

단일모드 光纖維를 利用한 電流測定에 關한 研究

(A Study on the Current Measurement Using Single Mode Optical Fiber)

* 朴 漢 奎(Hankyu PARK)

** 金 恩 洙(Eun Soo KIM)

*** 全 石 熙(Seok Hee JEON)

要 約

本 論文에서는 단일모드 광섬유의 intrinsic birefringence와 파라데이회전에 대한 理論的 解析을 하였다. 분석과정에서 단일모드 광섬유는 선형지연기로 모델링하였으며 측정결과 intrinsic birefringence는 약 1.4rad/m로 나타났다.

그리고 자계의 영향에 의한 빛의 편광상태 변화에 대한 理論的 解析을 하였다.

ABSTRACT

In this paper, the intrinsic birefringence & Faraday rotation of single mode optical fiber have been theoretically investigated.

On the analysis, the optical fiber has been modeled as a linear retarder and the intrinsic linear retardation of the single mode optical fiber is approximately found to be 1.4rad/m from the measurement.

Finally the theoretical analysis of influence of a longitudinal magnal magnetic field on the state of polarization of light that is guided in the single mode optical fiber has been performed.

1. 序 論

一般的으로 광섬유속을 進行하는 빛은 여러가지 원인에 의해 光學的으로 균일하지 않은 매질 속을 進行할 때와 같은 偏光特性 즉, birefring-

ence¹⁾가 나타나는데 最近에 이러한 광섬유의 偏光特性을 利用하여 광섬유를 計測用 sensor로서 應用하고자 이에 대한 많은 研究²⁾가 이루어지고 있다.

* 延世大學校 工科大學 電子工學科

** 光云大學 電子工學科

*** 延世大學校 大學院 電子工學科

理想的인 광섬유의 경우 그 구성이 균일하며 원대칭이 되므로 birefringence가 나타나지 않지만 광섬유의 제조과정에서 발생하는 결함들 즉, thermal stress, 광섬유 코어의 타원성(ellipticity) 등에 의하여 실제의 광섬유에서는 birefringence를 흔히 관찰할 수 있다.

근래에는 이러한 효과들을 거의 없앨 수 있는 제조방법¹⁾들이 개발되어 intrinsic birefringence가 상당히 작은 단일모드 광섬유가 開發되고 있지만 이러한 광섬유라도 外部에서 작용할 수 있는 여러가지 원인 즉, 비틀림²⁾, 구부림³⁾, 磁氣場⁴⁾ 등에 의해서 birefringence가 발생되므로 실제로 광섬유를 利用하는데 있어서 광섬유의 偏光特性이 重要な 요소가 되고 있다.

이중에서 磁氣場에 의한 광섬유의 偏光변화를 파라데이효과라 하며 이러한 특성을 이용하여 電流측정에 응용된다. 즉, 광섬유속을 進行하는 직선편광된 빛은 導傳電流로 유도된 磁氣場에 의해 偏光角이 회전하게 되므로 이를 측정하므로써 상대적인 전류측정이 가능하게 된다.⁵⁾ 그러나 실제의 광섬유에서는 여러가지 원인에 의한 편광현상이 파라데이효과에 가미된 형태로 나타나게 된다.

1954년 Jerrard는⁶⁾ Poincaré sphere를 利用하여 유전체의 birefringence를 解析한 이후 1969년에는 Tabor & Chen에⁷⁾ 의해 matrix equation을 이용하여 파라데이 회전과 birefringence 현상을 분석하였다. 그후 1976년 Harms는⁸⁾ 저손실 광섬유의 birefringence를 규명하고 단위 길이당 depolarization, ellipticity 등을 조사하였으며 1980년 Smith는⁹⁾ 단일모드 광섬유의 전류측정을 理想的으로 적용하기 위하여 birefringence가 극도로 낮아야 하는 조건을 고찰하고 광섬유를 포함한 전류측정시

스템의 최적 파라미터를 분석하였다. 그후 1982년에 Sakai는¹⁰⁾ 결합모드 이론에 기초를 둔 비등방성 단일모드 광섬유에 여러가지 외부섭동이 동시에 중첩될 때의 偏光特性을 分析하였다.

