

Spun 광섬유를 이용한 전류 측정에 관한 연구

(A Study on the Current Measurement Using Spun Fiber)

權元鉉*, 全石熙*, 金永洙**, 金堯喜**, 朴漢奎*

(Won Hyun Kwon, Suk Hee Jeon, Young Soo Kim, Yo Hee Kim and Han Kyu Park)

要 約

본 논문에서는 편광 유지 광섬유의 일종인 spun 광섬유의 고유 복굴절 및 자기 광학 효과에 의한 편광 특성을 이론적으로 해석하고 실험하였다.

Spun 광섬유의 고유 복굴절을 나타내는 편광도는 최소 0.818 이상으로 측정되었고 입력 편광각에 대한 출력 편광각의 변화는 9° 이내로 측정되어 단일 모드 광섬유의 편광 특성에 비해 spun 광섬유가 매우 우수한 편광 유지 특성을 갖음을 알 수 있었다.

Spun 광섬유로 구성된 전류 측정 시스템은 솔레노이드로 인가된 20,000A/m까지의 자계 강도를 선형적으로 측정 가능 하였다.

Abstract

In this paper, the polarization properties of spun fiber due to intrinsic birefringence and magneto-optic effects are theoretically analyzed and experimented.

The degree of polarization which indicates the intrinsic birefringence is measured over 0.818, and the variation of output polarization angle with input polarization angle is measured within 9° . Compared with single mode fiber, spun fiber is found to have very excellent polarization-maintaining property.

Implemented current measurement system using spun fiber can linearly measure the magnetic field up to 20,000 A/m generated by solenoid.

I. 서 론

일반적으로 광섬유를 통하여 진행하는 빛은 여러 가지 원인에 의해 마치 광학적으로 균일하지 않은 매질 속을 진행할때와 같은 편광 특성 즉 복굴절¹⁾이 나타나는데 이러한 편광 특성은 광섬유 센서,²⁾³⁾

허런트 광통신 시스템⁴⁾ 및 광 집적회로 등에 응용되고 있다. 특히 광섬유 센서는 광섬유의 무유도성, 절연성, 안전성 등의 특성과 기존의 시스템을 소형, 경량화 할 수 있는 잇점 때문에 전류, 전압, 온도, 각속도, 진동, 압력 측정 등의 정밀 측정이 가능하다.

이상적인 광섬유의 경우 그 구성이 균일하고 원대칭이므로 복굴절이 나타나지 않지만 광섬유의 제조 과정에서 코어 단면의 타원 변형, 불균형한 응력 등에 의해 고유 복굴절이 발생한다. 또한 외부의 여러 원인 즉 비틀림, 구부러짐,⁵⁾ 온도, 압력, 자장⁶⁾ 등에 의해 복굴절이 발생한다. 광섬유에서의 전체적인

*正會員, 延世大學校 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., Yonsei Univ.)

**正會員, 韓國電氣研究所 電力電子研究部

(Power Electronics Research Division KERI)

接受日字: 1988年 5月 18日

편광 상태는 시간과 온도에 따라서 변화하며 이러한 편광상태의 불확실성은 여러가지 광 응용에 문제점을 안겨 주고 있다. 따라서 자기장에 의한 광섬유의 편광 변화를 이용하여 전류를 측정하는 시스템에서도 편광을 지속적으로 유지하는 광섬유가 요구된다. 편광을 유지하는 광섬유에 대한 연구는 Schneider^[6] 이래 여러 가지 제조 방법이^[7] 소개되고 있다.

광섬유의 복굴절 해석은 1954년 Jerrad가 Poincare sphere를 이용하여 유전체의 복굴절을 해석한 이후,^[8] 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.^[9]

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 A. J. Barlow에 의해 만들어진 Spun 광섬유에^[10] 대하여 이론적으로 해석하고 자체 측정에 대한 실험 결과를 단일모드 광섬유의 실험 결과와 비교하였다.^[11]

II. Spun 광섬유의 특성

단일모드 광섬유에서의 빛의 전파는 두 개의 수직 편광과 HE₁₁^x 모드와 HE₁₁^y 모드가 축퇴된 것이다. 광섬유의 단면의 비등방성이 커질수록 두 고유모드에 대한 각각의 전파상수 β_x, β_y의 차이는 더욱 커진다.

