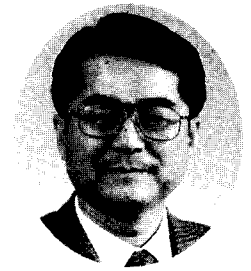


광섬유 레이저의 광센서 응용 Fiber Lasers in Optical Sensors



김 병 윤

한국과학기술원 물리학과교수

1. 서 론

광섬유에 어븀이나 니오디뮴 등의 희토류 원소를 첨가시켜 만든 희토류 첨가 광섬유는 광통신 시스템에서의 광신호 증폭 기용으로 집중적으로 연구, 개발되기 시작하여 지금까지 약 10여년 동안 비약적인 발전을 이루어 왔으며, 그 기술은 이미 실용적인 단계에 이르게 되었다. 특히 희토류 첨가 광섬유 증폭기는 이득이 클 뿐만 아니라 이득 선폭 또한 수십 nm 정도로 넓어 광대역 파장 분할 다중화 시스템의 이상적인 도구로 주목받고 있다. 희토류 첨가 광섬유 증폭기를 이득 매질로 사용하여 만든 광섬유 레이저 역시 광통신 시스템을 위한 광원으로의 응용을 근간으로 하여 짧은 펄스 레이저, 파장 가변 레이저, 솔리톤 발생기 등의 연구 분야를 중심으로 활발히 연구되고 있다.

그러나, 희토류 첨가 광섬유 증폭기는 그 독보적인 장점들로 말미암아 광통신 시스템 분야에서의 응용을 넘어서는 새로운 응용 가능성을 가지고 있다. 여기서는 바로 이러한 새로운 응용 분야의 한가지인 광센서로서의 응용에 대하여 소개하고자 한다. 이것들은 지금까지의 광센서에서는 찾아보기 어려운 매우 독창적이면서도 재미있는 접근이고 새로운 가능성이 무궁무진하다고 하겠다.

역사적으로 볼 때, 광센서에서의 광 증폭기의 필요성은 소위 특수 형태의 광섬유 자이로스콥(Reentrant Fiber Optic Gyroscope)에서 계속적으로 회전하는 광펄스의 세기를 유지시켜 주기 위하여 사용한 라만 증폭기에서 찾아볼 수 있다^[1]. 그러나, 당시의 라만 증폭기를 사용한 대부분의 응용은 곧 희토류 첨가 광섬유 증폭기로 대체되게 되었다.

보다 새로운 응용은 희토류 첨가 광섬유 증폭기를 광원으로 사용한 것에서 시작되었다. 광섬유 증폭기에서 출력되는 소위 증폭된 자발 방출(Amplified Spontaneous Emission, 이하 ASE)

광원은 낮은 가산성, 높은 파장 안정도, 그리고 큰 출력의 세기로 말미암아 간섭계형 광섬유 자이로스콥을 비롯한 몇 가지 센서에 있어서 매우 이상적인 광원으로 쓰일 수 있음을 입증하였다^[2].

한편, 광섬유에 직접 Bragg 격자를 새길 수 있는 새로운 기술이 개발되면서 보다 직접적인 센서 응용이 시작되었다^{[3][4]}. 즉, 광섬유 증폭기와 Bragg 격자를 사용하여 만든 광섬유 레이저에서 레이저의 발진 파장의 변화를 측정함으로써 외부 섭동에 의해 변화된 Bragg 격자의 간격을 읽어낼 수 있게 된 것이다.

보다 최근에는 완전히 새로운 형태의 접근으로서 니오디뮴 또는 어븀이 첨가된 광섬유 증폭기를 이득 매질로 하는 레이저에서 공진기를 구성하는 광섬유의 복굴절 변화를 측정함으로써 외부 섭동을 측정할 수 있는 광섬유 레이저 센서가 개발되었다^{[5]-[9]}. 기존의 센서가 주로 간섭계 형태로써 출력의 세기 변화로부터 여러 가지 물리량을 측정해왔던 것과 달리, 이러한 광섬유 레이저 센서에서는 출력에 실려있는 수십 MHz 이하의 맥놀이 주파수를 읽음으로써 물리량을 측정할 수 있게 되었다. 이것은 광센서의 광학적 구조를 간단하게 할 뿐만 아니라 신호처리부를 간소화함으로써 광센서의 경쟁력을 높이고 응용력을 넓힐 수 있게 만들었다.

광섬유 자이로스콥의 분야에서도 광섬유 레이저를 이용하여 지금까지 보지 못하던 새로운 형태의 광섬유 레이저 자이로스콥을 개발함으로써 이 분야에 새로운 많은 가능성을 갖게 하였다^{[10]-[13]}.

기존의 독립된 광원을 사용하는 광섬유 센서와 비교하여 광섬유 레이저 센서가 갖는 가장 큰 장점은 측정하는 대상에 의해 발생된 광경로 차이가 그대로 광출력의 파장 또는 주파수로 변환된다는 사실이다. 이점은 기존의 광섬유 센서에 필수적이었던 복잡한 전자적 신호처리 장치에 획기적인 간소화를 가져

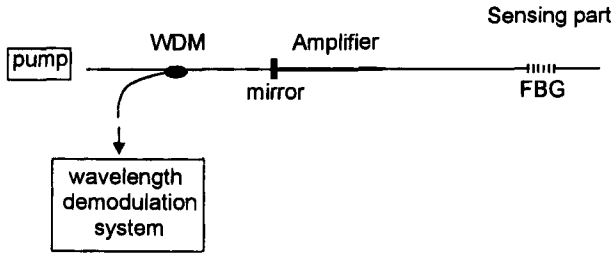


그림 1. 광섬유 Bragg 격자를 사용한 광섬유 레이저 센서.

