

광섬유 레이저 센서*

김향균 · 김승관 · 김호영 · 김병운

한국과학기술원 물리학과

(1993년 11월 5일 받음)

회토류 첨가 광섬유 레이저의 편광모우드간의 맥놀이 주파수를 출력으로 하는 광섬유 레이저 센서를 제안하였고 이의 타당성을 실험을 통하여 증명하였다. Nd^{3+} 첨가 원형코어 광섬유 레이저를 이용하여 lateral stress를 측정하여 4.8 kHz/gram의 선형적인 비례 상수를 얻었다. 또한 Nd^{3+} 첨가 편광유지 광섬유를 이용하여 온도 및 인장을 측정할 결과 30 kHz/°C-cm, 43 kHz/ μ m의 선형적인 비례상수를 얻었다.

I. 서 론

광섬유 레이저란 회토류 첨가 광섬유를 이득매질로 하는 공진기를 구성하여 발진시킨 것으로, 광증폭기와 더불어 회토류 첨가 광섬유의 대표적인 이용분야이다. 광섬유 레이저는 광섬유 시스템의 광원으로서 많이 연구되었다. 특히 극초단 펄스(수십 fsec) 광섬유 레이저^[1]라든가 선풍이 극히 좁은(수 kHz) 단일 종모우드 발진 광섬유 레이저^[2]는 광통신용 광원으로 기대되고 있다.

광섬유 레이저를 광원 이외의 다른 분야, 예를 들어 광섬유 센서 등으로 이용하는 것에 대한 연구는 그리 많지 않았다. 그러나 최근에 Ge이 첨가된 광섬유의 photosensitivity를 이용하여 광섬유의 코어에 새긴 격자^[3]를 거울로 하는 광섬유 레이저에서, 온도나 인장 등에 의해 격자 거울의 특성을 변화시킴으로서 발진 스펙트럼의 변화를 측정하는 등^[4] 광섬유 레이저 자체를 센서로 이용할 수 있는 가능성을 보여주는 논문들이 잇달아 발표되고 있다. 광섬유 격자를 거울로 하는 광섬유 레이저를 이용할 경우 공진기의 길이를 적절히 조절하여 단일 종모우드로 발진시킬 수 있으며,^[5] 광섬유 격자의 반사파장을 조정하여 multiplexing이 가능한 광섬유 레이저 센서도 가능하다.^[6] 그러나 이 경우 발진 스펙트럼을 측정하여야 하므로 신호처리를 위한 장치가 복잡해진다.

본 논문에서는 광섬유 레이저의 편광모우드간의 맥놀이 주파수를 이용한 광섬유 레이저 센서에 대하여 제안하였고, 이의 가능성을 실험을 통하여 증명하였다. 외

부의 섭동에 의한 레이저 광섬유의 복굴절 변화는 비례적으로 편광모우드간의 맥놀이 주파수의 변화로 나타나게 되며, 이 변화는 주파수 카운터를 이용하여 쉽게 측정할 수 있다. 보통의 간섭계형 광섬유 센서는 간섭 신호의 변화가 외부의 섭동에 대해 cosine 함수관계를 갖기 때문에 적절한 신호처리를 하여야 한다. 그러나 광섬유 레이저 센서에서는 그러한 문제가 원리적으로 해결된다.

II. 광섬유 레이저의 편광모우드

먼저 본 논문에서 제안한 광섬유 레이저 센서의 이론이 되는 광섬유 레이저의 편광모우드에 대하여 기술하겠다.

레이저가 발진하기 위해서는 편광 및 위상에 대한 공진조건을 만족하여야 한다. 즉 공진기를 한 주기 진행한 후의 위상 및 편광상태가 원래의 상태로 되는 조건을 만족하는 빛만 발진하게 된다. 이러한 공진조건은 발진 광의 주파수(종모우드)와 편광상태(편광모우드)를 결정한다. 이에 대한 수학적인 표현은 Jones 행렬방법을 이용하여 구할 수 있다. 그림 1(a)에 나와 있는 것처럼 왼쪽에서 오른쪽으로 진행되는 빛에 대한 광섬유의 Jones행렬표현을 A라 하자. Random birefringence의 성질이 있는 광섬유는 아래와 같은 타원편광판(elliptic phase retarder)에 대한 표현을 이용하여 기술할 수 있다.

$$A = \begin{bmatrix} \cos^2 R e^{i\delta/2} + \sin^2 R e^{-i\delta/2} & i \sin 2R \sin \frac{\delta}{2} e^{-i\gamma} \\ i \sin 2R \sin \frac{\delta}{2} e^{i\gamma} & \cos^2 R e^{-i\delta/2} + \sin^2 R e^{i\delta/2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

* 본 연구는 국방과학연구소의 장기기초연구(90-1-1)의 연구비 지원으로 수행되었음.