지금까지의 研究結果에 의하여 광섬유를 계측용 sensor로서¹¹⁾ 應用하는데 있어서 광섬유의 偏光特性이 중요시됨에 따라 本 論文에서는 광섬유를 전류측정용 sensor로 응용하는데 중요한 偏光特性인 intrinsic birefringence와 Faraday rotation에 대한 理論的 解析 및 實驗結果에 대해 논하고자 한다.

2. Intrinsic birefringence¹²⁾

일반적으로 단일모드 광섬유에서는 서로 수직 편광된 2개의 도파모드가 존재한다.

이상적인 광섬유에서는 이러한 2개의 모드는 광섬유의 길이에 따라 같은 위상속도로 전파된다. 그러나 실제 광섬유에서는 제조과정에서 나타나는 불균일한 thermal stress 및 코어의 타원성등에 의해 birefringence 혹은 위상지연(phase retardation)이 생기게 되고 결과적으로 선형편광된 빛은 광섬유를 통과하게 되면 그림 1과 같이 타원편광으로 나타나는데 이러한 광섬유의 특성은 광섬유를 선형지연기(linear retarder)¹³⁾로 모델링함으로써 分析할 수 있다.

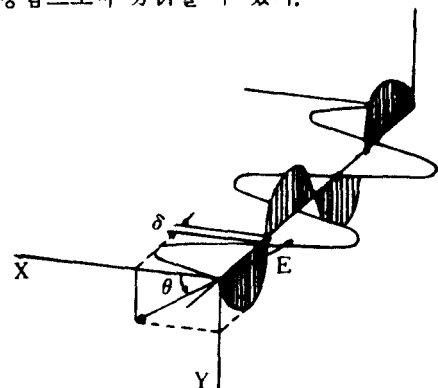


그림 1. 단일모드 광섬유의 linear birefringence
Fig 1. linear birefringence of single mode optical fiber.

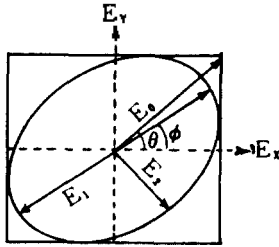


그림 2. 단일모드 광섬유의 入出力偏光圖
 Fig. 2. Graph of input & output polarization of single mode optical fiber.

즉, 선형지연 δ 를 갖는 광섬유의 slow 축과 fast 축이 각각 x, y 이고, 전파방향이 z 인 직각좌표 시스템을 고려하고 Jones matrix를 利用하여 intrinsic birefringence를 分析하기로 하자.

만일 slow 축과 θ 각을 이루는 직선편광된 빛을 단일모드 광섬유에 入射시키면 광섬유를 통과한 후 光出力은

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \exp(j\frac{\delta}{2}) & 0 \\ 0 & \exp(-j\frac{\delta}{2}) \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix} E_0 \exp(j\omega t) \dots\dots\dots$$

와 같이 주어진다.

일반적으로 光出力은 그림 2와 같이 타원편광되고 타원의 장축과 x 축은 ϕ 의 각을 이루게 된다.

이때 E_1, E_2 를 각각 타원의 장축, 단축의 전계성분이라 하면

$$\begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} \dots(2)$$

와 같이 주어진다.