오게 되었다. 바꾸어 말한다면, 광섬유 레이저 센서는 증폭기와 공진기를 통해 일어나는 능동적인 레이저 동작을 통하여 자동적으로 신호처리가 되도록 한 것이다.

이제 이러한 회로류 첨가 광섬유 증폭기를 이용한 새로운 광센서에 대하여 그 원리와 응용을 한가지씩 구체적으로 살펴보기로 하겠다.

2. Bragg 격자를 사용한 광섬유 레이저 센서

UV 광원을 사용하여 광섬유 코어에 직접 새긴 광섬유 Bragg 격자(이하 FBG)는 파장 선택성을 갖는 반사로 인해 센서 응용에 있어 매우 유용하다. FBG에 가해진 온도변화나 인장의 변화는 반사되는 빛의 파장을 변화시켜 준다. 반사되는 빛의 파장 변화는 분산을 갖는 광소자를 사용하여 쉽게 측정할 수 있다. 초창기에는 외부에서 넓은 선폴을 갖는 광원을 입사시킨 후 파장에 의존하는 투과도를 갖는 필터를 사용하여 FBG에서 반사 또는 투과된 빛의 파장을 측정하는 방법을 사용하였다^[14]. 그러나 최근에는 외부광원과 FBG를 각각 사용하는 대신 FBG를 반사경으로 하는 광섬유 레이저를 만듦으로서 보다 향상된 신호 대 잡음비를 얻을 수 있게 되었다^{[3][15]}. 광섬유 레이저에서 출력되는 세기가 크고 안정된 레이저 빛의 파장은 FBG의 최대 반사율을 갖는 파장에 의해 결정되므로 다음과 같이 격자의 유효 간격(Λ)의 함수로 주어진다.

$$\lambda = 2n\Lambda \quad (1)$$

여기서 n 은 유효 굴절률에 해당한다. FBG를 사용한 광섬유 레이저는 FBG의 반사특성에 의해 매우 좁은 선폴을 갖게 된다. 레이저 공진기의 길이가 짧은 경우 단일 종모드 발진을 얻을 수도 있으나 반드시 단일 모드일 필요는 없다. 출력되는 발진 파장의 온도와 인장 변화에 대한 변화는 다음과 같이 주어지는데, 우선 온도 변화에 대하여는

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \xi)\Delta T \quad (2)$$

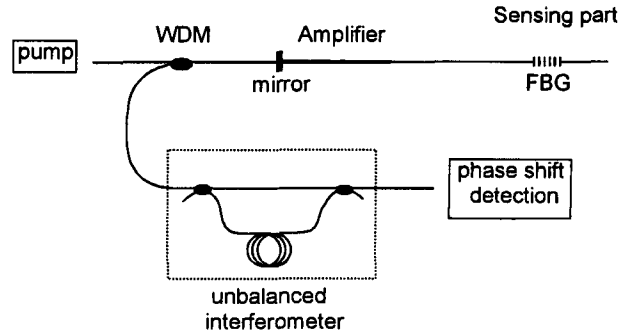


그림 2. 광섬유 Bragg 격자를 사용한 광섬유 레이저 센서에서 외부 간섭계를 이용한 위상 복조 장치.

이 되는데 여기서 α 는 열팽창 계수로 실리카 유리의 경우 약 $5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ 이며 ξ 는 열광학 계수로 약 $10^{-5}/^\circ\text{C}$ 가 된다. 또한 인장에 대한 변화는

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e)\epsilon \quad (3)$$

이 되는데 여기서 ρ_e 는 광탄성 상수에 의해 결정되며 실리카 유리의 경우 약 0.22가 되고, ϵ 은 FBG에 가해진 인장이다. 그림 1은 FBG를 사용한 광섬유 레이저의 전형적인 형태이며 공진기를 구성하는 한쪽 거울만이 FBG로 되어있다^[16]. 외부 환경의 변화로 생긴 레이저 빛의 파장 변화를 측정하기 위해 크게 두가지 방법이 연구되었는데 그 한가지는 필터를 사용하는 것이고^[16], 다른 한가지는 간섭계를 사용하는 것이다.^[17] 필터를 사용하는 방법은 매우 간단하면서도 수 마이크로 인장의 측정을 할 수 있다. 간섭계를 사용하는 방법은 광경로차를 크게 준 마하젠더 간섭계의 파장에 대한 분산 특성을 이용한 것으로서 광경로차를 증가시켜 감도를 향상시킬 수 있다는 장점을 갖고 있다(그림 2). 그러나 이 경우 최종 출력은 기존의 간섭계형 센서에서 나오는 것과 동일해지므로 다시 전자적 신호처리를 해야만 파장 변화값을 얻어낼 수 있다.