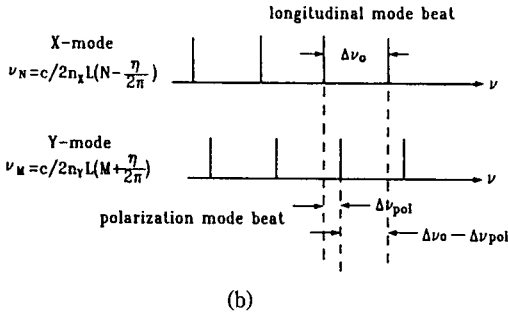
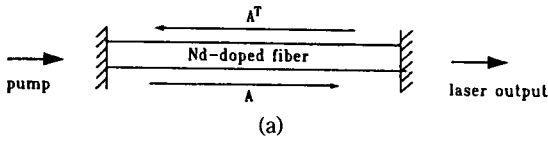


그림 1. (a)광섬유 레이저 공진기의 Jones 행렬표현 (b)각 편광모우드의 공진주파수.

이 행렬표현은 아래의 (2)식과 같이 장축이 X축과 R의 각도를 이루며, X축 성분과 Y축 성분의 위상차이가 δ 인 타원편광상태의 빛이 매질을 진행한 후에 편광상태는 변하지 않고, 각각의 위상만 $e^{i\delta/2}$, $e^{-i\delta/2}$ 만큼 변하는 것을 의미한다.

$$\begin{bmatrix} \cos R \exp(-i\gamma/2) \\ \sin R \exp(i\gamma/2) \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} -\sin R \exp(-i\gamma/2) \\ \cos R \exp(i\gamma/2) \end{bmatrix} \quad (2)$$

매질이 가역적(reciprocal)인 경우 반대방향으로 진행하는 빛에 대한 Jones 행렬표현은 A^T 로 나타내어진다.^[8,9] 따라서 한쪽 거울면에서의 한 주기 공진기진행에 대한 Jones 행렬표현은 실험실계에서 볼 때 $RA^T RA$ 가 된다. 여기서 R은 거울의 반사행렬을 나타내는데, 수직 입사시에 빛의 편광상태는 변하지 않으며, 이때 R은 단위행렬이 된다. 따라서 공진기에 대한 표현은 $A^T A$ 이며, (1)식을 대입하여 계산하면

$$A^T A = \begin{bmatrix} a+ib & ic \\ ic & a-ib \end{bmatrix} \quad (3)$$

가 된다. 여기서 a, b, c는 실수 값이므로 아래와 같다.

$$a = (\cos^4 R + \sin^4 R) \cos \delta + 2 \sin^2 R \cos^2 R - \sin^2 2R \sin^2 \frac{\delta}{2} \cos 2\gamma$$

$$b = (\cos^4 R - \sin^4 R) \sin \delta - 2 \sin^2 R \sin^2 \frac{\delta}{2} \sin 2\gamma$$

$$c = 2 \sin 2R \sin \frac{\delta}{2} \left[\cos^2 R \cos \left(\frac{\delta}{2} - \gamma \right) + \sin^2 R \cos \left(\frac{\delta}{2} + \gamma \right) \right]$$

행렬 $A^T A$ 의 고유편광상태는

$$[E_{X,Y}] = \begin{bmatrix} -c \\ b \pm \sqrt{b^2 + c^2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

로서 서로 수직한 두 편광상태가 존재하며, 각각의 고유값은

$$\lambda_{X,Y} = a \pm i\sqrt{b^2 + c^2} \equiv \exp(\pm i\eta)$$

$$\tan \eta = \frac{\sqrt{b^2 + c^2}}{a} \quad (0 \leq \eta \leq \pi) \quad (6)$$

