

# 저 복굴절 광섬유의 자기광학적 특성

## Magneto-optical Properties of low Birefringent Optical Fiber

羅 菜 東\* · 金 永 洙\*\*  
(Chai-Dong Na · Young-Su Kim)

### 요 약

편광유지 광섬유의 한 종류인 저 복굴절 광섬유의 고유복굴절 및 자기광학 효과에 의한 편광 특성을 이론적으로 해석하고 실험하였다. 일반 단일모드 광섬유에 비해 편광유지 특성이 양호하게 나타났으며, 실험결과 본 실험에 사용된 광섬유(길이 : 68.28cm, 163.72cm, 139.52cm)의 편광도는 0.818 이상으로 측정되었다. 입력 편광각에 대한 출력 편광각의 변화는 9° 이하로 측정되었다. 자계 측정 실험결과 10kAT까지의 자계 강도를 선형적으로 측정할 수 있었으며 최대 오차는 4kTA에서 1.95% 였다.

### Abstract

The polarization properties of low birefringent optical fiber due to intrinsic birefringence and magneto-optic effects are theoretically analyzed and experimented. The low birefringent fiber is found to have more excellent polarization maintaining properties than normal single mode optical fiber. As the experimental results, the polarizability of low birefringent optical fiber is measured over 0.818. The variation of output polarization angle with input polarization angle is measured within 9°. Implemented magnetic field measuring system using low birefringent optical fiber can linearly measure the magnetic field strength up to 10kAT generated by solenoid. The maximum error is 1.95% in the magnetic field strength of 4kAT.

### 1. 서론

선형 편광된 빛을 임의 길이의 광섬유에 입사 시키면 출력 빛의 편광 파라미터는 본래 입력시의 편광 파라미터와는 다르게 나타난다.

\* 正會員 : 大宥工業專門大學 電氣科

\*\* 正會員 : 韓國電氣研究所 電力電子研究部

이것은 마치 광학적으로 균일하지 않은 매질속을 진행할 때와 같은 편광 특성 즉, 복굴절이 나타나기 때문이며, 이러한 편광 특성은 광섬유 센서, 코히런트 광통신 시스템 및 광집적 회로 등에 응용된다.<sup>1)~4)</sup> 이중에서 광섬유 센서는 광섬유의 무유도성, 고절연성, 방폭성, 세심성, 저가격등의 잇점 때문에 기존의 시스템을 소형, 경량화 할 수 있으며, 전류, 전압, 온도, 압력, 속도, 가속도, 각속도, 진동등 정밀 측정에 이용되고 있다. 이상적인 광섬유의 경우 그 구성이 균일하고 원대칭이므로 복굴절이 나타나지 않지만 광섬유의 제조과정에서 코어 단면의 타원 변형, 불균형한 응력 등에 의해 고유 복굴절이 발생한다. 또한 외부의 여러원인 즉, 비틀림, 구부러짐, 온도, 압력, 자장 등에 의해 복굴절이 발생한다. 광섬유에서의 전체적인 편광 상태는 시간과 온도에 따라서 변화하며 이러한 편광상태의 불확실성은 여러가지 광 응용에 문제점을 안겨주고 있다. 따라서 자기장에 의한 광섬유의 편광 변화를 이용하여 전류를 측정하는 시스템에서도 편광을 지속적으로 유지하는 광섬유가 요구된다. 편광을 유지하는 광섬유에 대한 연구는 Schneider<sup>6)</sup> 이래 여러가지 제조방법<sup>7)</sup>이 소개되고 있다. 광섬유의 복굴절 해석은 1954년 Jerrad가 Poincare sphere를 이용하여 유전체의 복굴절을 해석한 이후<sup>9)</sup> 1981년 Sakai는 광섬유가 비틀림, 구부러짐, 압력 등에 의해 발생하는 복굴절 및 편광 특성을 결합 모드 이론으로 해석하였고, 1980년 Harms 등은 단일 모드 광섬유의 전류 측정을 이상적으로 적용하기 위해 복굴절이 극도로 낮아야 하는 조건을 고찰하고 광섬유를 포함한 전류 측정 시스템의 최적 파라미터를 분석하였다.<sup>10)</sup> 그러나 일반적인 단일모드 광섬유는 제조과정 및 온도 등의 외부적인 요인에 의해 편광 상태가 바뀌어 광 계측용으로는 부적합하므로 편광을 지속적으로 유지시켜 줄 수 있는 광섬유가 요구된다. 본 논문에서는 편광유지 광섬유의 한 종류인 저복굴절 광섬유에 대하여 이론적으로 해석하고 자체 측정에 대한 실험 결과를 단일 모드 광섬유의 실험 결과<sup>11)</sup>와 비

교한 결과 단일모드 광섬유 보다 편광유지 특성이 양호하게 나타나는 것을 확인하였다.