FBG를 사용한 광섬유 레이저 센서의 최대 장점은 무엇보다도 여러개의 센서를 동시에 파장 다중화 방식으로 처리할 수 있다는 사실이다(그림 3)^{[3][4]}. 이것은 FBG를 사용한 광섬유 레이저 센서의 동작이 좁은 파장 선폴 영역에서 이루어지는 고유한 특성에 기인한다. 한 가닥의 광섬유의 서로 다른 위치에 제각기 다른 격자 간격을 갖도록 새겨진 FBG들은 광섬유 레이저가 각각 서로 다른 발진 파장으로 발진하도록 해주므로, 각 센서의 동작 영역에 비하여 발진 파장들 사이의 간격을 충분히 넓게 해주면 좋은 센서 어레이를 구현할 수 있다. 이를 위해서는 각 레이저 공진기에 공통으로 쓰이는 한쪽 거울은 모든 원하는 발진 파장에 대하여 파장 의존도를 둔감하게 만들어 주어

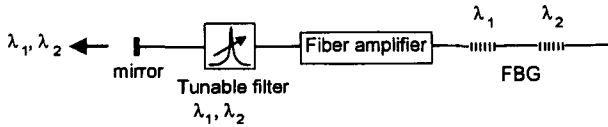


그림 3. 파장 가변 필터를 이용한 광섬유 레이저 센서의 다중화.

야 한다. 이것은 간단한 유전체 거울이나 광섬유 루프형 거울을 사용하면 쉽게 얻을 수 있다. 이러한 센서 어레이에서의 신호처리에는 WDM 광소자를 사용하여 각 센서 부분에서의 정보를 한 번에 하나씩 처리하는 방법이 있다. FBG를 사용한 광섬유 레이저 센서는 그 광학적 구성이 간단하고 방법에 따라서는 신호처리 또한 간단하여 앞으로 상용화될 큰 가능성을 갖고 있다. 특히, 인공 구조물 등의 인장, 온도변화를 측정하기 위한 센서용으로는 이상적이기 때문에 현재 세계적으로 많은 연구팀들이 기술 개발에 몰두하고 있다.

3. 편광 모드를 이용한 광섬유 레이저 센서

FBG를 사용한 광섬유 레이저 센서와 같이 레이저의 발진 파장을 측정함으로써 외부 물리량을 알아내는 센서와는 달리, 레이저 공진기의 전체 길이에 의해서 결정되는 발진 종모드의 주파수를 통하여 외부 물리량을 측정하는 광섬유 레이저 센서가 가능하다. 패브리-페로형 레이저에서 발진되는 N번째 종모드의 주파수는

$$f_N = \frac{c}{2nL}N \quad (4)$$

으로 주어지며 여기서 L은 전체 공진기 길이, n은 매질의 굴절율, 그리고 c는 진공중에서의 빛의 속도이다. 따라서 이웃하는 종모드 사이의 주파수 간격은

$$f_{N+1} - f_N = \frac{c}{2nL} \quad (5)$$

이 되며 이를 공진기의 free spectral range(이하 FSR)라고 부르기도 한다. 공진기의 길이가 광경로로 $\lambda/2$ 만큼 변화하면 레이저의 공진 주파수는 FSR 만큼 이동하게 된다. 바꾸어 말하면, 광경로의 변화가 레이저 동작에 의해 레이저의 발진 주파수 변화로 변환되며 이는 일종의 광신호처리로 해석할 수 있다. 이것은 기존의 간섭계형 센서에서처럼 광경로의 변화가 간섭계를 거치면서 출력의 세기 변화로 변환되는 것과는 근본적으로 다르다. 레이저에서의 주파수 변화는 광경로 변화에 대해 선형적으로 비례하기 때문에 그림 4와 같은 헤테로다인 측정 기술로 직접적인 측정이 가능하다. 그림 4에서는 보통 간섭계의 두

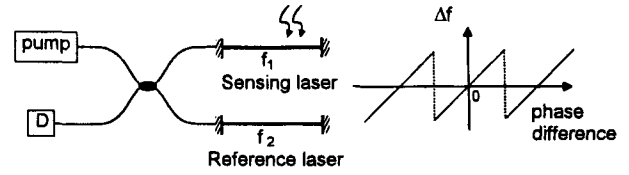


그림 4. 비트 주파수 형태의 출력을 갖는 광섬유 레이저 센서.

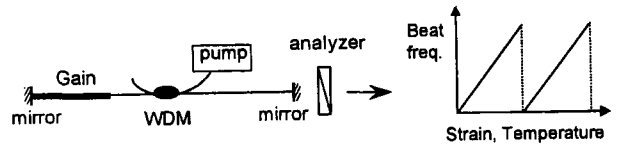


그림 5. 편광 모드를 이용한 광섬유 레이저 센서.

광통로가 두 개의 거의 같은 길이를 갖는 광섬유 레이저로 대체되어 있는 형태이며, 두 출력은 방향성 결합기에서 합쳐져 비트 신호를 발생하게 된다. 단일 종모드로 발진하는 이상적인 레이저의 경우 비트 주파수는 두 레이저의 발진 주파수 차이에 의해 결정된다. 한 레이저는 외부 환경으로부터 독립시켜 기준 주파수로 삼고 다른 한 레이저는 외부 물리량에 따라 그 주파수가 변화되도록 하면, 출력으로부터 외부 물리량을 주파수 카운터를 사용하여 직접 측정할 수 있다.