이때 두 모드 간의 복굴절차 B는

$$B = (\beta_x - \beta_y) / (2\pi/\lambda) \tag{1}$$

이다. 여기서 λ는 자유공간에서의 광의 파장이다.

만약 두 고유 모드 성분이 일정한 위상을 유지한다면, 위상지연

$$R(z) = (\beta_x - \beta_y)z \tag{2}$$

가 길이와 함께 변하므로 X축에 대해 각 θ로 편광된 빛은 다양한 편광 상태를 이룬다. 한편 직선 편광된 빛은 z=0에서 θ=45°로 입사시키면 일정한 길이를 진행한 후 임의의 길이 L에서 R(L)=2π가 되어 본래의 편광 상태로 돌아오는데 이것을 “beat length”라 정의하고 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$L = \lambda/B = 2\pi / (\beta_x - \beta_y) \tag{3}$$

일반적인 광섬유에서는 형태, 구성물, 응력 등에 의해 섭동이 발생하는데 이러한 섭동량은 길이에 따라 비례 관계를 갖지 않으므로 출력 편광 상태를 예측할 수 없다. 그리고 섭동되지 않은 광섬유의 주축이 섭동된 광섬유의 주축과 일치하지 않으면 고유 모드 사이에 결합 모드가 생긴다. 섭동되지 않은 광섬유와 광섬유의 단면이 그림 1의 (a), (b)에 나타나 있다.

일반적으로 섭동 γ(z)는 평균값 ⟨γ(z)⟩=0인 값을 갖는 z의 랜덤 함수이고 그림 1의 (c)에 나타내었다. 이때 코릴레이션 함수 γ(z)의 푸리에 변환은 공간 주파수의 함수로서 파워 스펙트럼 |Γ(k)|을 갖는다. 그리고 공간 주파수에 대한 |Γ(k)|의 함 함수를 나타내면 그림 1의 (d)와 같이 저역 통과 필터와 같은 특성을 갖는다. 섭동이 주기 Λ를 가질 경

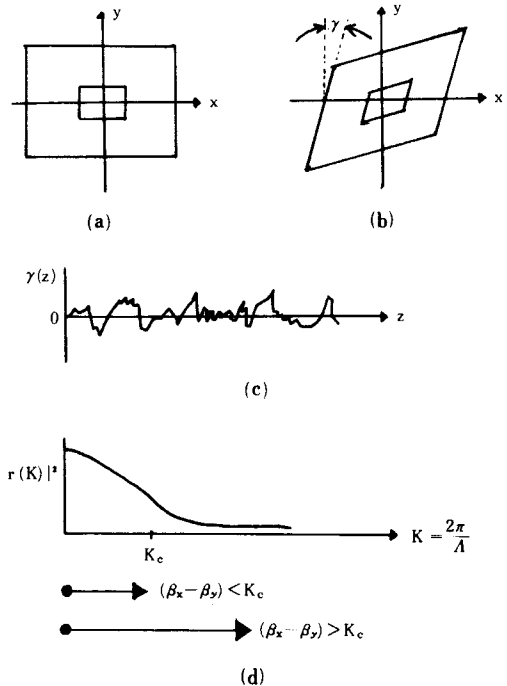


그림 1. 임의의 섭동에 의한 편광 변화

- (a) 섭동되지 않는 단면
- (b) Shear 섭동 γ
- (c) γ(z)의 변화
- (d) 파워 스펙트럼

Fig. 1. Variation of polarization due to arbitrary perturbation.

- (a) cross-sectional view of unperturbation.
- (b) shear perturbation γ.
- (c) variation of γ(z).
- (d) power spectrum.

우에만 빛은 한 편광 모드로부터 다른 편광 모드에 완전히 결합될 수 있으며, 그 때 $|\beta_x - \beta_y| = K \pm \Delta K$ 이다. 여기서 $K = 2\pi/\Lambda$ 은 섭동의 공간 주파수이고, $\Delta K = \pi/\ell$ 이며 ℓ 은 광섬유의 길이이다. 일반적으로 $\Lambda = 1\text{mm}$ 에서의 값은 $\Lambda \rightarrow \infty$ 에서의 파워 스펙트럼에 비해 -40dB 인데 산란 손실이 무시되도록 작으려면 Λ 는 1mm 보다. 커야 한다.