## 2. 복굴절 현상과 비트 장<sup>1)</sup>

완전한 원형 대칭구조의 단일모드 광섬유에서는 수직 편광성분을 갖는 두개의 모드 즉,  $E_{x1}$  모드와  $E_{y1}$  모드가 축퇴되어 빛이 전파된다. 이때 주축 X와 Y는 그림 1의 (a)에서 처럼 광섬유 단면의 대칭 요소에 의하여 결정되는데 단면의 비등방성이 커질수록 두 고유모드에 대한 전파상수  $\beta_x$ 와  $\beta_y$ 의 차는 더욱 커진다.

광섬유 단면이 광섬유의 길이 Z와 무관하다고 하면 복굴절차는 B는

$$B = (\beta_x - \beta_y) / (2\pi/\lambda) \dots\dots\dots(1)$$

로 주어진다. 여기서  $\lambda$ 는 광의 파장이다. 한편 X축에 대하여  $\theta$ 의 각도로 편광된 빛을 입사시켰을 경우 위상 지연이 길이에 따라서 변하므로

$$\Phi(Z) = (\beta_x - \beta_y)Z \dots\dots\dots(2)$$

로 되어 편광 빛의 전파는 타원 편광의 여러 형태로 변하면서 전파된다. 직선 편광된 빛을  $Z=0$ 점에서  $\theta=45^\circ$ 로 입사시키면 그림 2(a)에서 알 수 있듯이  $\Phi=\pi/2$ 에서 좌회전 원편광이 되고  $\Phi=\pi$ 에서는  $\theta=-45^\circ$ 를 갖는 선형편광이 되고  $\Phi=3\pi/2$ 에서는 우회전 원편광이 되며  $\Phi=2\pi$ 에서  $\theta=45^\circ$ 를 갖는 선형편광으로 되어 원래의 편광 상태로 되돌아 온다. 이때  $\Phi(L)=2\pi$ 가 되는 길이 L을 비트장(beat length)이라 정의하고 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$L = \lambda/B = 2\pi/(\beta_x - \beta_y) \dots\dots\dots(3)$$

실질적으로 광섬유에서의 섭동은 주로 광섬유의 구조, 구성물, 응력 등에 의하여 일어나는데 이러한 섭동은 프리폼으로 광섬유를 뽑는 과정에서 또 구부러짐, 꼬임등에 의해서 발생하는 것으로 보고 되고 있다. 임의의 광섬유가 길이에 따라 섭동량이 정량적으로 정해졌을 경우에는 출력 편광 상태를 직접 계산할 수 있지만 그러나 일반적으로 이러한 정보는 정량적으로 해석 될 수 없으므로 섭동을 취급하기 위해서는 Z에 대한 랜덤 함수로서 간주하고 해석하

게 된다. 섭동되지 않는 광섬유의 주축이 섭동된 광섬유의 주축과 일치하지 않으면 두 고유 모드사이에는 에너지 결합 즉 결합 모드가 생긴다. 그림1의 (a)와 (b)에 섭동되지 않은 광섬유와 섭동된 광섬유의 단면이 나타나 있다.

만일 섭동이 주기를 가지고 발생하면 아래식과 같이 나타낼 수 있다.

$$(\beta_x - \beta_y) = K + \Delta K \dots\dots\dots(4)$$

여기서  $K = 2\pi/\Lambda$ 는 Z방향 섭동의 공간주파수,  $\Lambda$ 는 섭동주기,  $\Delta K = \pi/l$ ,  $l$ 은 광섬유의 길이이다. 따라서 주기적인 섭동이 발생할 경우에는 하나의 편광모드로부터 다른 편광모드로의 완전한 결합이 가능하지만 일반적으로 섭동  $r(Z)$ 는 그림 1의 (c)에서 보여주는 바와 같이  $r(Z)$ 의 평균값이 0으로 되는 Z에 관한 랜덤함수로 주어지게 된다. 이때 상관함수  $r(Z)$ 의 푸리에 변환을 취하면 공간주파수의 함수로서 파워스펙트럼  $|r(K)|^2$ 을 갖는다. 그리고 공간주파수에 대한  $|r(K)|^2$ 의 함수를 나타내면 그림1의 (d)와 같이 저역 통과 필터와 같은 특성을 갖는다. 대표적으로 섭동주기  $\Lambda = 1\text{mm}$ 에서 파워 스펙트럼은  $\Lambda \rightarrow \infty$ 일때의 파워 스펙트럼에 비해  $-40\text{dB}$  정도이다. 광섬유를 뽑아내는 공정에서 발생하는 Power Spectrum의 섭동(요동)은 어느 임계값보다 적은 섭동주기에 대하여는 cut off 시킬 수 있도록 해야 한다. 또 산란손실이 무시될 수 있도록 작으려면  $\Lambda$ 는  $1\text{mm}$ 보다 커야 한다. 그 이유는 광섬유의 유도 방향에 있어서 모든 결합은 주기  $\Lambda < r\Delta n \approx 1\text{mm}$  ( $\lambda = 1\mu\text{m}$ , 코어/클래드 굴절율차  $\Delta n = 10^{-3}$ 일 경우)의 조건을 만족시켜야 하기 때문이다.

따라서  $|r(K)|^2$ 가 그림1의 (d)와 같은 저역통과 특성을 갖는다.

