

論 文

單一모우드 光纖維의 Birefringence 특성에 관한 研究

正會員 金 恩 洙* 正會員 朴 漢 奎**

A Study on the Birefringence Properties of
Single Mode Optical Fiber

Eun Soo KIM* and Han Kyu PARK**, Regular Members

要 約 本論文에서는 단일 모우드 광섬유의 고유 birefringence 및 twisting에 의한 birefringence 특성에 대해 理論的 分析과 實驗을 하였다. 分析過程에서 단일 모우드 광섬유는 선형 지연기로 모델링하였으며 측정결과 순수 birefringence는 약 2.57°/m로 나타났다. 그리고 twisting에 의한 회전율 섭동이론에 의해 理論적으로 分析한 結果 회전각을 광섬유의 비틀림각에 선형적으로 변화되었으며 이러한 理論的 結果는 實驗的 結果와 거의 일치함이 分析되었다.

ABSTRACT In this paper, the intrinsic birefringence and twist-induced rotation of the single mode optical fiber have been 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 2.57°/m from the measurement. Theoretically analyzing the twist-induced rotation by the perturbation theory, it is found that the magnitude of the twist-induced rotation varies linearly with the twisted angle. And this theoretical result has been in good accord with the experimental result.

1. 序 論

一般的으로 광섬유 속을 進行하는 빛은 여러 가지 원인에 의해 마치 光學的으로 不均일하지 않은 매질 속을 進行할 때와 같은 偏光特性 즉 birefringence^{(1),(2)}가 나타나는데 최근에 이러한 광섬유의 편광특성을 이용하여 광섬유를 計測用 sensor로서 應用하고자 이에 대한 많은 研究⁽³⁾가 進行되고 있다.

理想적인 단일 모우드 광섬유의 경우 그 구성

이 不均일하며 원대칭이 되므로 birefringence가 나타나지 않지만 광섬유의 제조과정에서 생기는 결함들 즉 不均일한 stress, 광섬유 core의 ellipticity등에 의하여 실제의 단일 모우드 광섬유에서는 birefringence를 흔히 관찰할 수 있다.

근래에는 이러한 효과들을 거의 없앨 수 있는 방법⁽⁴⁾들이 개발되어 intrinsic birefringence가 상당히 작은 단일 모우드 광섬유가 開發되고 있지만 이러한 광섬유라도 외부에서 작용할 수 있는 여러 가지 원인 즉 비틀림(twisting)⁽⁵⁾, 구부러짐(bending)⁽⁶⁾, 온도, 압력⁽⁷⁾, 磁氣場^{(8),(9)}등에 의해서 birefringence가 유도되므로 실제로 단일 모우드 광섬유를 이용하는데 있어서 광섬유의 偏光特性이 重要한 요소가 되고 있다.

1954년 Jerrard⁽¹⁰⁾는 Poincaré sphere를 利用하여 유전체의 birefringence를 解析한 이후 1969년에는 Tabor & Chen⁽¹¹⁾에 의해 matrix equation을 이용하여 Faraday rotation과 birefringence현상을 분

* 光云大學電子工學科
Dept. of Electronic Engineering, Kwangwoon University,
Seoul, 132 Korea

** 延世大學校工科大學電子工學科
Dept. of Electronic Engineering, Yonsei University,
Seoul, 120 Korea

論文番號 82-20 (接受 1982. 11. 8)

析하였다.

그 후 1975년에 Papp & Harms¹²⁾는 index gradient glass fiber의 polarization의 光學的 性質을 조사하고 광섬유를 linear birefringence model에 응용할 수 있음을 밝히고 magneto-optical Faraday rotation을 測定하였다.

또한 1976년 Harms¹³⁾는 저손실 광섬유의 birefringence를 규명하고 단위 길이당 depolarization, stress分布, ellipticity등을 조사하였으며 1980년 Smith¹⁴⁾는 단일 모우드 광섬유의 전류추정용 이상적으로 적용하기 위하여 birefringence가 작도록 낮아야 하는 조건을 고찰하고 광섬유를 포함한 전류추정 시스템의 최적 파라미터를 分析하였다. 지금까지의 研究結果에 의하여 광섬유를 計測用 sensor로서 응용하는데 있어서 광섬유의 편광 특성이 중요시됨에 따라 本論에서는 광섬유를 전류 추정용 sensor로¹⁵⁾ 응용하는데 중요한 偏光特性인 intrinsic birefringence와 twist-induced birefringence에 대한 理論的解析과 實驗結果에 대해 論하고자 한다.

2. Intrinsic birefringence¹⁶⁾

일반적으로 단일 모우드 광섬유에서는 서로 수직편광된 2개의 도파 모우드가 존재한다. 이상적인 광섬유에서는 이러한 2개의 모우드는 degenerate하게 되어 서로 같은 위상속도로 전파된다. 그러나 실제 광섬유에서는 제조과정에서 나타나는 thermal stress 및 core의 타원성 등에 의해 birefringence 혹은 retardation이 생기게 되고 결과적으로 2개의 모우드로 수직선형 편광되게 된다. 이러한 linear birefringence의 결과에 의해 선형편광된 빛은 광섬유를 통과하게 되면 elliptical하게 편광되는데 이러한 광섬유의 특성은 광섬유를 선형 지연기(linear retarder)^{16),17)}로 모델링함으로써 분석할 수 있다.