이 된다. 두 고유 편광상태는 거울면에서의 발진 편광모우드가 되는데 (5)식에서 알 수 있듯이 공진기의 상태에 관계없이 항상 선편광이 된다. (6)식의 고유값으로부터 구한 위상각 $\pm \eta$ 는 각각의 고유 편광 상태에 있는 빛이 공진기를 한 주기 진행했을 때 한 order안에서의 상대적인 위상변화를 나타내는데, 공진주파수는 이를 포함한 위상이 2π 의 정수배가 되는 곳에 위치한다. 공진기의 길이를 L, 평균 굴절률을 n, 편광모우드의 굴절률을 각각 n_x , n_y 라 할때 각 편광모우드의 공진주파수는 아래와 같이 주어진다.

$$\nu_{X,N} = \frac{c}{2n_x L} \left(N - \frac{\eta}{2\pi} \right) \\ \nu_{Y,M} = \frac{c}{2n_y L} \left(M + \frac{\eta}{2\pi} \right) \quad (7)$$

이를 그림으로 나타낸 것이 그림 1(b)이다. 여기서 두 편광모우드의 공진 주파수의 차이 $\Delta \nu_{pol}$ 은

$$\Delta \nu_{pol} = \nu_{X,N} - \nu_{Y,M} \approx \frac{c}{2n_x L} N - \frac{c}{2n_y L} M - \frac{c}{2nL} \frac{2\eta}{2\pi} \quad (8)$$

이다. 이것이 바로 편광모우드간의 맥놀이 주파수가 되는데, (4)식과 (6)식으로 부터 공진기의 복굴절에 관계됨을 알 수 있다. 만약 외부의 섭동에 의해 양 편광모우드 사이의 위상차이가 ϕ 만큼 유도된다면 $\Delta \nu_{pol}$ 의 변화량 $\Delta(\Delta \nu_{pol})$ 은

$$\Delta(\Delta \nu_{pol}) = \frac{c}{2nL} \frac{2\phi}{2\pi} \quad (9)$$

로서 섭동에 의한 편광모우드간의 위상차이 ϕ 에 비례하여 편광모우드간의 맥놀이 주파수가 변한다. 따라서 편광모우드간의 맥놀이 주파수의 변화를 읽음으로써 가해진 물리량의 크기를 측정할 수 있다. 또한 (9)식에서 알 수 있듯이 광섬유 레이저 센서는 광섬유 간섭계 센서가 갖는 비선형성이 원리적으로 해결되어 복잡한 신호처리 과정을 필요로 하지 않는다.

III. 편광모우드 beat 신호의 선폰

광섬유 레이저 센서의 측정 수단인 편광모우드간의 맥놀이 신호의 선폰은 광섬유 레이저 센서의 성능에 커다란 영향을 미친다. 따라서 실험결과를 제시하기 전에 광섬유 레이저의 편광모우드 beat신호의 선폰에 대하여 기술하겠다.

광섬유내의 복굴절에 의해 각 편광모우드가 느끼는 유효 굴절률은 실제적으로 다르다. 굴절률의 차이가 매우 작아서 각 편광모우드의 종모우드 간격에서는 거의 영향을 주지 못하더라도 편광모우드 맥놀이 신호의 선폰에는 심각한 영향을 미친다는 사실은 다음에 유도한 식으로부터 알 수 있다.

편광모우드간의 복굴절을 $\Delta n = (n_x - n_y)$ 이라 할때, 이 복굴절에 의한 각 편광모우드의 종모우드 간격의 차이는 $c/2nL(\Delta n/n)$ 이 된다. 이때 어떤 주파수에서 두 편광모우드의 발진 주파수가 일치하였다면, 그로부터 P order 후에는 공진 주파수의 위치가 아래 식만큼 차이가 난다.

$$P \left(\frac{c}{2n_x L} - \frac{c}{2n_y L} \right) = P \frac{c}{2nL} \frac{\Delta n}{n} \quad (10)$$

따라서 발진선폰이 $\delta\nu$ 인 경우 P를 발진 스펙트럼 선폰 내의 종모우드 수로 계산하면 편광모우드간의 맥놀이 신호의 선폰 δf_p 는 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$\delta f_p = \frac{n_x - n_y}{n} \cdot \delta\nu \quad (11)$$