여기서 차단 공간주파수  $K_c$ 를 다음과 같이 정의할 때

$$\frac{|\Gamma(K_c)|^2}{|\Gamma(0)|^2} = 10^{-4} \dots\dots\dots(5)$$

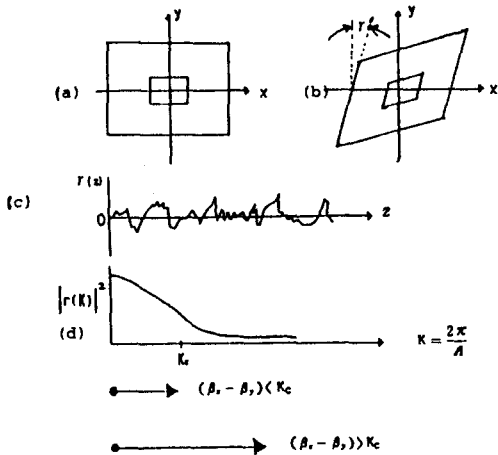


그림 1. 임의의 섭동에 의한 편광변화

- (a) 섭동되지 않은 단면
- (b) Shear 섭동  $r$
- (c)  $r(z)$ 의 변화
- (d) 파워 스펙트럼

Fig. 1. Variation of polarization due to arbitrary perturbation

- (a) cross-sectional view of unperturbation
- (b) Shear perturbation
- (c) variation of  $r(z)$
- (d) power spectrum

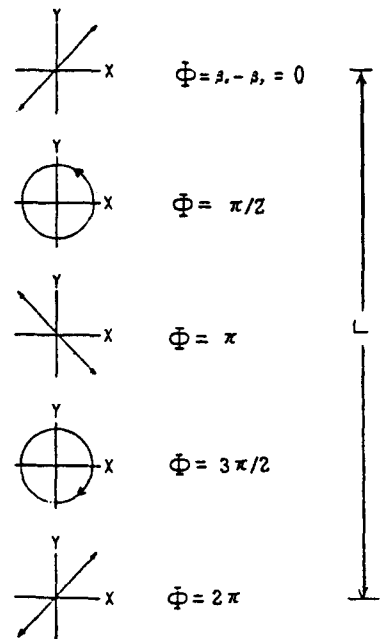


그림 2. 비트장의 개념도

Fig. 2. Conceptual diagram of beat length

모드간의 파워결합을 적게 하기 위해서는

$$|\beta_x - \beta_y| \gg K_c \dots\dots\dots(6)$$

로 하거나 비트장에 관한 (3)식과 차단 공간주파수 주기  $A_c = 2\pi/K_c$ 의 관계를

$$L \ll A_c \dots\dots\dots(7)$$

의 조건이 되게 한다. 그러므로 광섬유의 편광 상태를 유지하기 위해서는 두가지 측면에서 고려될 수 있다. 첫번째로 모드 복굴절 B를 크게 하거나 비트장 L을 작게하는 방법이 있고, 둘째로 차단공간 주파수  $K_c$ 를 증가시키는 방법이 있다. 첫번째 방법으로 제조한 광섬유를 고 복굴절 광섬유(high birefringence fiber)라 하고 두번째 방법으로 제조된 광섬유를 저 복굴절 광섬유(low birefringence fiber)라 한다. 저 복굴절 광섬유의 경우 임의의 길에서 고유 복굴절에 의한 총 위상지연이 적고 온도에 의한 복굴절 변화가 거의 없어 편광모드 분산이 크게 감소하는 잇점이 있으므로 자기광학 효과를 이용한 전류(자계)측정에 이용한다.

### 3. 섭동된 광섬유의 복굴절 해석

일반적으로 단일모드 광섬유에서는 서로 수직 편광된 두개의 도파모드가 존재한다. 이상적인 광섬유에서는 이러한 두개의 모드는 광섬유의 길이에 따라 같은 위상 속도로 전파된다. 그러나 실제 광섬유에서는 제조과정에서 나타나는 thermal stress 및 코어의 타원성 등에 의해 복굴절 혹은 위상 지연이 생기게 되고 결과적으로 두 개의 수직 선형 편광모드로 전파하게 된다. 이러한 선형 복굴절의 결과에 의해 직선 편광된 빛은 광섬유를 통과하게 되면 타원 편광으로 된다. 이때 단일모드 광섬유는 선형 지연기로 모델링하여 분석할 수 있다. 복굴절 현상을 계산하기 위하여 그림3과 같이 생각하자.<sup>14)</sup> X축과  $\theta$ 의 편광각을 이루는 직선 편광된 빛이 길이  $l$ 인 광섬유를 통과하면 빛이 진행함에 따라  $E_x$  성분과  $E_y$  성분 사이에 위상차가 생겨 출력은 타원 편광된 빛으로 나타난다.

이것을 Jones 행렬로 나타내면

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \exp(j\delta/2) & 0 \\ 0 & \exp(-j\delta/2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} E_0 \exp(j\omega t) \dots\dots\dots(8)$$

이 된다.