차단 공간주파수 K_c 를 다음과 같이 정의할 때

$$\frac{|\Gamma(k_c)|^2}{|\Gamma(0)|^2} = 10^{-4} \quad (4)$$

모드 간의 파워 결합을 적게하기 위해서는

$$|\beta_x - \beta_y| \gg K_c \quad (5)$$

로 하거나 beat length L 과 차단 공간 주파수 주기 Λ_c 의 관계

$$L \ll \Lambda_c \quad (6)$$

의 조건이 되게 한다. 그러므로 편광 상태를 유지하기 위해서 복굴절차 B 를 크게 하는 방법과 차단 공간 주파수 Λ_c 를 크게 하는 방법이 있다. 첫번째 방법으로 제조한 광섬유를 편광 유지 광섬유 중 고복굴절 광섬유, 두번째 방법으로 제조한 광섬유를 저복굴절 광섬유라고 하는데 후자의 경우 retardance 가 1° 이하이고 온도에 의한 복굴절 변화가 거의 없어 편광 모드 분산이 크게 감소하는 잇점이 있으므로 파라데이 효과를 이용한 전류 측정에 이용한다. 이것은 다시 비틀림 광섬유와 spun 광섬유로 구분할 수 있는데, 비틀림 방법은 제조 과정에서 비틀림을 조절함으로써 일반적인 단일 모드 광섬유에서의 선형 복굴절을 감소시키나 광 탄성 효과에 의한 torsional stress 를 야기시켜 비틀림에 비례하는 시광성을 일으키므로 원형 복굴절이 증가한다. 이러한 단점을 극복하기 위해 제조시 광섬유를 비트는 대신 고온에서 preform 을 빠른 속도로 돌림으로서 구조적인 효과를 얻어 복굴절을 줄일 수 있고 온도 특성도 좋은 spun 광섬유가 개발되었다.

비틀림 광섬유와 Spun 광섬유에서 일어나는 복굴절 현상을 해석하면 다음과 같다. 비틀림을 받지 않았거나 spun 되지 않은 상태에서 고유한 선형 복굴절 $\Delta\beta$ 를 갖는 광섬유가 ζ 각도 만큼 비틀린 것으로 가정하면, 이때의 위상 지연 $R(z)$, 편광 회전 $\Omega(z)$, 주축의 위치 $\phi(z)$ 가 z 의 함수로서 다음과 같이 얻어진다.¹⁷⁾

$$R(z) = 2\sin^{-1} \left(\frac{\rho}{\sqrt{1+\rho^2}} \sin \gamma z \right) \quad (7)$$

$$\Omega(z) = \zeta z + \tan^{-1} \left(-\frac{\rho}{\sqrt{1+\rho^2}} \tan \gamma z \right) \quad (8)$$

$$\phi(z) = [\zeta z - \Omega(z)]/2 \pm m\pi/2, \quad m=0,1,2,\dots \quad (9)$$

여기서

$$\rho = \Delta\beta/2(\zeta - \alpha) \quad (10)$$

$$\gamma = \frac{1}{2} \sqrt{\Delta\beta + 4(\zeta - \alpha)^2} \quad (11)$$

이고 α 는 비틀림을 받은 광섬유에서의 광탄성 효과에 의한 광학적 회전량으로서 다음 식으로 주어지며 g' 는 비례 상수이다.

$$\alpha = g' \zeta \quad (12)$$

비틀림을 적게한 광섬유의 경우, $\zeta \ll \Delta\beta$ 이므로 식(7)에서 식(11)까지를 근사식으로 나타내면 다음을 얻는다.

$$\phi(z) \approx 0 \quad (13)$$

$$R(z) \approx \Delta\beta z, \quad z = (2m+1)\pi/\Delta\beta \text{ 는 제외} \quad (14)$$

$$\Omega(z) \approx \zeta z \quad (15)$$

가 된다. 따라서 주축에 입사한 직선 편광된 빛은 광섬유를 따라 선형 상태를 유지하고 광섬유의 비틀림과 일치하여 회전한다.