즉 편광모우드 맥놀이 신호의 선폰은 바로 각 편광모우드의 종모우드 간격차에 의한 것으로서, 발진되는 빛의 스펙트럼 선폰과 편광모우드간의 복굴절에 비례하게 된다. 수치적으로 간단히 그 크기를 비교하면, 약 1m의 광섬유 레이저가 10 nm의 스펙트럼 선폰으로 발진하고, 편광모우드간의 복굴절이 약 10^{-6} 일 때, 편광모우드간의 종모우드 간격차이 $(c/2nL)(\Delta n/n)$ 은 100 Hz 정도로 거의 영향이 없다. 그러나 이때의 편광모우드 맥놀이 신호의

선폰은 (11)식에 의하면 $\Delta f_p \approx 3$ MHz로서 아주 작은 복굴절이라도 편광모우드 맥놀이 신호의 선폰에는 큰 영향을 준다. 광섬유 레이저를 센서로 이용하기 위해서는 δf_p 가 작을수록 좋으며, 이를 위해서는 편광모우드간의 복굴절과 발진광의 스펙트럼 선폰을 작게 하여야 한다.

IV. 실험 및 결과

먼저 Nd³⁺ 첨가 원형코어 광섬유 레이저를 이용하여 lateral stress를 측정하였다. 실험 장치도는 그림 2에 있다. 13 m 길이의 원형코어 Nd³⁺ 첨가 광섬유(BT Lab사 제공, cutoff 파장 ≈ 920 nm)의 양 끝에 dichroic 거울을 부착하여 광섬유 레이저를 구성하였다. 여기광 원으로는 514.5 nm의 Ar⁺ 레이저를 이용하였고 레이저 광섬유에 편극조절기(PC)를 설치하여 공진기의 이방성을 변화시켰다. 여기광원은 문턱세기(약 20 mW)의 약 1.3 배의 세기로 입사시켰고 이때의 스펙트럼은 1.06 μ m를 중심으로 약 10 nm의 선폰으로 발진하였다. 레이저 출력은 반응시간이 약 2 nsec인 Si 광검출기로 받아서 오실로스코프나 rf-주파수 분석기로 관측하였다. 그림 3(a)는 광검출기 앞에 편극기가 없을 때 rf-주파수 분석기 상에 나타난 종모우드의 맥놀이 신호이다. 광섬유 레이저의 편광모우드가 서로 수직하므로 편광모우드의 맥놀이 신호는 관측할 수 없다. 종모우드간의 간격은 약 7.5 MHz로 이는 레이저 공진기 길이로부터 계산한 $c/2nL$ 값과 일치한다. 그림 3(b~d)는 광검출기 앞에 편극기를 놓아 양 편광모우드를 간섭시켜 측정한 맥놀이 신호로 PC의 상태를 달리하며 관측한 것이다. 이웃한 종모우드 맥놀이 신호 사이의 대칭적인 위치에 새로운 편광모우드 맥놀이 신호가 나타나는 것을 관측할 수 있으며, 편광모우드간의 복굴절이 변할 때 이 주파수가 변하는 것을 관측할 수 있다. 또한 편극기를 돌려가며 관측할 때 90° 간격으로 그 신호가 완전히 없어지는 점이 존재하며 이로써 거울면에서의 편광모우드의 상태가 선편광임을 알 수 있다.^[10] Lateral stress를 측정하기 위하여 그림 4(a)에 있는 것처럼 약 7.5 cm 길이의 자켓이 있는 상태의

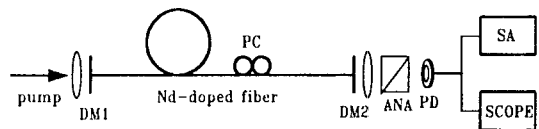


그림 2. 실험장치도. DM1, DM2; dichroic 거울, ANA; 편극기, PD; 광검출기, SA; rf-주파수 분석기, SCOPE; 오실로스코프.

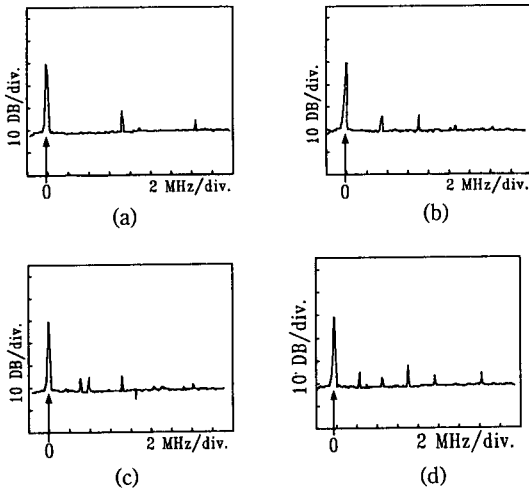


그림 3. rf-주파수 분석기로 관측한 맥놀이 신호. (a)는 편극기를 통하지 않고, (b)~(d)는 편극기를 통하여 관측한 결과.