그러나 다중 종모드로 발진하는 보통 광섬유 레이저를 사용하는 경우에는 문제가 그렇게 간단하지 않다. 가장 큰 문제점은 두 레이저의 종모드 사이의 간격 차이 때문에 발생하는 매우 복잡한 비트 주파수 스펙트럼이다. 이것을 극복하기 위해서는 두 광섬유 레이저의 종모드 간격을 거의 같게 만들어 주어야 하는데, 한가지 간단한 방법은 그림 5와 같이 광섬유 레이저의 편광모드를 사용하는 것이다. 광섬유 레이저에는 서로 수직인 두 개의 고유 편광모드가 존재하는데, 이들은 서로 다른 굴절률을 경험하면서 진행하므로 서로 독립된 두 개의 광통로를 진행하는 빛으로 취급할 수 있다. 광경로 차이는 광섬유의 복굴절률에 의해 결정된다. 여기서 중요한 것은 두 레이저가 서로 비슷한 출력의 세기를 갖도록 공진기의 편광에 의존하는 손실을 줄이는 일이다. 편광기를 사용하여 서로 수직인 편광모드를 간섭시켜 주면 비트 신호가 발생하게 되며 비트 신호의 주파수는 전체 공진기의 복굴절률에 의해 결정된다. 따라서 외부로부터 광섬유 레이저의 복굴절률을 변화시킬 수 있는 물리량이 가해지는 경우 편광 모드 비트 신호의 주파수를 측정함으로써 가해진 물리량의 크기를 측정할 수 있는 것이다.

레이저에서 고유 편광 모드는 빛의 공진기 1회전에 대하여 같은 편광 상태와 같은 위상을 갖는 조건에 의해 결정된다. 이 조건으로부터 패브리-페로형 광섬유 레이저의 고유 편광 상태를 구하면 양쪽 평면 거울 면에서 항상 선편광이 된다^{[5][8]}. 이

것은 광섬유가 임의의 복굴절을 갖더라도 항상 성립하며 다만 선편광의 편광 방향은 복굴절의 함수가 된다. 두 수직한 고유 편광 모드의 편광 방향을 안정화하기 위해 공진기를 편광유지 광섬유로 구성하고, 아울러 전체적인 복굴절량을 최소화하기 위해 광섬유 레이저의 한 가운데에서 복굴절축이 서로 90도가 되도록 접속한 광섬유 레이저 센서가 선보였다^{[6][18]}. 두 편광 모드의 간섭에 의한 비트 주파수를 측정하여 인장과 온도 변화에 대하여 성공적인 측정결과를 보고하였다. 평면거울을 사용하는 대신에 FBG를 사용하여 발진하는 종모드 개수를 줄여 신호 대 잡음비를 향상시킨 결과 또한 보고되고 있다^[7].

패브리-페로형 광섬유 레이저에서 한쪽 평면 거울을 Faraday 회전 거울(Faraday rotating mirror, 이하 FRM)로 바꾸게 되면 매우 흥미로운 광섬유 레이저 센서가 된다. FRM은 Faraday rotator와 평면 거울로 이루어져 있는데 Faraday rotator에서 선편광의 회전각도가 45도가 되면 출력 편광 상태는 빛의 좌표계에서 볼 때 복굴절과 관계없이 항상 입력 편광 상태에 대하여 수직이 된다. 이러한 특징을 갖는 FRM을 한쪽 거울로 사용하는 광섬유 레이저의 구성은 서로 수직한 두 고유 편광 상태의 빛이 똑같은 손실을 겪도록 한다. 더욱 흥미로운 사실은 평면 거울 면에서의 레이저의 고유 편광 상태는 복굴절의 종류와 크기에 관계없이 항상 원편광이 되며 편광 모드 비트 신호의 주파수 역시 비가역 복굴절을 제외하면 복굴절과 무관하다는 것이다^[19]. 따라서 인장이나 온도 변화와 같이 가역적 복굴절을 유도하는 물리량의 측정에는 부적합하나 자기장이나 전류 등을 측정하고자 하는 경우에는 오히려 이 점 때문에 매

우 이상적이 된다. 그림 6의 (a)는 광섬유 레이저 전류(또는 자기장) 센서의 장치도인데 한쪽 끝에 FRM이 부착되어 있으며 솔레노이드에 전류를 흘려 광섬유에 Faraday 효과에 의한 비가역적 복굴절을 유도하도록 되어 있다. 포화 흡수체를 사용한 것은 다중 종모드 발진을 억제하기 위한 것이다^[19]. 그림 6의 (a)에서 보면 솔레노이드를 평면 거울 쪽에 위치시킨 것을 볼 수 있는데, 이는 평면 거울쪽에서 레이저의 고유 편광 모드가 원편광이기 때문에 전류(또는 자기장)에 대한 감도를 최대로 할 수 있기 때문이다. 그림 6의 (b)는 전류 측정에 대한 실험 결과이다.

레이저의 고유 편광모드를 이용한 회투류 첨가 광섬유 레이저 센서는 발진하는 레이저 종모드의 주파수 안정화가 앞으로 해결해야 할 과제로 남아 있기는 하지만, 주파수 형태의 출력을 갖는 새로운 형태의 광섬유 센서라는 점에서 앞으로 실용화 될 큰 가능성을 보여주고 있다.