비틀림을 크게 한 광섬유는 $\zeta \ll \Delta\beta$ 이므로 식(7)에서 식(11)까지의 근사식으로 표현하면 다음과 같다.

$$R(z) \approx \frac{\Delta\beta}{\zeta - \alpha} \sin[(\zeta - \alpha)z] \quad (16)$$

$$\Omega(z) \approx \alpha z \quad (17)$$

이때 광섬유의 위상 지연은 비틀림에 의해 감소되고 0° 주위에서 진동한다. 즉, 임의의 방위각으로 입사한 빛은 αz 만큼 평평 회전한 후 다소 좌우로 타원 편광 상태가 발생하지만 거의 직선 편광된 빛으로 나타난다. 식(16)에서 비틀림이 커질수록 진동주기는 커지고 위상 지연은 더욱 작아짐을 알 수 있다. 하지만 어느정도 이상의 비틀림은 광섬유를 파괴시키므로 위상 지연을 무한히 작게 할 수는 없다. 이와 같이 비틀림을 이용한 광섬유는 자장에 민감하고 위상 지연을 감소시키는 장점은 있으나 비틀림을 크게 하는 것이 어려울 뿐만 아니라 편광의 회전이 일어난다.

따라서 여기서는 제조 과정에서 비틀림을 행함으로써 선형 복굴절에 대해서는 비틀림 광섬유와 같은 효과를 지니면서 편광 회전에 대해서는 점성이 작아 $\alpha=0$ 이 되는 spun 광섬유에 대하여 해석한다.

점성이 없으면 응력이 존재하지 않으므로 $\alpha=0$ 이고 비트는 각도(ζ)도 크게 할 수 있으므로 이 조건들을 식(7)에서 식(11)까지 적용하면

$$R(z) = (\Delta\beta/\zeta) \sin(\zeta z) \tag{18}$$

$$\Omega(z) = -\frac{(\Delta\beta)^2}{8\zeta} z \approx 0 \tag{19}$$

$$\phi(z) = \zeta z/2 \tag{20}$$

이 된다. 식(18)과 식(19)에서 $R(z)$ 와 $\Omega(z)$ 가 거의 0으로 되는 것을 알 수 있다. 즉, Spun 광섬유는 임의의 편광상태로 변하지 않고 빛을 전송할 수 있는 등방성 도파관으로 기능한다. 이것은 타원성을 또는 응력 등에 의해 일어난 도파관에서의 비대칭이 축 주위에서의 급격한 회전으로 완전히 평균적인 대칭을 이루었음을 의미한다. Spun 광섬유는 고유 편광 비등방성이 무시할 정도로 작으므로 복굴절이 거의 없다.

III. Spun 광섬유를 이용한 전류측정

광섬유의 광축과 θ_1 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. 이때 출력 빛의 장축이 광섬유의 광축에 대하여 θ_0 를 이루면 출력광은 입력광에 대하여 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$\begin{pmatrix} E'_x \\ E'_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_0 & \sin\theta_0 \\ -\sin\theta_0 & \cos\theta_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \exp\left(\frac{j\delta}{2}\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(-\frac{j\delta}{2}\right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_1 \\ \sin\theta_1 \end{pmatrix} E_0 \tag{21}$$

여기서 T를 다음과 같이 정의하여

$$T = \frac{|E'_x|^2 - |E'_y|^2}{|E'_x|^2 + |E'_y|^2} \tag{22}$$

식(21)을 대입하면 T값은 아래와 같다.

$$T = \cos 2\theta_1 \cos 2\theta_0 + \sin 2\theta_1 \sin 2\theta_0 \cos \delta \tag{23}$$

이 식에서 주어진 θ_1 에 대해 $\partial T/\partial \theta_0 = 0$ 일 때 T값이 최대가 되어 다음과 같은 조건을 이룬다.

$$\tan 2\theta_0 = \tan 2\theta_1 \cos \delta \tag{24}$$

여기서 T의 최대치를 p라 정의하면

$$P = (\cos^2 2\theta_1 + \sin^2 2\theta_1 \cos^2 \delta)^{1/2} \tag{25}$$

이 된다.