이때 타원의 장축  $E_1$  축이  $E_x$ 와  $\phi$ 의 각을 이룰때 다음과 같은 식이 된다.

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi & \sin\phi \\ -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \dots\dots\dots(9)$$

식 (9)에서 전체의 세기를 구하면

$$\begin{bmatrix} |E_1|^2 \\ |E_2|^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2\phi \cos^2\theta + \sin^2\phi \sin^2\theta + 1 \\ \sin^2\phi \cos^2\theta + \cos^2\phi \sin^2\theta - 1 \end{bmatrix} E_0^2 \dots\dots\dots(10)$$

이 된다.

여기서 T를 다음과 같이 정의한다.

$$T = (|E_1|^2 - |E_2|^2) / (|E_1|^2 + |E_2|^2) \dots\dots\dots(11)$$

따라서 식(10)을 식(11)에 대입하면

$$T = \cos 2\phi \cos 2\theta + \sin 2\phi \sin 2\theta \cos \delta \dots\dots\dots(12)$$

와 같이 된다.

이때 주어진  $\theta$ 값에 대해  $(\partial T / \partial \phi) = 0$ 일때 T는 최대가 될 것이다.

따라서 다음과 같은 식으로 나타내어 진다.

$$\tan 2\phi = \tan 2\theta \cos \delta \dots\dots\dots(13)$$

여기서 T의 최대치를 P로 정의하고

식(12)와 식(13)을 이용하면 아래식이 얻어진

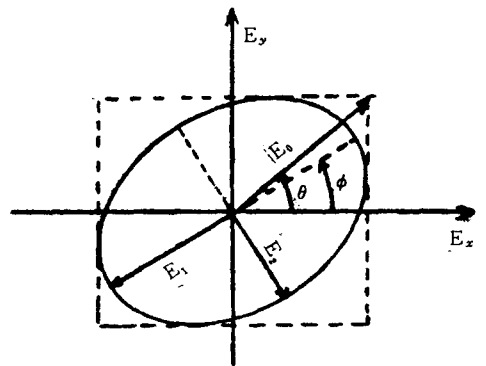


그림 3. 복굴절의 설명도

Fig. 3. Diagram for calculating the birefringence model

다.

$$P = (\cos^2 2\theta + \sin^2 2\theta \cos^2 \delta)^{1/2} \dots\dots\dots(14)$$

식(13)에서는  $\theta$ 와  $\phi$ 의 관계를 알 수 있는데 각  $\theta$ 가  $(\pi/4)m$  ( $m=1, 2, 3\dots$ )일때  $\phi$ 와 일치하고 다른 각도에서는 위상지연  $\delta$ 에 따라  $\theta$ 와  $\phi$  사이의 각이 결정된다. 식(14)에서는  $\theta$ 와 P의 관계를 알 수 있는데 입사각  $\theta$ 에 따른 P의 최대, 최소는 다음과 같이 나타낸다.

$$\text{최대치} : P=1, \theta=m(\pi/2) \dots\dots\dots(15)$$

$$\text{최소치} : P=|\cos\delta|, \theta=(2m+1)(\pi/4) \dots\dots\dots(16)$$

(단, m은 정수)

P=1일때는 직선 편광이고 P=0일때는 원형 편광이며  $0 < P < 1$ 일때는 편광이 됨을 알 수 있다. 이때  $\theta=45^\circ$ 로 입사하여 광검출 회로로 편광도 P를 측정하면 광섬유의 고유 위상지연  $\delta$ 값을 측정할 수 있다.

#### 4. 파라데이 효과와 복굴절의 중첩이론

광섬유가 축방향으로 외부 자계(H)의 영향을 받으면, 고유 복굴절에 의한 위상차와 파라데이 효과에 대한 편광 회전이 복합된 형태로 나타나며 Wollaston 프리즘에 의하여 두개의 Wollaston축 방향 성분이 공간적으로 분리되어 두 광검출기로 검출된다. 즉, 일정하게 편광된 빛이 광섬유내를 통과할때 이 빛의 진행방향으로 자계가 인가되면 파라데이 효과에 의해 편광각이 회전하게 된다. 이러한 편광각의 회전량은 자계의 세기와 자계의 영향을 받는 광섬유의 길이  $l$ 에 비례하며 이때의 회전각  $\Omega$ 는

$$\Omega = V \int_0^L H \cdot dL \dots\dots\dots(17)$$

이 된다.

여기서 V는 Verdet 상수로서 단위 센서 길이당 회전량이며 물질에 따라 값이 다르다. 또  $l$ 는 자계의 영향을 받은 광섬유의 길이이다. 이와같이 외부자계를 광섬유 축방향으로 인가하면 식(17)에 의한 파라데이 회전량과 광섬유 자체의 고유 복굴절이 중첩되어 나타나게 된다. Jones 행렬식을 사용하여 길이  $l$ 인 광

섬유를 통해 나오는 출력의 전계 성분  $E_x, E_y$ 는 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}_\ell = \begin{bmatrix} A & -B \\ B & A^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}_0 \dots\dots\dots(18)$$

여기서

$$A = \cos\alpha + j(\delta/2\alpha)\sin\alpha$$

$$B = (\Omega/\alpha)\sin\alpha$$

$$\alpha^2 = \Omega^2 + (\delta/2)^2$$

$$A^* = \cos\alpha - j(\delta/2\alpha)\sin\alpha$$

이다.