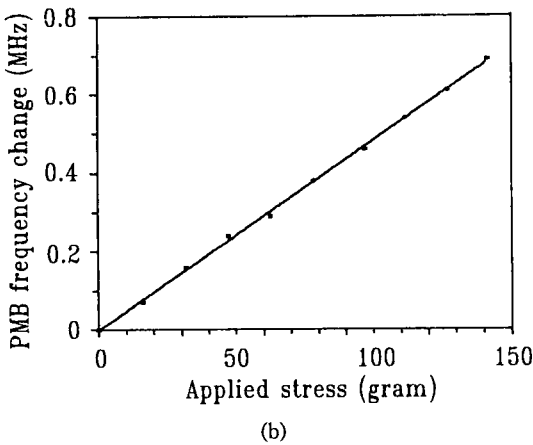
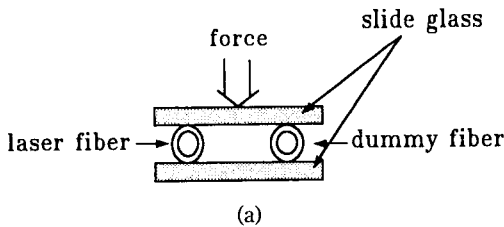
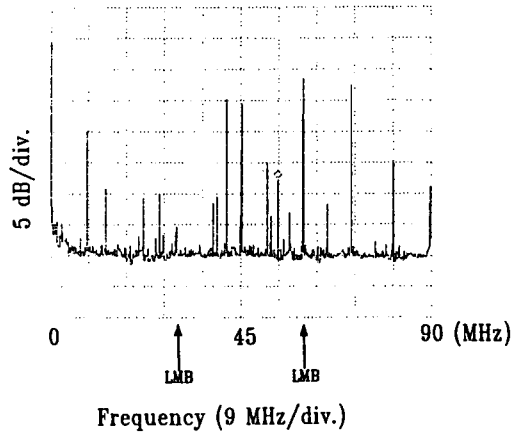
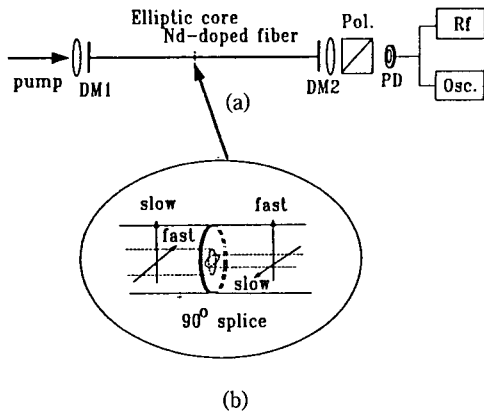


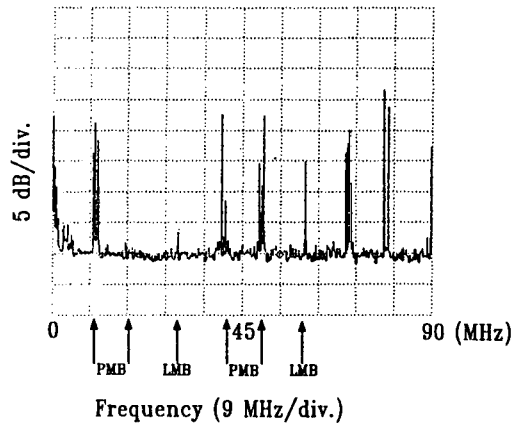
그림 4. (a) 광섬유 레이저에 압력을 가한 부분의 단면도. (b) 레이저 광섬유에 가한 압력의 양에 대한 편광모우드 맥놀이 주파수의 변화