따라서 (1) 식을 (2) 식에 대입하고 complex conjugate를 곱하여 정리하면 (3)식과 같이 된다.

$$\begin{pmatrix} |E_1|^2 \\ |E_2|^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos^2 \phi \cos^2 \theta + \sin^2 \phi \sin^2 \theta \\ \sin^2 \phi \cos^2 \theta + \cos^2 \phi \sin^2 \theta \\ + \frac{1}{2} \sin 2\phi \sin 2\theta \cos \delta \\ - \frac{1}{2} \sin 2\phi \sin 2\theta \cos \delta \end{pmatrix} E_0^2 \dots\dots\dots (3)$$

한편 편광 파라미터 P 는 出力光의 ellipticity를 나타내며 다음과 같이 定義된다.

$$P = \frac{|E_1|^2 - |E_2|^2}{|E_1|^2 + |E_2|^2} \dots\dots\dots (4)$$

따라서 (3)식을 (4)식에 代入하여 정리하면 타원의 찌그러짐과 방위는 각각

$$P = (\cos^2 \theta + \cos^2 \delta \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}} \dots\dots (5)$$

$$\tan 2\phi = \cos \delta \tan 2\theta \dots\dots\dots (6)$$

로 주어진다.

(5)식에서 P 값은 入射光과 x 축의 이루는 각도 θ 에 따라 다음과 같이 주어진다.

$$P = 1 \quad ; \quad \theta = m\left(\frac{\pi}{2}\right) \dots\dots\dots (7)$$

$$P = \cos \delta \quad ; \quad \theta = (2m+1)\frac{\pi}{4} \dots\dots (8)$$

(m 은 정수)

따라서 $P=1$ 일 때는 직선편광됨을 의미하며 $P=0$ 일 때는 원편광된 빛을 의미하고 $0 < P < 1$ 일 때는 타원편광을 의미한다.

그러므로 적당한 광검출 회로에 의해 P 값을 측정할 수 있으므로 광섬유의 intrinsic birefringence δ 값을 측정할 수 있다.

그림 3은 intrinsic birefringence를 測定하기 위한 실험장치로서 그림과 같이 $\lambda/4$ plate를 광섬유의 출력축에 놓고 회전시키면 타원광의 장축과 단축이 $\lambda/4$ plate의 fast slow 축과 일치할 때 직선편광된 빛이 나오게 되며 이것은 出力偏의 선형편광기에 의해 分析된다.

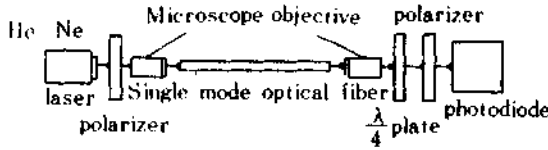


그림 3. intrinsic birefringence 실험 장치
Fig.3. Intrinsic birefringence measurement apparatus.

광검출기에 의하여 편광파라미터는 P와 같으며 그때 $\lambda/4$ plate의 fast 축과 出力側의 선형편광기축과 이루는 각 ζ 는 다음과 같이 주어진다.¹⁶⁾

$$P = \cos 2 \zeta \dots\dots\dots (9)$$

그러므로 ζ 를 측정함으로써 P를 알 수 있다. 따라서 적당한 초기상태를 조절함으로써 입력편광기와 $\lambda/4$ plate의 방위 ζ 를 측정함으로써 절대크기 θ 와 ϕ 가 유도되고 (5), (6) 식에 의해 $|\cos \delta|$ 가 결정된다.

따라서 입력직선편광기, $\lambda/4$ plate와 出力직선편광기의 회전각을 조절함으로써 광검출기에 의해 intrinsic birefringence를 측정할 수 있다.

본 실험에 사용된 광섬유의 특성은 표 1과 같으며 실험결과 intrinsic birefringence는 1.4 rad/m로 나타났다.

그리고 그림 4는 입력편광각에 따른 P값의 변화를 서로 다른 길이의 광섬유에 대해 실험한 결과이다.