한편 복굴절 영향을 최소로 하기 위해 입력 선형 편광각을 광섬유의 복굴절 축과 일치하도록 한다.

$$\text{즉 } \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} E_0 \exp(j\omega t) \dots\dots\dots(19)$$

출력광은 광섬유의 복굴절 축과  $45^\circ$  각으로 놓인 Wollaston 프리즘의 두 광축측 1과 2를 통과하여 다음의 두 빛  $E_1, E_2$ 를 광검출기로 검출되며 그 편광 방향은 1, 2축과 각각 일치한다.

이 두 빛의 크기는

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}_\ell \dots\dots\dots(20)$$

이고, 다음 식을 아날로그 회로에 의해 측정할 수 있다.

$$T = (|E_1|^2 - |E_2|^2) / (|E_1|^2 + |E_2|^2) \dots\dots\dots(21)$$

여기서 T는 자계에 의해 편광각이 회전할 정도를 상대적으로 나타내는 파라미터이다.

식(19)를 식(18)에 대입하고 이를 식(20)에 대입하면

$$E_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(A+B) E_0 \exp(j\omega t)$$

$$E_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}(-A+B) E_0 \exp(j\omega t) \dots\dots\dots(22)$$

이 된다.

한편

$$|E_1|^2 = E_1 \cdot E_1^* = \frac{1}{2} \{ \cos^2\alpha + (\Omega/\alpha)^2 \sin^2\alpha + (2\Omega/\alpha)\sin\alpha \cos\alpha + (\delta/2\alpha)^2 \times \sin^2\alpha \} E_0^2 \dots\dots\dots(23)$$

이고

$$|E_2|^2 = E_2 \cdot E_2^* = \frac{1}{2} \{ \cos^2 \alpha - (2Q/\alpha) \cos \alpha \sin \alpha + (Q/\alpha)^2 \sin^2 \alpha + (\delta/2\alpha)^2 \times \sin^2 \alpha \} E_0^2 \dots\dots\dots(24)$$

이다.

따라서

$$T = \frac{(\frac{4Q}{\alpha}) \cos \alpha \sin \alpha}{2 \cos^2 \alpha + (\frac{2Q^2}{\alpha^2}) \sin^2 \alpha + 2(\frac{\delta}{2\alpha})^2 \sin^2 \alpha} \dots\dots\dots(25)$$

이다.

여기서  $\alpha^2 = Q^2 + (\delta/2)^2$ 을 이용하면

$$T = 2Q \left( \frac{\sin 2\alpha}{2\alpha} \right) \dots\dots\dots(26)$$

로 된다.

일반적으로  $Q \ll \delta/2$ 가 성립하므로 식(26)은

$$T \approx 2Q \left( \frac{\sin \delta}{\delta} \right) \dots\dots\dots(27)$$

가 된다. 식(27)로부터 이상적인 광섬유의 경우 고유 복굴절이 없기 때문에  $T=2Q$ 이 되어 식(17)의 관계로부터  $T$ 가  $Q$ 에 비례함을 알 수 있다.

### 5. 실험장치 구성 및 결과 고찰

고유 복굴절 및 파라데이 회전에 의한 편광 상태의 변화를 측정하기 위한 실험장치를 그림 4와 같이 구성하였다. 실험에 사용한 레이저는 He-Ne 레이저로 파장은  $6328\text{\AA}$ 이며 출력은 최대  $5\text{mW}$ 이다. 레이저에서 나온 선형편광된

표 1. 저복굴절 광섬유의 사양

Table1. Specifications of Low Birefringent Optical Fiber

코어	물질	GeO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub>
코어 지름		3.5μm
클래딩 물질		B <sub>2</sub> O/SiO <sub>2</sub>
클래딩 지름		125μm
감쇠	손실	12dB/Km
차단 파장		600nm이하
상대 굴절률 차		0.00395
개구면 (NA : Numerical Aperture)		0.13 ± 0.02

빛은 λ/4플레이트를 통과하면서 원편광으로 변환되어 일정한 출력으로 직선편광기를 통과한다. 직선편광기를 통과한 선형편광된 빛은 배율이 10배인 대물렌즈에 의해 광섬유에 집속되어 전파한다. 다시 광섬유에서 나오는 빛은 대물렌즈를 통과한 선형편광된 빛이 Wollaston 프리즘에 입사된다. 입사된 선형편광된 빛은 Wollaston 프리즘에 의해 두개의 고유 모드로 분리되는데 분리되는 각도는 20°이다. 분리된 빛은 PIN-PD로 수광되어 검출되고 아날로그 회로에서 신호처리 된다.