4. 광섬유 레이저 자이로스코프

회전을 측정하는 레이저 센서에는 고리 레이저 자이로스코프(이하 RLG)가 있지만 이는 기체 레이저를 사용한 것이어서 단점 또한 적지 않다. 따라서 광섬유 자이로스코프와 같이 견고하면서도 RLG와 같은 주파수 형태의 신호출력을 갖는 광섬유 고리 레이저 자이로스코프를 갖는 것이 숙원이 되어 왔다. 성공적인 RLG 동작을 위해서는 이득매질이 도플러 선폴을 가진 기체 이득매질과 같이 빛의 진행 방향에 대하여 독립적인 이득을 주어 고리레이저에서 서로 반대방향으로 진행하는 두 레이저 빛이 이득경쟁을 하지 않아야 한다. 또한 공진기 내부에 되반사량을 무시할만한 수준으로 낮추어 주파수 록킹이 심각한 영향을 끼치지 않도록 해야 한다. 그러나 대부분의 고체 이득 매질은 이러한 필요조건을 충족시키지 못한다. 따라서 지금까지 가장 활발히 연구되어 온 것은 광섬유에서의 stimulated Brillouin scattering(이하 SBS)을 이용한 광섬유 증폭기를 이득매질로 사용하는 고리 레이저였다(그림 7)^[20]

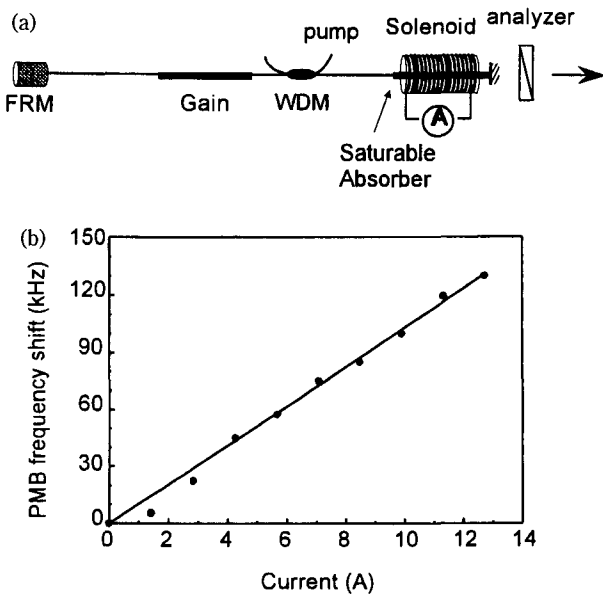


그림 6. (a) 편광 모드를 이용한 광섬유 레이저 전류 센서와 (b) 전류 측정 실험 결과. 전체 공진기 길이, 7.3 m; 솔레노이드 길이, 42 cm; 솔레노이드의 감은 횟수, 1530 바퀴.

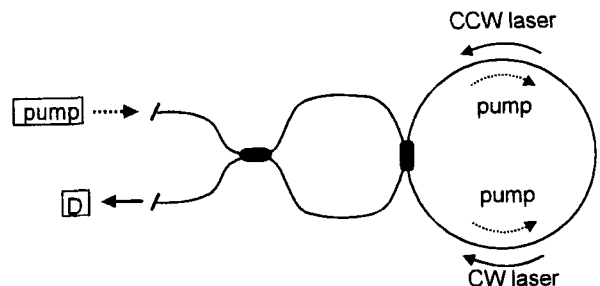


그림 7. Brillouin 광섬유 고리 레이저 자이로스코프.

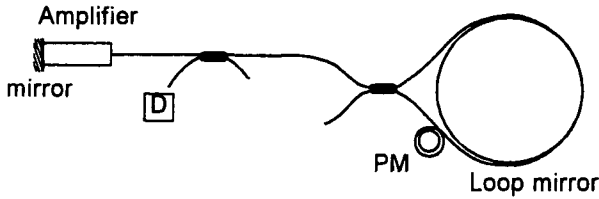


그림 8. 모드록킹된 광섬유 레이저 자이로스코우프. PM, 위상 변조기; D, 광검출기.

[21]. SBS에 의한 이득은 항상 펄핑광의 진행 방향과 반대 방향으로 최대가 되므로 시계방향과 반시계 방향으로 도는 빛은 각각 반대 방향의 펄핑광으로부터 이득을 얻게 된다. SBS 이득매질을 사용한 Brillouin 광섬유 RLG는 비록 성공적인 실험 결과를 거두기는 했으나 문제가 많아 현재로서는 실용성이 적다.

최근에는 어븀 첨가 광섬유 고리레이저에서 회전율에 비례하는 주파수를 갖는 비트 신호 관측에 성공하여 주목을 끌고 있다[22][23]. 레이저는 양방향으로 다중 종모드로 발진하였고 아직까지는 비트 신호의 크기가 작고 불안정하여 가능성 단계에 머물러 있다. 희토류 첨가 광섬유 RLG가 성공할 경우 실용성이 높게 될 가능성이 매우 크다. 그 이유는 희토류 첨가 광섬유 RLG의 경우 공진기의 길이와 복굴절을 Brillouin 광섬유 RLG에서처럼 안정화시킬 필요가 없으며 자이로스코우프의 dynamic range 또한 제약을 받지 않기 때문이다. 광섬유 RLG에서 또 한가지 중요한 사실은 양방향의 발진 주파수가 비가역적인 효과가 없을 경우 광섬유의 복굴절에 관계없이 항상 같아져 자이로스코우프의 핵심이 되는 가역 조건이 레이저 동작에 의해 자동적으로 충족되는 것이다.