레이저 광섬유에 압력을 가하며 rf-주파수 분석기 상에서 편광모우드 맥놀이 주파수의 변화를 측정하였다. 일정하게 압력이 가해지도록 자켓까지의 외경이 같은 일반 광섬유를 나란히 놓고 그 위에 slide glass를 놓고 압력을 가하였다. 그런데 PC의 상태를 달리하며 측정할 경우 비례상수가 달라짐을 볼 수 있는데, 이는 PC의 상태에 따라 압력을 가한 부분에서 편광모우드의 상태가 달라지기 때문이다. 좀더 정확한 실험을 위하여 stress를 준 부분에서의 편광모우드의 방향이 stress의 방향과 같도록 편극기로 편광모우드 방향을 관측하면서 PC를 조정하였다. 이 상태에서 stress를 가한 결과가 그림 4(b)이다. 예상대로 선형적인 결과를 얻었으며 이때의 비례상수는 4.8 kHz/gram이다. 편광모우드 맥놀이 신호의 선폭 δf_p 는 PC의 상태에 따라 수십 kHz에서 수 백 kHz로 변하였다. 레이저 광섬유의 유효 복굴절을 약 10^{-7} 으로 하여 (11) 식에 의해 계산하면 약 500 kHz의 값이 나온다. 이번에는 레이저 광섬유에 인장 및 온도 변화를 주면서 같은 실험을 하였다. 그러나 이 경우, 편광모우드 맥놀이 주파수는 거의 변하지 않았다. 이는 인장과 온도에 의한 원형코어 광섬유의 굴절을 변화는 모든 방향에 대해 일정하게 유도되기 때문으로, 이때 편광모우드간의 유효 복굴절 변화는 없다. 따라서 원형 코어 광섬유는 인장 및 온도 센서로는 부적합함을 알았다. 원형코어 광섬유 레이저를 센서로 이용하려 할때 또 한가지 단점은 외부의 물리량에 대한 감도가 측정 부분에서의 편광모우드 상태에 따라 변하는데, 원형 코어 광섬유의 경우 측정 부분에서의 편광 상태를 정확히 알기는 힘들며 또한 그 편광 상태도 레이저 광섬유의 다른 부분에 약간의 섭동이 가해졌을 경우에 쉽게 변한다는 것이다. 이러한 문제는 편광유지 광섬유를 레이저 광섬유로 이용하면 해결할 수 있다.

편광유지 광섬유는 구조상의 비대칭성으로 인하여 온도나 인장과 같은 물리량에 대하여 각 편광축의 굴절률이 변하는 정도가 다르다. 따라서 원형코어 광섬유 레이저로는 측정할 수 없는 물리량을 편광유지 광섬유 레이저를 이용하여 측정할 수 있다. 실험장치는 그림 5에 있다. 코어가 타원형($1.2 \times 2.5 \mu\text{m}$)으로 편광이 유지되는 Nd^{3+} 첨가 광섬유(Andrew사 제공, cutoff 파장 $\approx 720 \text{ nm}$)의 양 끝에 dichroic 거울을 부착하여 레이저를 구성하였다. 레이저 광섬유의 길이는 약 3.4 m이고 $(\Delta n/n)$ 은 4×10^{-4} 이며, 514.5 nm의 Ar^+ 레이저를 문턱세기(약 30 mW)의 약 3배의 세기에서 입사시켜 여기시켰다. 이때 스펙트럼은 $1.09 \mu\text{m}$ 를 중심으로 약 10 nm의 선폭으로 발진하였다. 발진광의 고유 편광모우드는 선편광이며, 그 방향



(a)



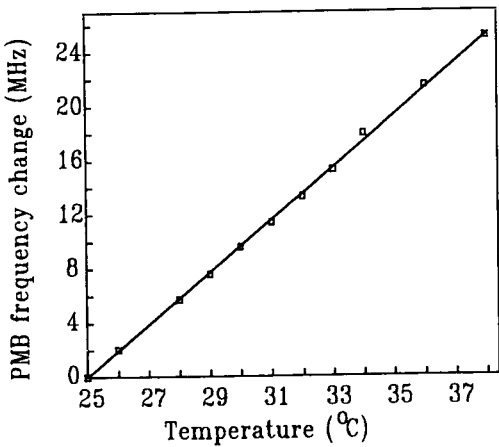
(b)

그림 5. (a)편광유지 광섬유 레이저를 이용한 실험장치도.
(b)광섬유 코어의 축이 90°가 되도록하여 붙인도면.