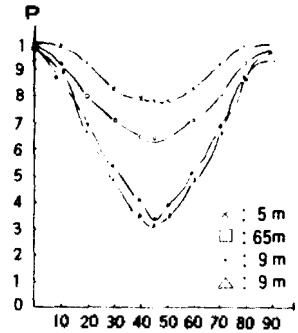
표 1. 광섬유의 특징

Table 1. Properties of the fiber

core composition	GeO ₂ /SiO ₂
cladding composition	B ₂ O ₃ /SiO ₂
core diameter	4 μ m
overall fiber diameter	130 μ m
relative index difference	1×10^{-3}

그림 4. 입력편광각에 따른 P의 변화.

Fig.4. Variation of intensity ratio P with input polarization angle θ



3. 파라데이 효과 및 광섬유의 magneto-optic 특성

동방성 유전체에 빛의 진행방향과 평행하게 자장이 인가되면 입력선형편광빛이 출력측에 회전되어 나타나게 된다. 즉, 자장의 영향에 의해 유전체가 optical activity 현상을 일으키게 되는데 이를 Faraday 효과라 한다.

이때 직선편광된 빛의 회전량 F는 인가된 자장의 세기 H와 자계의 영향을 받은 광섬유의 길이 l 에 선형적으로 비례하게 된다.¹⁸⁾

$$F = V \cdot H \cdot l \dots\dots\dots (10)$$

윗식에서 V는 verdet 상수로서 일정한 파장에서 정해지는 물질의 고유상수이며 단위는 degree/Ampere이다.

광섬유를 이용한 전류측정시스템인 그림 5에서 광섬유 solenoid에 의해 유도된 축방향 磁氣場의 영향을 받으면 入力 직선편광된 빛은 intrinsic birefringence에 의한 위상지연과 파라데이효과에 의한 편광회전이 복합된 형태로 出力에 나타나게 된다.

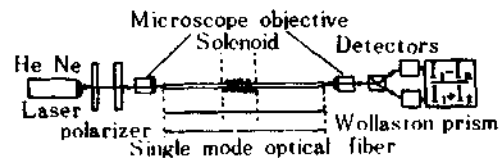


그림 5. 전류측정 시스템
Fig.5. system of current measurement.

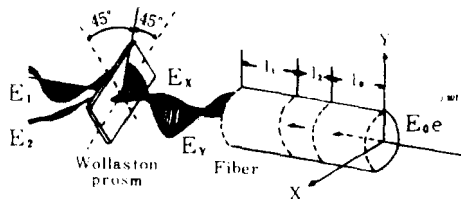


그림 6. intrinsic birefringence와 Faraday 회전의 상호관계 모델

Fig. 6. Model used for calculating the interaction of birefringence and Faraday rotation

그림 6은 intrinsic birefringence와 파라데이효과와 상호관계를 해석하기 위한 모델로서 길이가 l 인 광섬유의 중간부분 l_1 에 축방향 磁氣場이 인가되면 l_0 부분에서는 δ_0 만큼의 위상지연이 생기고 l_1 에서는 磁氣場에 의한 파라데이 회전과 δ_1 의 위상지연이 동시에 나타나며 l_2 에서는 δ_2 만큼의 위상지연이 발생하게 된다.

이것을 Jones matrix로 나타내면 출력의 전계성분 E_x, E_y 는¹⁾

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}_l = \begin{bmatrix} \exp(j\delta_2/2) & 0 \\ 0 & \exp(-j\delta_2/2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & -B \\ B & A^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(j\delta_0/2) & 0 \\ 0 & \exp(-j\delta_0/2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}_0 \quad (1)$$

$$A = \cos[F^2 + (\delta_1/2)^2]^{1/2} + j \frac{\delta_1/2}{[F^2 + (\delta_1/2)^2]^{1/2}} \sin[F^2 + (\delta_1/2)^2]^{1/2}$$

$$B = \frac{F}{[F^2 + (\delta_1/2)^2]^{1/2}} \sin[F^2 + (\delta_1/2)^2]^{1/2}$$

이 된다.