기존의 FOG와 RLG의 틀을 벗어나는 새로운 형태의 광섬유 레이저 자이로스코우프(Fiber Laser Gyroscope, 이하 FLaG) 또한 소개되었는데[10][13] 이것들은 지금까지의 광학 자이로스코우프의 판도를 뒤바꾸어 놓을 만큼 중요한 결과가 될 가능성이 있다. 이 두 가지의 FLaG는 모두 레이저 동작에 의해 자동적으로 자이로스코우프의 가역성이 만족되며 신호 출력 또한 처리하기 쉬운 형태라는 장점을 지니고 있다. 그 한가지는 모드록킹된 광섬유 레이저 자이로스코우프(이하 ML-FLaG)로서 그 광학적 구성은 그림 8과 같다. 공진기의 한 쪽 끝은 보통 평면 거울이며 다른 쪽 끝은 기존의 FOG에서 볼 수 있는 Sagnac 루프형 거울로 이루어져 있다. 이득 매질은 희토류 첨가 광섬유 증폭기[10] 또는 반도체 증폭기[11][12]가 될 수 있는데 반도체 증폭기 쪽이 빠른 이득 회복 시간을 갖기 때문에 더 적합한 것으로 판명되었다. Sagnac 루프형 거울에는 위상 변조기가 한 쪽에 치우치도록 놓여 있어 기존의 FOG에서처럼 반사율이 변

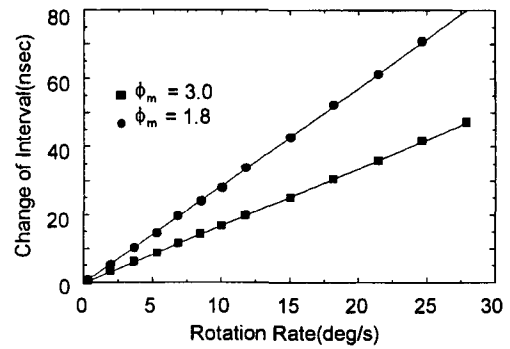
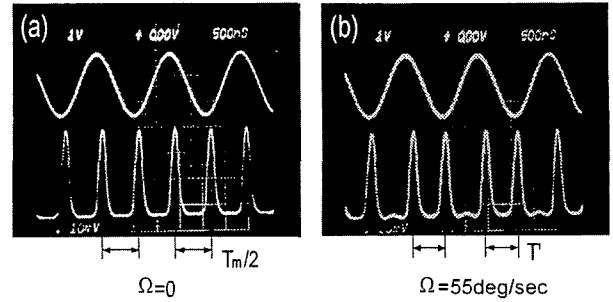


그림 9. 모드록킹된 광섬유 레이저 자이로스코우프의 실험 결과. 광섬유 루프의 길이, 150 m; 광섬유 루프의 직경, 15.2 cm; 위상 변조 주파수, 644 kHz.

조되도록 하였다. 이 때 위상 변조기에 걸어주는 변조 주파수를 공진기의 종모드 간격과 일치시켜주면 모드록킹된 펄스를 얻을 수 있다. 변조 신호의 매 주기마다 두 개의 모드록킹된 펄스를 얻게 되는데 Sagnac 루프가 회전하지 않으면 두 펄스 사이의 시간 간격은 정확히 변조 주기의 절반이 되며, Sagnac 루프가 회전을 Ω 로 회전하게 되면 다음과 같이 변하게 된다.

$$\Delta t = \frac{T_m}{2\pi} \sin^{-1}\left(\frac{\Delta\phi_R}{\phi_m}\right), \quad \Delta\phi_R = \frac{8\pi AN}{\lambda c} \Omega \quad (6)$$

여기서 T_m 은 변조주기, ϕ_m 은 변조기에서의 위상 변조량, $\Delta\phi_R$ 은 회전에 의한 비가역 위상차, A 는 루프의 면적, N 은 루프에 감긴 광섬유의 횡수, 그리고 c 는 진공에서의 빛의 속도이다. 이러한 측정 원리에 따른 실험결과는 그림 9와 같다. 신호출력이 펄스간의 시간 간격으로 주어지므로 상용화된 time interval counter를 사용하여 측정할 수 있으며 따라서 신호처리가 기존의 FOG에서 보다 훨씬 간단해질 수 있다. 위 식 (6)을 보면 비례상수에 위상 변조량이 포함되어 있음을 알 수 있다. 즉 안정된 비례상수를 얻기 위해서는 위상 변조량을 일정하게 유지시켜 주어야 한다.

ML-FLaG의 편광 특성은 다른 레이저에 비해 상당히 복잡한데 이는 참고 문헌[24]에 잘 분석되어 있다. 원리적으로는 ML-FLaG의 가역성 역시 패브리-페로형 광섬유 레이저와 광

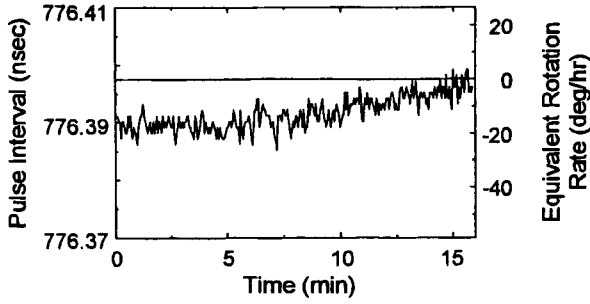


그림 10. 모드록킹된 광섬유 레이저 자이로스코우프의 단기 잡음 측정 결과. 위상 변조량, 3.0 radian; integration time, 1.55 msec.