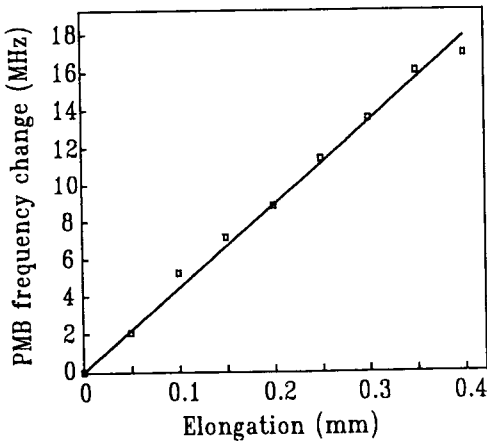
그림 6. 광섬유 코어의 축이 (a) 나란할 때, (b) 수직할 때의 편광모우드 맥놀이 신호. LMB는 종모우드간의 맥놀이 신호를, PMB는 편광모우드간의 맥놀이 신호를 나타낸다.

은 레이저 광섬유의 편광축과 일치하였다. 편광유지 광섬유를 그대로 이용할 경우 편광모우드간의 복굴절이 너무 커서 광섬유 레이저 센서로 이용할 수 없다. 본 실험에서 이용한 타원형 코어 광섬유의 $\Delta n/n$ 이 4×10^{-4} 이며, 발진선폭이 약 10 nm일때, (11)식에 의한 편광모우드 맥놀이 신호의 선폭 δf_b 는 약 1.2 GHz이다. 이는 종모우드 간의 간격 30 MHz보다 훨씬 큰 값으로, 이 때문에 rf 주파수 분석기상의 모든 주파수에서 편광모우드 beat 신호가 나타나게 되며, 이 상태로는 센서로 이용할 수 없다. 이를 해결하기 위하여 그림 5(b)처럼 레이저 광섬유의 중간을 잘라서 타원형 코어의 축을 서로 수직하게 붙여 놓음으로서 편광모우드간의 복굴절이 최소가 되도록 하였다. 코어의 축은 흡수되지 않은 여기광의 field pattern으로 확인하여 이들이 서로 90°로 교차하도록 한 후 용융 접합하였다. 타원형 코어의 축이 나란할 때와 수직할 때의 편광모우드 맥놀이 신호가 그림 6에 나와 있다. 편광모우드의 축이 나란할때는 rf-주파수 분석기 상의 모든 영역에서 편광모우드 맥놀이 신호가 나타나지만, 수직할 때 편광모우드 맥놀이 신호의 선폭은 약 3 MHz로 줄었음을 알 수 있다. 양쪽의 레이저 광섬유의 길이를 조절하여 편광모우드 맥놀이 신호의 선폭이 최소인 때 레이저 광섬유에 온도와 인장을 가하면서 편광모우드 맥놀이 주파수의 변화를 관측하였다. 먼저 64 cm 길이의 레이저 광섬유를 온수가 담긴 비이커에 넣고 온도를 내리면서 관측한 결과가 그림 7(a)에 나와 있다. 약 30 kHz/°C -cm의 비례상수를 보이고

있다. 다시 55 cm 길이의 레이저 광섬유에 인장을 가하면서 관측한 결과가 그림 7(b)에 있으며, 43 kHz/ μ m의 비례상수를 보이고 있다. 이 값은 레이저 광섬유의 다른 부분에 섭동을 가하여도 변하지 않았으며, 따라서 레이저 광섬유로 편광유지 광섬유를 이용하는 것이 타당함을 알 수 있다. 위의 비례상수를 각 편광모우드에 있는 빛이 레이저 광섬유를 한 번 진행한 후의 위상차이로 환산하면 각각 0.18°/°C -cm, 0.26°/ μ m가 되는데, 이는 타원형 코어 광섬유를 이용한 간섭계형 광섬유 센서를 이용하여 787.8 nm의 파장에서 측정한 값 0.52°/°C -cm과^[11] 514.5 nm



(a)



(b)

그림 7. 편광유지 광섬유 레이저에 (a) 온도 (b) 인장을 가하며 측정된 편광모우드 맥놀이 주파수의 변화.

에서 측정된 값 $0.75^\circ/\mu\text{m}^{[12]}$ 와 비교할 때 같은 order임을 알 수 있다. 차이가 나는 것은 광섬유가 같지 않고 광원의 파장이 다르기 때문으로 생각된다. 광섬유 레이저 센서의 비례상수는 물리량에 의한 레이저 광섬유 자체의 감도와, 공진기 길이에 의한 종모우드 간격에 비례한다. 따라서 공진기의 길이를 짧게 하면 측정하고자 하는 물리량에 대한 편광모우드 맥놀이 주파수의 변화량을 크게 할 수 있다.