광자계 측정 시스템에서 사용된 저복굴절 광섬유의 사양은 표1과 같고 솔레노이드는 그림 5와 같이 제작되었다. 솔레노이드에 흐르는 전류는 슬라이닥스로 가변되었고 전선은 5A까지 견딜 수 있는 굵기로 2,000번을 감았다. 이는 가장 작은 반지름인 10mm에서 가장 큰 반지름인 30mm까지 7겹으로 되어있고 길이는 500mm

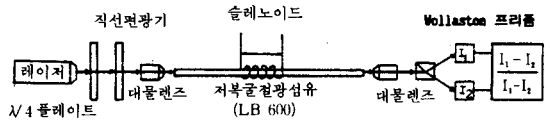


그림 4. 솔레노이드 광자계 측정 시스템

Fig. 4. A system to measure magnetic field strength

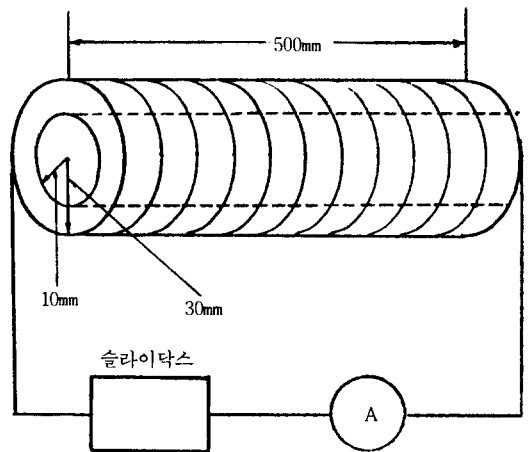


그림 5. 솔레노이드 구성

Fig. 5. Structure of Solenoid

이다. 또 자계의 형성 방향은 광섬유의 축방향으로 되도록 하였다. 솔레노이드자계에 의한 파라데이 회전각  $Q$ 는 다음과 같이 유도된다.

$$Q = V \int H \cdot d \ell$$

$$= V \int_0^L \frac{NI}{2L} \left[ \frac{z}{\sqrt{z^2+a^2}} + \frac{L-z}{\sqrt{(L-z)^2+a^2}} \right] dz$$

.....(28)

이고, 여기서  $L=0.5$ ,  $N=2,000$ 이므로

$$= 4,000VI \int_a^{\sqrt{0.5^2+a^2}} \frac{dt}{\sqrt{0.25+a^2-t^2}}$$

$$= 4,000VI(\sqrt{0.25+a^2}-a) \dots\dots\dots(29)$$

이다.

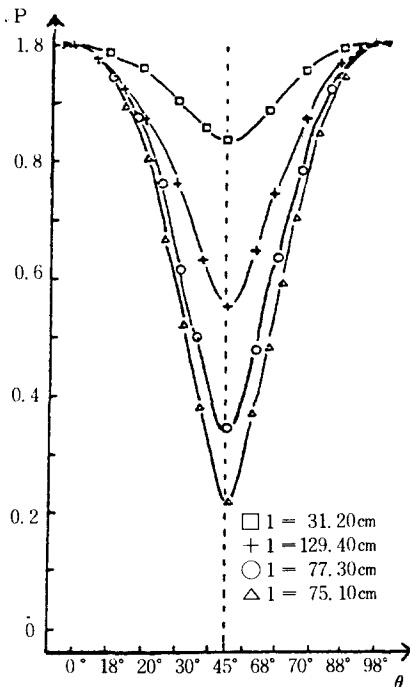
이때  $a$ 는 솔레노이드의 반지름으로 중간 반지름(20mm)을 기준으로 하면 전류와 파라데이 회전각과는

$$Q \approx 1,921.6VI \dots\dots\dots(30)$$

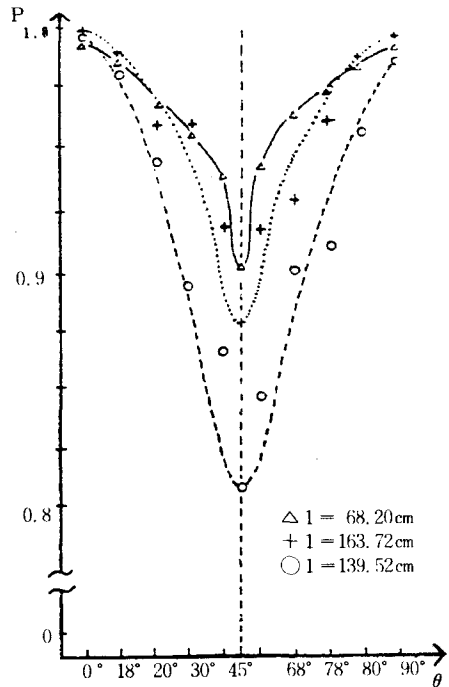
의 관계를 갖는다.

그림6은 입력 편광각에 대한 편광도 변화를 단일모드 광섬유와 저복굴절 광섬유 각각에 대한 실험 결과를 나타낸 것이다. 그림 6의 (a)는 1978년 Adams에 의해 실험된 결과이고 (b)는 본 논문에서 측정된 결과이다. 또한 각각의 그림에서 X축은 입력 편광각의 크기이고 Y축은 편광도의 크기를 나타낸다. 이때 두 그림을 비교해 보면 그림(b)의 경우 편광도가 0.818 이상을 보이고 있어 그림(a)에 비해 선형 복굴절이 무척 낮음을 볼 수 있다.