섬유 고리 레이저와 마찬가지로 자동적으로 만족된다. 따라서 ML-FLaG의 구성에 사용되는 광섬유 소자들의 성능이 기존의 FOG에 필요한 것들처럼 고성능일 필요가 없다. 그러나 Sagnac 루프형 거울이 안정된 반사율 특성을 갖기 위해서는 루프를 고성능은 아니지만 적당한 수준의 편광유지 광섬유로 구성하는 것이 좋다. 그림 10은 반도체 증폭기를 사용하고 편광유지 광섬유로 만든 Sagnac 루프로 구성된 ML-FLaG의 성능 평가 결과이다. 단기잡음 수 $\text{deg/hr}/\sqrt{\text{Hz}}$ 와 장시간 드리프트 100 deg/hr 를 얻어 가까운 장래에 ML-FLaG가 실제적으로 응용될 전망을 밝게 해주고 있다.

FLaG의 또 다른 한가지는 패브리-페로형 광섬유 레이저를 이용한 것으로서 그 구성은 그림 11의 (a)와 같다^[13]. 광섬유의 양 끝단에 평면 거울을 부착하여 공진기를 구성하였으며, 양끝에서 나오는 레이저의 출력을 간섭시켜 두 레이저 빛 사이의 위상차의 함수로 주어지는 간섭 무늬를 얻었다. 공진기를 한 주기 왕복할 때 빛이 겪는 위상 변화는 레이저의 조건에 의해 2π 의 정수배로 주어지므로 양끝에서 출력되는 두 레이저 빛 사이의 위상차는 공진기의 길이와 복굴절에 관계없이 항상 π 의 정수배가 된다. 앞서 언급한 바와 같이 거울 면에서의 레이저의 편광 상태는 선편광이므로 간섭에 의해 최대의 visibility를 얻기 위해서는 편광상태를 잘 조절해 주어야 한다. 광섬유 레이저를 여러 바퀴 감아 루프의 형태를 만들어서 회전시키게 되면 두 레이저 빛 사이에 Sagnac 효과에 의한 위상 변화가 유도되어 간섭무늬가 이동하게 된다. 간섭 무늬의 visibility를 높이기 위해서는 단일 종모드 또는 한 개 걸러서 하나씩 종모드가 발전하도록 해주어야 한다. 반응 속도가 느린 포화 흡수체 필터로써 어븀 첨가 광섬유를 사용하고 그 위치를 이득 매질의 위치와 함께 조절해 줌으로써 종모드 선택을 성공적으로 얻을 수 있었다^[25]. 회전에 의한 간섭무늬의 이동을 측정하여 그림 11의 (b)와 같이 측정 원리에 부합하는 결과를 얻었다. 신호의 검출부에는 RLG와 같이 두 레이저 빛을 합쳐주는 광학계를

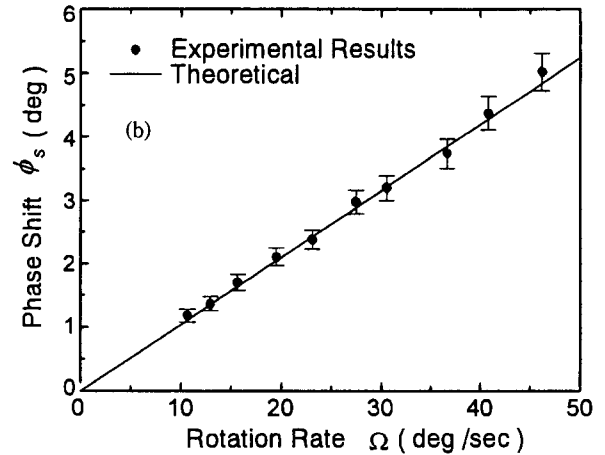
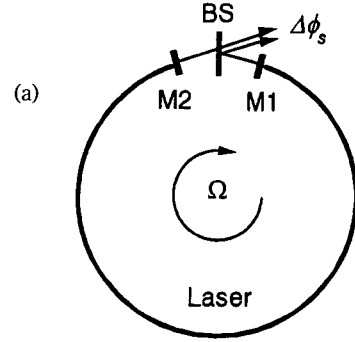


그림 11. (a) 간섭계형 광섬유 레이저 자이로스코우프. BS, beam splitter; M1, M2, 평면 거울. (b) 회전을 측정 실험 결과. 전체 공진기 길이, 120 m; 파장, 1530 nm; 유효 면적, 3.86 m^2 .

설치하면 되는데 이 경우 고성능의 자이로스코우프를 위해서는 외부 광학계에서 불가피하게 생기는 위상 오차를 최소화해야만 한다. 이러한 FLaG는 지금까지 발명된 광섬유 자이로스코우프 가운데 가장 간단한 형태가 될 가능성이 있으며 다양한 신호처리 기법이 가능하기 때문에 앞으로의 연구 결과가 주목된다.

5. 결 론

지금까지 소개한 내용과 같이 광섬유 레이저는 센서로의 응용에 무한한 가능성을 잠재하고 있으며 이를 찾아내는 연구가 현재 매우 활발히 이루어지고 있다. 개념적으로 광섬유 레이저 센서는 기존의 광섬유 센서의 광원과 물리량 감지부가 한데 집적되어 있고 여기에 광신호 처리부가 결합되어 있는 형태로 볼 수 있다. 주파수 형태의 신호 출력은 기존의 복잡한 신호처리 부분을 간단하게 하여 광센서의 경제성을 높일 수 있다. 더욱이 광섬유 레이저 자이로스코우프에서 볼 수 있는 가역 조건의 자동적인 만족은 다른 방법으로는 얻을 수 없는 광섬유 레이저

센서만의 장점이다. 앞으로 많은 새로운 광섬유 레이저 센서의 발명이 이루어질 것이며 궁극적으로는 기존의 수동형 광섬유 센서들을 대신하게 될 것이다.