궁극적으로 편광모우드 beat 주파수의 변화를 oscilloscope나 주파수 카운터 등으로 측정하기 위해서는 low-pass filter 등을 이용하여 하나의 편광모우드 beat 신호

만을 선택하여야 한다. 또한 편광모우드 beat 신호의 선폴이 좁아야 하며 이를 위하여 발진 스펙트럼 선폴이 작아야 하는데, 작은 선폴을 갖는 filter 등을 공진기 내에 삽입하거나, 요즘 구현되고 있는 광섬유 격자거울^[3]을 이용하여 발진 스펙트럼 선폴을 줄일 수 있다. 가장 이상적인 경우로 각 편광모우드에서 하나씩의 종모우드만 발진하면 좋을 것이다.

V. 결 론

광섬유 레이저의 편광모우드 간의 맥놀이 주파수를 이용한 광섬유 레이저 센서를 제안하였고, 이의 가능성을 실험으로 증명하였다. 원형코어 광섬유를 이용하여 측정된 lateral stress에 대하여 4.8 kHz/gram 의 비례상수를, 타원형 코어 편광유지 광섬유 레이저를 이용하여 측정된 온도와 인장에 대해서는 각각 $30 \text{ kHz/}^\circ\text{C}\cdot\text{cm}$, $43 \text{ kHz}/\mu\text{m}$ 의 비례상수를 보였다. 광섬유 레이저를 센서로 이용하기 위해서 편광모우드 맥놀이 신호의 선폴은 작을수록 좋으며, 이를 위해서는 발진 스펙트럼 선폴과 편광모우드간의 복굴절을 줄여야 한다. 또한 안정된 편광모우드를 유지하기 위해서는 레이저 광섬유로 편광유지 광섬유를 이용하여야 함을 알았다. 이때 편광모우드 간의 유효 복굴절은 레이저 광섬유의 중간을 잘라 편광축이 서로 수직하게 교차하도록 하여 줄일 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] J. L. Zyskind, J. W. Sulhoff, Y. Sun, J. Stone, L. W. Stulz, G. T. Harrey, D. J. Digiovanni, H. M. Presby, A. Diccirilli, U. Koren and R. M. Jopson, *Elect. Lett.* **27**, 2148(1991).
- [2] K. A. Fesler, R. F. Kalman, M. J. F. Dignonnet, B. Y. Kim and H. J. Shaw, *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **1171**, 346(1989).
- [3] G. Meltz, W. W. Morrey and W. H. Glenn, *Opt. Lett.* **14**, 823(1989).
- [4] G. A. Ball, W. W. Morey and W. H. Glenn, *IEEE Photo. Tech. Lett.* **3**, 613(1991).
- [5] G. A. Ball and W. H. Glenn, *J. Lightwave Tech.* **10**, 1338(1992).
- [6] G. A. Ball, W. W. Morey, and P. K. Cheo, *IEEE Photo. Tech. Lett.* **5**, 267(1993).
- [7] B. Lamouroux, B. Prade and A. Orszag, *Opt. Lett.* **7**, 391(1982).
- [8] R. E. Collin, *Foundations for Microwave Engineering*, McGraw-Hill, NewYork (1966) p.157.

- [9] E. Brinkmeyer, *Opt. Lett.*, **6**, 575(1981).
[10] H. K. Kim, S. K. Kim, H. G. Park and B. Y. Kim, *SPIE*, **1817**, Taiwan China, (1992) p104.
[11] S. E. Kanellopoulos, V. A. Handerek and A. J. Rogers, *Proc. of Optical Fiber Sensors Conference, Firenze, Itali*, (1993) p31.
[12] S. Huang, J. N. Blake and B. Y. Kim, *J. Lightwave Tech.* **8**, 23(1990).

Fiber Laser Sensors

H. K. Kim, S. K. Kim, H. Y. Kim, and B. Y. Kim

Dept. of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon 305-701, Korea

(Received: November 5, 1993)

We propose and demonstrate a fiber laser as a sensor, whose output is the frequency of beat signals between eigenpolarization modes of the fiber laser. For the measurement of lateral stress, proportional constant of 4.8 kHz/gram is obtained with a good linearity. For the measurements of temperature and longitudinal strain applied to the polarization maintaining fiber laser, proportional constants of 30 kHz/°C -cm, and 43 kHz/μm, respectively, are obtained.