식(24)에서는 θ_1 와 θ_0 의 관계를 알 수 있는데 각 θ_1 가 $(\pi/4)m$ ($m=1,2,3,\dots$)일 때 θ_0 와 일치하고 다른 각도에서는 위상 지연 δ 에 따라 θ_1 와 θ_0 사이의 각이 결정된다. 식(25)에서는 θ_1 와 P의 관계를 알 수 있는데 입사각 θ_1 에 따른 P의 최대 최소는 다음과 같이 나타낸다.

$$P = 1 \quad : \theta_1 = m(\pi/2) \tag{26}$$

$$P = |\cos \delta| \quad : \theta_1 = (2m+1)(\pi/4) \tag{27}$$

(단 m은 정수)

$P=1$ 일 때는 직선 편광이고, $P=0$ 일 때는 원형 편광이며, $0 < P < 1$ 일 때는 타원 편광이 됨을 알 수 있다. 이때 $\theta_1=45^\circ$ 로 입사하여 광검출 회로로 편광도 P를 측정하면 고유 복굴절 δ 값을 측정할 수 있다.

직선 편광된 빛이 광섬유 내를 통과할 때 빛의 진행 방향으로 자계가 인가되면 파라데이 효과에 의하여 편광각이 회전한다. 이때의 회전각 F는

$$F = V_e \int H \cdot dl \tag{28}$$

이 된다. 여기서 V_e 는 Verdet 상수이고 ℓ 은 자계 영향을 받는 광섬유의 길이이다. 이와 같이 광섬유가 자계의 영향을 받으면 고유 복굴절 뿐만 아니라 파라데이 회전각도 고려해야 하므로 Jones 행렬은 다음과 같이 변한다.^[11]

$$\begin{pmatrix} E'_x \\ E'_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_0 & \sin\theta_0 \\ -\sin\theta_0 & \cos\theta_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A & -B \\ A & B^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_1 \\ \sin\theta_1 \end{pmatrix} E_0 \tag{29}$$

$$A = \cos\sqrt{F^2 + (\delta/2)^2} + j \frac{\delta/2}{\sqrt{F^2 + (\delta/2)^2}} \sin\sqrt{F^2 + (\delta/2)^2}$$

$$B = \frac{F}{\sqrt{F^2 + (\delta/2)^2}} \sin\sqrt{F^2 + (\delta/2)^2}$$

여기서 자계가 없다면 파라데이 회전각 $F=0$ 이므로 $A=e^{j\delta/2}$, $B=0$ 이 되어 식(21)과 같이 된다.

복굴절의 영향을 최소화하기 위해 직선 편광된 빛을 광섬유의 광축으로 입사시키고 광섬유의 광축과 45° 각으로 놓인 Wollaston Prism의 두 축을 통과한 출력 빛을 E_1 , E_2 라고 하면

$$\begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ \sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E'_x \\ E'_y \end{pmatrix} \tag{30}$$

이 된다. 이때 식(22)에서 정의된 T값을 아날로그 회로를 이용해 구하면

$$T = 2F \frac{\sin 2 \sqrt{F^2 + \left(\frac{\delta}{2}\right)^2}}{2\sqrt{F^2 + (\delta/2)^2}} \quad (31)$$

이 된다. 여기서 T는 자계에 의해 편광각이 회전한 정도를 상대적으로 나타내는 파라미터이다. 일반적으로 $F \ll \delta/2$ 이므로 식(31)은 다음으로 근사화된다.

$$T \approx 2F \frac{\sin \delta}{\delta} \quad (32)$$

IV. 실험 및 결과 고찰

고유 복굴절 및 파라데이 회전에 의한 편광 상태의 변화를 측정하기 위하여 그림 2와 같은 전류 측정 시스템을 구성하였다.

He-Ne 레이저에서 나온 직선 편광된 빛은 $\lambda/4$ 플레이트를 통과하면서 원형 편광으로 변화되어 일정한 출력으로 직선 편광기를 통과한다. 직선 편광기를 통과한 직선 편광된 빛은 배율이 10배인 대물 렌즈를 통해 광섬유에 집속되어 전파된다. 다시 광섬유에서 나오는 빛은 대물 렌즈에 의해 집속되어 wollaston 프리즘에 입사 된다. 입사된 빛은 그림 2와 같이 두개의 직선편광된 고유 모드로 분리되는데 그 각도는 20° 이다. 분리된 빛은 포토다이오드로 수광되어 검출되고 아날로그 회로에서 신호 처리된다.



그림 2. 전류 측정 시스템 구성도
Fig. 2. Current measuring system.