6. 참고문헌

1. E. Desurvire, B. Y. Kim, K. Fesler, and H. J. Shaw, "Reentrant fiber Raman gyroscope," *J. Lightwave Technol.* **6**, 481-491, 1988.
2. P. F. Wysocki, M. J. F. Digonnet, and B. Y. Kim, "Wavelength stability of a high-output, broadband, Er-doped superfluorescent fiber source pumped near 980 nm," *Opt. Lett.* **16**, 961-963, 1991.
3. A. D. Kersey and W. W. Morey, "Multi-element Bragg-grating based fiber-laser strain sensor," *Electron. Lett.* **29**, 964-966, 1993.
4. A. T. Alavie, S. E. Kari, A. Othonos, and R. M. Measures, "A multiplexed Bragg grating fiber laser sensor system," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **5**, 1112-1114, 1993.
5. H. K. Kim, S. K. Kim, H. G. Park, and B. Y. Kim, "Polarimetric fiber laser sensors," *Opt. Lett.* **18**, 317-319, 1993.
6. H. K. Kim, S. K. Kim, and B. Y. Kim, "Polarization control of polarimetric fiber-laser sensors," *Opt. Lett.* **18**, 1465-1467, 1993.
7. G. A. Ball, G. Meltz, W. W. Morey, "Polarimetric heterodyning Bragg-grating fiber-laser sensor," *Opt. Lett.* **18**, 1976-1978, 1993.
8. H. Y. Kim, S. K. Kim, H. J. Jeong, and B. Y. Kim, "Polarization properties of a twisted fiber laser," *Opt. Lett.* **20**, 386-388, 1995.
9. H. Y. Kim, B. K. Kim, S. H. Yun, and B. Y. Kim, "Response of fiber lasers to an axial magnetic field," *Opt. Lett.* **20**, 1713-1715, 1995.
10. M. Y. Jeon, H. J. Jeong, and B. Y. Kim, "Mode-locked fiber laser gyroscope," *Opt. Lett.* **18**, 320-322, 1993.
11. K. H. Park, H. S. Cho, D. H. Jang, B. W. Lee, and B. Y. Kim, "Mode-locked fiber laser gyroscope based on a distributed-feedback semiconductor laser amplifier," *Opt. Lett.* **21**, 92-94, 1996.
12. B. W. Lee, H. J. Jeong, M. S. Oh, and B. Y. Kim, "High resolution mode-locked fiber laser gyroscope using a semiconductor laser amplifier," *Proceedings of OFS-11*, 296-299, Sapporo, Japan, 1996.
13. H. S. Kim and B. Y. Kim, "New fiber laser interferometer for rotation sensing," *Proceedings of OFS-11*, 76-79, Sapporo, Japan, 1996.
14. R. M. Measures, "Fiber optic sensor considerations and developments for smart structures," *Fiber Optic Smart Structure and Skins IV, Proceedings of SPIE*, vol. 1588, 282, 1991.
15. G. A. Ball, W. W. Morey, and P. K. Cheo, "Single- and multi-point fiber-laser sensors," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **5**, 267-270, 1993.
16. S. M. Melle, A. T. Alavie, S. Karr, T. Coroy, K. Liu, and R. M. Measures, "A Bragg grating-tuned fiber laser strain sensor system," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **5**, 263-266, 1993.
17. K. P. Koo and A. D. Kersey, "Bragg grating-based laser sensors system with interferometric interrogation and wavelength division multiplexing," *J. Lightwave Technol.* **13**, 1243-1249, 1995.
18. H. K. Kim, S. K. Kim, and B. Y. Kim, "Polarimetric fiber laser sensors using Er-doped fibre," *Optical and Quantum Electron.* **27**, 481-485, 1995.
19. J. S. Park, S. H. Yun, S. J. Ahn, and B. Y. Kim, "Polarization- and frequency-stable fiber laser for magnetic-field sensing," *Opt. Lett.* **21**, 1029-1031, 1996.
20. F. Zarinetchi, S. P. Smith, S. Ezekiel, "Stimulated Brillouin fiber-optic laser gyroscope," *Opt. Lett.* **16**, 299-301, 1991.
21. S. Huang, K. Toyama, B. Y. Kim, and H. J. Shaw, "Lock-in reduction technique for fiber-optic ring laser gyros," *Opt. Lett.* **18**, 555-557, 1993.
22. S. K. Kim, H. K. Kim, and B. Y. Kim, "Er³⁺-doped fiber ring laser for gyroscope applications," *Opt. Lett.* **19**, 1810-1812, 1994.
23. R. V. Kiyani, S. K. Kim, and B. Y. Kim, "Bidirectional Single-Mode Er-doped Fiber Ring Laser," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **8**, 1624-1626, 1996.
24. H. J. Jeong, Y. W. Koh, B. W. Lee, M. Y. Jeon, and B. Y. Kim, "Analysis of polarization properties of a mode-locked fiber laser gyroscope," *Appl. Opt.* **35**, 2206-2210, 1996.
24. H. S. Kim, S. K. Kim, and B. Y. Kim, "Longitudinal mode control in few-mode erbium-doped fiber lasers," *Opt. Lett.* **21**, 1144-1146, 1996.