入力偏光상태를

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ E_0 \exp(j\omega t) \end{pmatrix} \quad (2)$$

와 같이 가정하고 행렬식제산법과 삼각함수식을 이용하여 식을 정리하면

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -E_0 B \exp[j(\omega t + \delta_1/2)] \\ E_0 A \exp[j(\omega t - \delta_1/2 - x)] \end{pmatrix} \quad (3)$$

와 같이 된다.

윗식에서

$$x = \tan^{-1} \frac{\delta_1/2}{[F^2 + (\delta_1/2)^2]^{1/2}} \cdot \tan[F^2 + (\delta_1/2)^2]^{1/2} \quad (4)$$

이 된다.

이 出力빛은 광학축 1, 2가 y축과 45° 각도로 놓은 wollaston 프리즘을 통과하여 실험적으로 파라데이회전과 intrinsic birefringence를 分析할 수 있다.

그림 6과 같이 공간적으로 분리되고 직선편광된 두빛 E_1, E_2 가 프리즘을 통과하여 광검출기로 검출되며 그 편광방향은 1, 2축과 각각 일치한다.

두빛의 크기는

$$E_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} (E_x + E_y) \quad (5)$$

$$E_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} (E_x - E_y) \quad (6)$$

으로 나타낸다.

아나로그회로에 의해 신호 S는

$$S = \frac{|E_1|^2 - |E_2|^2}{|E_1|^2 + |E_2|^2} \quad (7)$$

으로 되고 (3)식과 (5)식을 (6)식에 대입하여 정리하면

$$S = 2|A|B \cos(x + \delta_1) \quad (8)$$

와 같은 식을 얻을 수 있다.

파라데이회전에 대한 intrinsic birefringence의 영향을 보면 $\delta_1 = \delta_2 = 0$ 인 경우 즉, intrinsic birefringence 현상이 전혀 없는 상태에서는 파라데이효과만 존재하게 된다.

이 경우

$$S = \sin 2F \quad (9)$$

로 주어진다.

그러나 일반적인 경우 $\delta_1, \delta_2 \neq 0$ 이면 이때 E_x 와 E_y 사이에는 intrinsic birefringence 와 파라데이회전에 의한 위상차 $x + \delta_2$ 가 존재하게 된다. (그림 7)

여기서 장축과 단축의 길이를 a, b 라 하면 그때의 편광정도 P 는

$$P = \frac{a^2 - b^2}{a^2 + b^2}$$

$$= (|A|^2 - |B|^2) \cos 2\phi + 2|A||B| \cos(x + \delta_2) \sin 2\phi \dots\dots\dots (19)$$

여기에서 ϕ 는 E_y 축과 타원의 장축이 이루는 각이다.

따라서 회전각 ϕ 와 편광정도 P 그리고 측정된 S 사이에는 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$S \approx P \sin 2\phi \dots\dots\dots (20)$$

(19)식과 비교하면 파라데이 회전 F 는 각 ϕ 로 대체되었고 편광정도 P 는 감쇄 요소로서 첨가된 것을 알 수 있다.

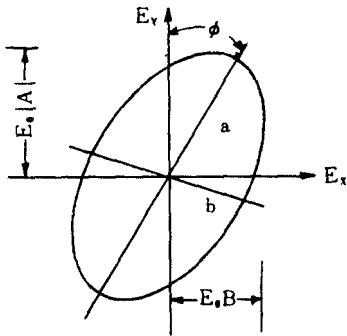


그림 7. 타원편광도
Fig. 7. Graph of elliptical polarization of light.

따라서 S 를 측정하므로써 회전각 F 를 측정하면 (19)식으로 부터 자기장의 세기와 이에 해당하는 상대적인 전류의 측정이 가능하다.

4. 結 論

本 論文에서는 단일모드 광섬유에 대한 in-

trinsic birefringence 와 파라데이회전에 대한 理論的 해석과 實驗을 하였다.