그림7은 입출력 편광각의 변화를 단일 모드 광섬유와 저복굴절 광섬유 각각에 대한 실험 결과로서 나타낸 것이다. 그림 6과 마찬가지로 그림 7의 (a)는 Adams에 의해 실험된 결과이고 (b)는 본 논문에서 실험된 결과이다. 또한 각각의 그림에서 X축은 입력 편광각의 크기이고 Y축은 출력 편광각의 크기이다. 이때 두 그



(a) 일반 단일모드 광섬유<sup>11)</sup>  
(a) normal single mode fiber



(b) 저 복굴절 단일모드 광섬유  
(b) low birefringent single mode fiber

그림 6. 입력편광각에 대한 편광도 변화

Fig. 6. Variation of polarization degree due to input polarization angle.

림을 비교해 보면 그림(a)에서는 최대 오차가 20° 이상을 보인 반면 그림(b)에서는 9° 이내를 보이고 있어 저복굴절 광섬유가 단일 모드 광섬유에 비해 선형 복굴절이 훨씬 작음을 알 수 있다.

또 저복굴절 광섬유의 편광 회전이 매우 작은 것으로 분석되는데 실험결과는 그러한 분석을 만족시킨다. 따라서 두가지의 고유 복굴절 측정 실험 결과에 의해 저복굴절 광섬유는 자계 측정에 있어서 민감도를 한층 높일 수 있음을 확인하였다. 하지만 이론치와의 오차는 여전히 남아 있음을 알 수 있다. 이러한 오차의 원인으로 자연광과 광섬유의 구부림이 가장 큰 원인으로 보이고 온도 파장등도 고려되어야 할 것이다.

그림8은 자계 세기에 따른 출력  $T_{rms}$  값의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 실험 결과는 자계의 변화에 대한 출력의 변화가 선형적인 관계임을 보이고 있다. 여기서 X축은 인가된 자계의 세기이고 Y축은 그에 따른 검출기 출력  $T_{rms}$  값의 크기이다. 이때 실험치에서 계산된 결과와 실제 전류치 사이의 최대 오차는 4kAT에서 78AT이었다.  $l = 163.72\text{cm}$ 인 광섬유를 이용하여 자계의 변화에 따른 광검출기

출력  $T_{rms}$ 의 변화를 측정하였다. 실험 결과 두 함수관계는 매우 높은 선형성을 유지하고 있었다. 이러한 실험 결과의 선형성이 어느 정도인가를 알기 위해 식(27)과 앞에서 구한 파라데이 효과에 의한 회전각  $\theta$ 를 이용하여 10kAT에서의 Verdet 상수를 계산하였다. 계산된 값은  $3.95 \times 10^{-6}\text{rad/AT}$ 로 일반 단일모드 광섬유의  $2.3 \times 10^{-6}\text{rad/AT}$  보다 우수함을 알 수 있었다. 최대 측정 오차가 4kAT에서 78AT으로 나타났는데 이와 같은 오차는 고유 복굴절 및 자연광의 제거 등으로 더욱 감소시킬 수 있을 것이다. 한편 본 논문에서는 측정된 자계가 10kAT의 높은 자계임에도 불구하고 시스템과의 전자기 간섭을 무시할 수 있음을 확인하였다. 즉, 이것은 이 시스템이 대전류 측정에 있어서 기존 시스템의 가장 큰 문제점인 전자기 간섭을 배제할 수 있고 고전압의 절연 설계 문제를 용이하게 해결할 수 있으리라 본다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 저복굴절 광섬유의 편광 특성과 자기 광학적 성질을 분석하고 실험하였다. 실험에 앞서 저복굴절 광섬유의 고유 복굴절