솔레노이드에 흐르는 전류는 슬라이더스로 가변되었고 전선은 5A 까지 견딜 수 있는 굵기로 2000번 감았다. 이는 가장 작은 반지름인 10mm에서 가장 큰 반지름인 30mm 까지 7 점으로 되어 있고 길이는 500 mm 이다. 실험에서 사용한 spun 광섬유는 York 사의 LB 600으로 이의 특성은 표 1과 같다.

여기서 솔레노이드 자계에 의한 파라데이 회전각은

$$F = V_e \int H \cdot dl = 1921.6 V_e I \quad (32)$$

의 관계를 갖는다.

그림 3은 입력 편광각에 대한 편광도 변화를 단일

표 1. Spun 광섬유의 특성
Table 1. Specification of spun fiber.

코어물질	GeO ₂ /SiO ₂
코어지름	3.5 μm
클래딩물질	B ₂ O ₃ /SiO ₂
클래딩지름	125 μm
감쇄도	12dB / km 이하
차단파장	600 nm 이하
개구수	1.13 ± 0.02
위상지연	1° 이하

모드 광섬유와 spun 광섬유 각각에 대한 실험 결과로서 나타낸 것이다. 그림 3의 (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. 그림 3을 고찰해 볼때 편광도의 크기는 광섬유의 길이에 관계없음을 알 수 있다. 즉 단일 모드 광섬유의 경우 beat length가 짧으므로 길이에 따라 위상 지연이 일정한 크기로 비례하지 않는다. 반면 식(18)에서 spun 광섬유의 위상 지연은 매우 작은 크기를 갖고 진동하는 것으로 분석되는데 실험 결과는 그러한 분석을 만족시킨다.

그림 4는 입출력 편광각의 변화를 단일 모드 광섬유와 spun 광섬유 각각에 대한 실험 결과로서 나타낸 것이다. 그림 3과 마찬가지로 그림 4의 (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 그림을 비교해 보면 그림 (a)에서는 최대 오차가 20° 이상을 보인 반면 그림 (b)에서는 9° 이내를 보이고 있어 spun 광섬유가 단일 모드 광섬유에 비해 원형 복굴절이 훨씬 작음을 알 수 있다. 식(19)에서 spun 광섬유의 편광 회전이 매우 작은 것으로 분석되는데 실험 결과는 그러한 분석을 만족시킨다.

따라서 두가지의 고유 복굴절 측정 실험 결과에 의해 spun 광섬유는 전류 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 파장 등도 고려되어야 할 것이다.

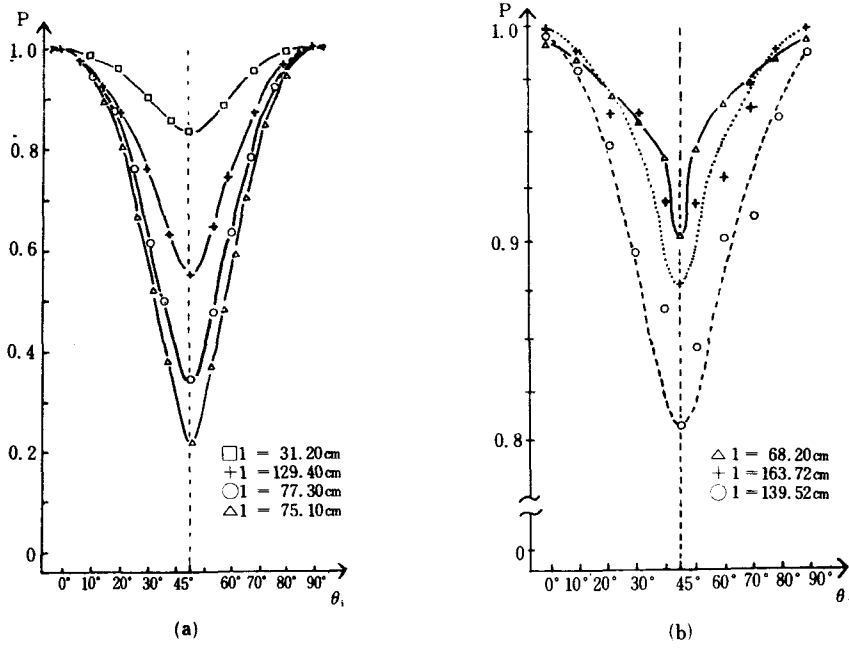


그림 3. 입력 편광각에 대한 편광도 변화
 (a) 단일모드 광섬유^[11] (b) spun 광섬유
 Fig. 3. Variation of polarization degree due to input polarization angle.
 (a) single mode fiber^[11]. (b) spun fiber.