분석과정에서 광섬유는 선형지연기로써 모델링하였으며 Jones 행렬에 의해 intrinsic birefringence 를 측정된 결과 약 1.4 rad /m의 낮은 값을 가짐을 알았다. 또한 입력 편광각에 따른 전광파라미터의 변화에 대한 실험결과는 이론적과 거의 일치함이 분석되었다.

그리고 광섬유를 전류측정용 sensor로 사용하기 위한 理論인 단일모드 광섬유와 파라데이효과를 Jones matrix 를 사용하여 해석하였다. 분석결과 전광파라미터값이 출력값의 감쇄계수로 작용함으로 전류측정을 위한 광섬유는 intrinsic birefringence 가 극도로 낮을수록 출력감도가 좋아짐이 이론적으로 分析되었다.

본 연구는 한국 과학 재단의 학술연구비 지원으로 이루어졌으며, 한국과학재단에 깊은 감사를 드립니다.

5. 參 考 文 獻

1. V. Ramaswany et al, "Polarization effects in short length single mode fibers" B.S.T.J. Vol. 57, . 3, pp. 635, 1978.
2. T.G. Giallorenzi et al, "Optical fiber sensor technology" IEEE. J. Quantum Electronics, Vol. QE-18, . 4, pp. 626, 1982.
3. H. Schneider, et al, "Low birefringence single mode optical fibers; preparation and polarization characteristics" Appl. opt. Vol. 17, pp. 3035, 1978.
4. R. Ulrich & A. Smon, "Polarization optics of twisted single mode

- fibers" *Appl. opt.* Vol. 18, No. 3, pp. 2241, 1979.
5. R. Ulrich et al, "Bending-- induced birefringence in single mode fibers" *Opt. Lett.*, Vol. 5, No. 6, pp. 273, 1980.
 6. S. C. Rashleigh, "Magnetic field sensing with a single mode fiber" *Opt. Lett.* Vol. 6, pp. 19, 1981.
 7. S. C. Rashleigh et al, "Magneto-optic current sensing with birefringent fibers" *Appl. Phys. Lett.* Vol. 34, No. 11, pp. 768, 1978.
 8. H. G. Jerrard, "Transmission of light through birefringent and optically active media, the poincare sphere" *J. Opt. Soc. Am*, Vol. 44, No. 8, pp. 633, 1954.
 9. W. J. Tabor & F. S. Chen, "Electromagnetic propagation through materials possessing both Faraday rotation and birefringence" *J. Appl. phys.* Vol. 40, No. 7, pp. 2760, 1969.
 10. H. Harms, et al. "Magneto-optical properties of index gradient optical fibers" *Appl. opt.* Vol. 15, No. 3, pp. 709, 1976.
 11. A. M. Smith, "Optical fiber for current measurement application" *opt. and Laser Tech.*, pp. 25, 1980.
 12. J. I. Sakei & T. Kimura, "Polarization behavior multiply perturbed single mode fibers" *IEEE. J. Quantum Electronics*, Vol. QE-18, No. 1, pp. 59, 1982.
 13. A. M. Smith, "Polarization and magneto-optic properties of single mode optical fiber" *Appl. opt.* Vol. 17, No. 1, pp. 52, 1978.
 14. 金恩洙, 朴漢奎, "單一모우드 光纖維의 Birefringence 特性에 관한 연구" *韓國通信學會誌*, Vol. 7, No. 4, pp. 161, 1982.
 15. 金恩洙, 朴漢奎, 全石熙 Single mode optical fiber의 polarization과 magneto-optic 특성에 관한 연구" 대한전자공학회, 하계종합학술발표집, Vol. 5, No. 1, pp. 116, 1982.
 16. A. M. Smith, "Automated birefringence measurement system" *J. phys. E*, No. 12, 1979.
 17. A. Papp & H. Harms, "Magneto-optical Current transformer" *Appl. opt.* vol. 19, No. 22, pp. 3729, 1980.
 18. J. F. Nye, "Physical properties of crystal" Oxford. press, 1957.