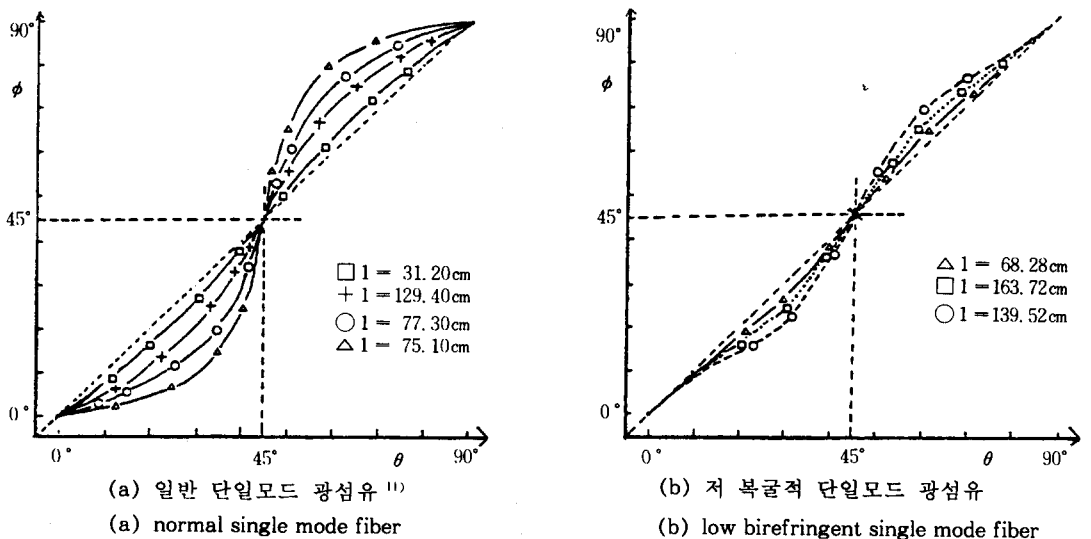


그림 7. 입출력 편광각의 변화

Fig. 7. Variation of input/output polarization angle.



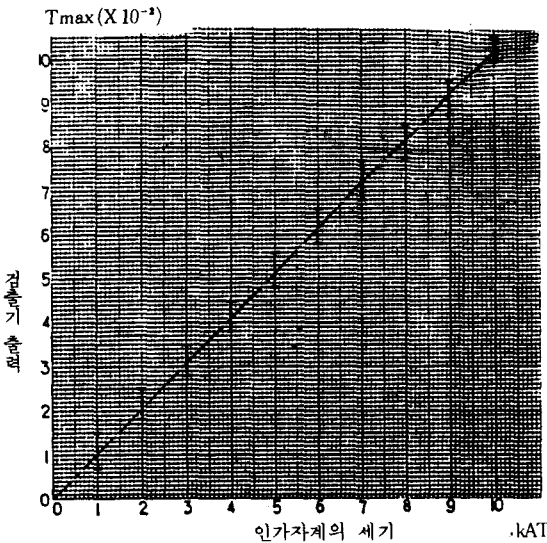


그림 8. 자기 변화에 따른 검출기 출력

Fig. 8. Detector output due to magnetic field strength

및 자기 광학적 효과에 의한 복굴절 변화를 분석하였고 그 결과 기존의 일반 단일 모드 광섬유에 비해 위상 지연 및 편광 회전각이 뛰어나게 감소될 수 있어 매우 우수한 편광 유지 특성을 가짐을 알 수 있었다. 저복굴절 광섬유로 구성된 자기 측정 시스템은 10kAT까지의 자기장도를 선형 적으로 측정할 수 있어 대전류용 측정에 적합할 것으로 예상된다.

앞으로 구부림, 온도, 파장 등에 따른 저복굴절 광섬유의 특성을 연구하여 최적의 파라미터를 얻는다면 더욱 민감도를 높일 수 있을 것으로 기대된다.

### 참 고 문 헌

- 1) P. Kaminow, "Polarization in optical fiber", IEEE J. Quantum Electronics, Vol. QE-17, no.1, p.15, 1981
- 2) T. G. Giallorenzi et al., "Optical fiber sensor technology," IEEE J. Quant. Electronics, Vol. QE-18, no.4 p.626, 1982.
- 3) Yamatomo Y et al., "Coherent Optical fiber transmission systems," IEEE J. Quantum Electronics, Vol. QE-17, no.6, p.919, 1981.

- 4) A. M. Smith, "Birefringence induced by bends and twists in single mode optical fiber," Applied Optics, vol.17, no.5, p.2606, 1980.
- 5) G. B. Hocker, "Fiber optic sensing of pressure and temperature," Applied optics, vol.18, no.9, p.1445, 1979.
- 6) H. Schneider, et al., "Low birefringence single mode optical fibers; Preparation and polarization characteristics," Applied Optics, vol.17, p.3035, 1978.
- 7) Juichi, et al., "Polarization-maintaining fibers and their applications," IEEE J. Lightwave Technology, vol. LT-4, no.8, p. 1071, 1986.
- 8) Y. SASKKI, et al., "Fabrication of polarization-Maintaining and Absorption-Reducing Optical Fibers," Review of Electrical Communication Laboratories, vol.31, No.3, 1983.
- 9) H. G Jerrad, "Transmission of light through birefringence and optically active media : The poincare sphere," J.Opt. Soc. Am., vol. 44,no.8, p.633, 1964.
- 10) H. Harms & A. Papp, "Magneto-optical current transformer 3 : Measurement," Applied Optics, vol.19, no.22, p.3741, 1980.
- 11) A. M. Smith, "Polarization and magneto-optical properties of single mode optical fiber," Applied Optics, vol, 17, no.1, p.52, 1978.
- 12) A. J. Barlwo, et al., "Production of single mode fibers with negligible intrinsic birefringence and polarization mode dispersion," Electronics Letters, vol.17, no.20, p. 725, 1981.
- 13) H. Harms, et al., "Magneto-optical properties of index-gradient optical fibers." Applied Optics, vo.15, No.3, p.799, 1976.
- 14) A. Papp, et al., "Polarization optics of index-gradient optical waveguide fibers." Applied Optics, vol.14, no.10, p.2407, 1975.