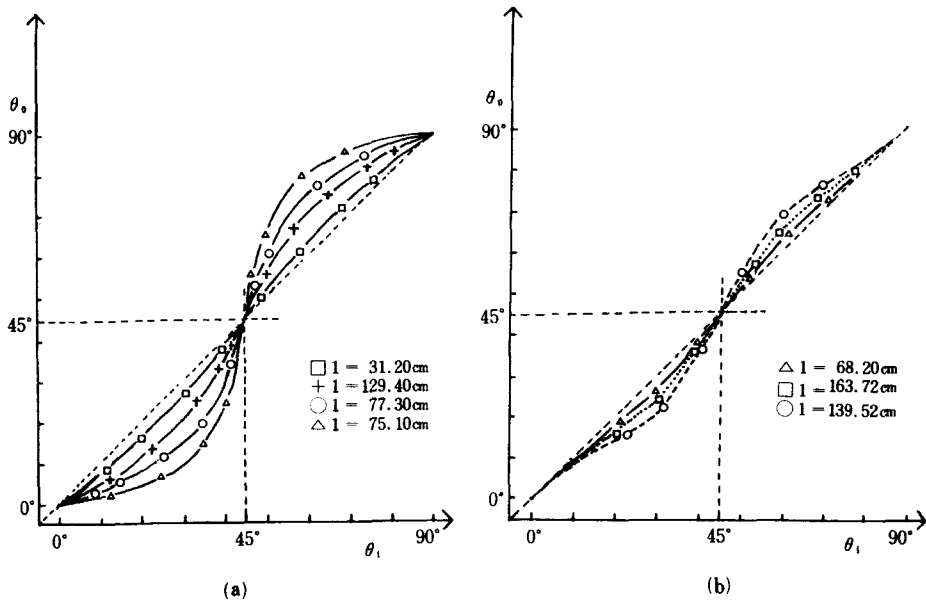


그림 4. 입출력 편광각의 변화
 (a) 단일모드 광섬유^[11] (b) spun 광섬유
 Fig 4 . Variation of input/output polarization angle.
 (a) single mode fiber^[11]. (b) spun fiber .

그림 5는 자계 세기에 따른 출력 Trms 값의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 실험 결과는 전류의 변화에 대한 출력의 변화가 선형적인 관계임을 보이고 있다. 여기서 x축은 인가된 전류 세기이고 y축은 그에 따른 Trms 값은 크기이다. 이때 실험치에서 계산된 결과와 실제 전류치 사이의 최대 오차는 2A 에서 0.039 A 이었다. $l=163.72\text{cm}$, $l'=500\text{mm}$ 인 광섬유를 이용하여 전류의 변화에 따른 광검출기 세기 Trms의 변화를 측정하였다. 실험 결과 두 함수 관계는 매우 높은 선형성을 유지하고 있었다. 이러한 실험 결과의 선형성이 어느 정도인가를 알기 위해, 식(32)와 앞 절에서 구한 파라데이 효과에 의한 회전 각 F를 이용하여 5A에서의 Verdet 상수를 계산하였다. 계산된 값은 $3.95 \times 10^{-6} \text{ rad/AT}$ 로 단일모드 광섬유의 $2.3 \times 10^{-6} \text{ rad/AT}$ 보다 우수함을 알 수 있었다. 이를 이용해 Trms에 따른 전류값을 측정할 결과 표 2와 같은 계산치를 얻었다.

2A에서 오차가 0.039A로 가장 컸는데 이와 같은 오차는 고유 불균질 및 자연광의 제거 등으로 더욱 감소 시킬 수 있을 것이다.

한편 본 논문에서는 측정된 자계가 20,000 A/m의 높은 자계임에도 불구하고 시스템과의 전자기 간섭을 무시할 수 있음을 확인하였다. 즉, 이것은 이 시스템이 고전류 측정에 있어서 기존 시스템의 가장 큰 문제점인 전자기 간섭을 배제할 수 있음을 보인다.

V. 결 론

본 논문에서는 spun 광섬유의 편광 특성과 자기 광학적 성질을 분석하고 실험하였다.

