weidel : Performance of Lyot Depolarizers with Birefringent Single-Mode Fibers, IEEE J.Lightwave Technol., LT-1, pp.71-74(1983)
- (22) K.Boehm, K.Petermann and E. Weidel, and R.Ulrich : Low-Drift Fiber Gyro Using a Superluminescent Diode, Electron. Lett., 17, pp.352(1981)
- (23) B.Y.Kim and H.J.Shaw : All-Fiber-Optic Gyroscope with Linear Scale Factor Using

- Phase Detection, Proc. SPIE, 478, pp.142-148(1984)
- (24) B.Y.Kim and H.J.Shaw : Gate-Phase-Modulation Approach to Fiber-Optic Gyro-scope with Lineanized Scale Factor, Opt. Lett., 9, pp.357-377(9184)
- (25) H.C.Lefevre, P.H.Graindorge and H.J. Arditty : Double Closed-Loop Hybrid Fiber Gyroscope Using Digital Phase Ramp, 3rd Inter. Conference Optical Fiber Sensors, PDS (1985)
- (26) N.Furstenau, V.Wetzig, E.Lubeck, G.Siol, W.Auch and M.Koch : Drift and Scale Factor Tests on the SEL fiber Gyro Controlled Environment, Symposium Gyro Technology, pp.3.1-3.30(1984)
- (27) N.Ohgi, M.Kondoh and M.Shimizu : Optical Fiber Gyroscope with Integrated Optical Frequency Modulator, Conf. Proc. Opt. Fiber Sensors, pp.297-300(1984)
- (28) R.E.Meyer, S.Ezekiel, D.W.Stone and V.J. Tekippe : Passive Fiber-Optic Ring Resonator for Rotation Sensing, Opt. Lett., pp.644-646(1983)
- (29) M.H.Yu and D.B.Hall : Low Loss Fiber Ring Resonator, Proc SPIE 478, pp.104-108(1984)