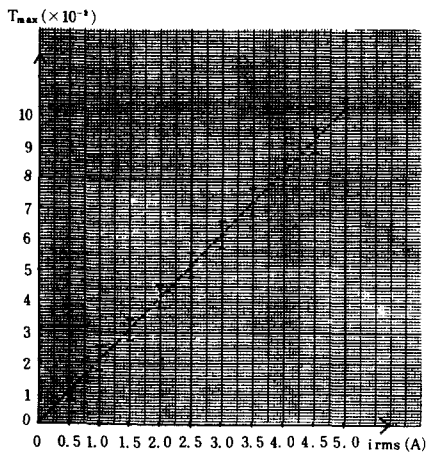


그림 5. 전류 변화에 따른 검출기 출력
Fig. 5. Detector output due to current variation.

표 2. Trms 값에 대한 전류 계산치
Table 2. Calculated value of applied current due to Trms value.

전류계의 rms 전류값(A)	Trms(0)	Trms 값에 따른 rms 전류값(A)
0.	0.	0.
0.5	1.08	0.524
1.0	2.24	1.087
1.5	3.12	1.515
2.0	4.20	2.030
2.5	5.20	2.524
3.0	6.20	3.010
3.5	7.24	3.515
4.0	8.21	3.985
4.5	9.20	4.466
5.0	10.30	5.

실험에 앞서 spun 광섬유의 고유 불균질 및 자기 광학적 효과에 의한 불균질 변화를 분석하였고 그 결과 기존의 단일 모드 광섬유에 비해 위상 지연 및 편광 회전각이 뛰어나게 감소될 수 있어 매우 우수한 편광 유지 특성을 갖음을 알 수 있었다.

Spun 광섬유로 구성된 전류 측정 시스템은 20,000 A/m까지의 자계 강도를 선형적으로 측정할 수 있어 고전류용 측정에 적합할 것으로 예상된다. 앞으로 구부림, 온도, 파장 등에 따른 spun 광섬유의 특성을 연구하여 최적의 파라미터를 얻는다면 더욱 민감도를 높일 수 있을 것으로 기대된다.

參 考 文 獻

- [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] Hocker, G.B., "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] 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, 1954

[9] H. Harms & A. Papp, "Magneto-optical current transformer 3: Measurement," *Applied Optics*, vol. 19, no. 22, p. 3741, 1980.

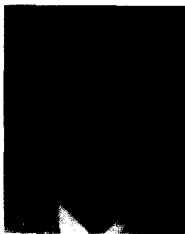
[10] A.J. Barlwo, et al., "Production of single mode fibers with negligible intrinsic birefringence and polarization mode dispersion," *Electronics Letters*, vol. 17, no. 20, p. 725, 1981.

[11] A.M. Smith, "Polarization and magneto-optical properties of single mode optical fiber," *Applied Optics*, vol. 17, no. 1, p. 52, 1978. *

著 者 紹 介

權元鉉 (正會員) 第25卷 第8號 參照

현재 연세대학교 전자공학과 박사과정



全石熙(正會員)

1960年 8月 16日生. 1981年 2月 연세대학교 전자공학과 공학사 학위 취득. 1983年 2月 연세대학교 대학원 전자공학과 공학석사 학위 취득. 1983年 3月~현재 연세대학교 대학원 전자공학과 박사과정. 1986年 3月~현재 동양공업전문대학 통신과 교수. 주관심분야는 광 신호처리 및 광섬유센서등임.



金堯喜(正會員)

1944年 10月 2日生. 1981年 연세대학교 산업대학원 석사학위 취득. 1964年~1981年 한전 계통운용부, 전자계산소, 기술연구원 근무(실장대리). 1981年~현재 한국전기 연구소 계통연구실장, 전력통신연구실장, 전력전자 연구위원(책임연구원). 주관심분야는 전력전자 및 광 응용센서 등임.

朴漢奎 (正會員) 第25卷 第8號 參照

현재 연세대학교 전자공학과 교수



金永洙(正會員)

1959年 1月 4日生. 1982年 2月 전북대학교 전자공학과 공학사 학위 취득. 1984年 2月 전북대학교 전자공학과 대학원 공학석사 학위 취득. 1984年 3月~현재 한국전기연구소 전력전자연구부 전력통신연구실 연구원. 주관심분야는 전력전자 및 광 응용센서등임.