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 각도 θ 를 이루는 직선편광된 빛을 단일 모우드 광섬유에 입사시키면 광섬유를 통과한 후 光出力은

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \exp(j\frac{\delta}{2}) & 0 \\ 0 & \exp(-j\frac{\delta}{2}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix} \times E_0 \exp(j\omega t) \quad (1)$$

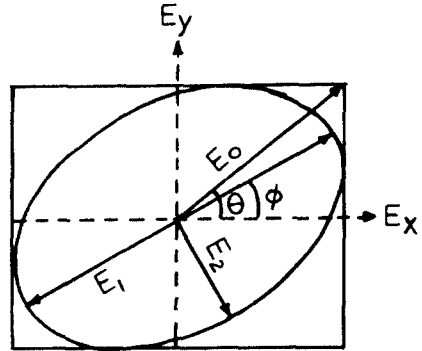


그림 1 단일 모우드 광섬유의 入出力偏光圖
Graph of input & output polarization of single mode optical fiber.

와 같이 주어진다.

일반적으로 光出力은 그림 1과 같이 타원편광되어 있고 타원의 장축과 x 축은 ϕ 의 각을 이루게 된다.

이 때 E_1, E_2 를 각각 타원의 장축, 단축의 전계성분이라 하면

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

와 같이 주어진다.

따라서 (1)식을 (2)식에 대입하여 정리하면 (3)식과 같다.

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

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

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

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

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

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

로 주어진다.

(5)식에서 P 값은 入射光과 x 축이 이루는 각도 θ 에 따라

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

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

(m : 정수)

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

따라서 적당한 광검출 회로에 의해 P 값을 측정할 수 있으므로 광섬유의 intrinsic birefringence δ 값을 측정할 수 있다.⁴⁵⁾ 일반적으로 광섬유를 전류 측정용 sensor로 응용할 때 intrinsic birefringence는 검출기 出力의 sensitivity⁴⁶⁾를 결정하므로 낮을수록 좋다.

3. twist-induced birefringence⁴⁸⁾

일반적으로 광섬유가 비틀림(twisting)을 받을 때는 optical activity 즉 circular birefringence가 나타나는데 이러한 광섬유의 편광상태 변화는 擾動理論(perturbation theory)^{45), 48)}에 의해 分析될 수 있다.

실제의 광섬유에서 유전율의 공간적 분포는

$$\epsilon = \epsilon_0 + \bar{\epsilon} \quad (9)$$

로 표시할 수 있는데 위 식에서 ϵ_0 는 이상적인 광섬유를 의미하며 $\bar{\epsilon}$ 는 비틀림에 의한 외부섭동을 나타내게 된다.

일반적으로 광섬유 내에서 전파되는 전계의 횡방향 성분은

$$E_m^i(x, y, z) = \sum_n a_n \exp(i k_m z) E_m^i(x, y) \quad (10)$$

와 같이 주어지는데 위 식에서 $E_m^i(x, y)$ 는 전파상수 k_m 을 갖는 이상적인 광섬유의 횡전계 모우드를 표시하며 a_m 은 모우드의 크기를 나타낸다.

이상적인 광섬유에서는 a_m 이 축방향 z 에 무관하나 비틀림과 같은 외부섭동을 받게 되면 a_m 은 z 의 함수가 되어 파동 방정식은 다음과 같은 coupled mode equation⁴⁵⁾으로 주어지게 된다.

$$\frac{d[a_m(z)]}{dz} = i \sum_n k_{mn} a_n(z) \exp[i(k_n - k_m)z] \quad (11)$$

위 식에서 K_{mn} 은 결합계수(coupling coefficient)로서 섭동량 $\bar{\epsilon}$ 에 의존하게 된다.

따라서 coupled mode equation을 해석하기 위해 단일 모우드 광섬유에서 전파되는 모우드에 대해 설명하면 다음과 같다. 즉 단일 모우드 광섬유에서는 2개의 수직편광 모우드가 전파되는데 이상적인 광섬유의 경우는 전파상수가 degenerate ($K_1 = K_2$) 하지만 외부섭동이 가해진 광섬유에서

의 도파전계는 섭동이론에⁴⁵⁾ 의해 다음과 같이 2개의 도파 모우드 중점으로 나타나게 된다.

$$E(x, y, z) = [a_1(z) E_1(x, y) + a_2(z) E_2(x, y)] \exp(ik_1 z) \quad (12)$$

위 식에서 2개의 전계 모우드에 대한 cartesian 성분은

$$E_1 = [J(r), 0, (i/k_1)J'(r) \cos \phi] \quad (13)$$

$$E_2 = [0, J(r), (i/k_1)J'(r) \sin \phi] \quad (14)$$

와 같이 주어지며 $J(r)$ 은 반지름에 따른 전계분포함수를 나타낸다.⁴⁵⁾

이 경우 섭동이론에 의해 결합계수는

$$K_{mn} = [I_{mn}^{(1)} + I_{mn}^{(2)}] / Q \quad (15)$$

와 같으며 위 식에서 $I_{mn}^{(1)}, I_{mn}^{(2)}, Q$ 는

$$I_{mn}^{(1)} = k k_1 \iint E_m^* (\bar{\epsilon} E_n) dx dy \quad (16)$$

$$I_{mn}^{(2)} = -i k \iint E_m^* \nabla \cdot (\bar{\epsilon} E_n) dx dy \quad (17)$$

$$Q = 4\pi n_0 k_1 \int J^2 r dr \quad (18)$$

와 같이 주어진다.⁴⁷⁾

위 식에서 n_0 는 광섬유 재료의 굴절률이며 $\bar{\epsilon}$ 는 모우드 결합을 나타내는 유전체의 유전율 섭동을 나타내며 일반적으로 second rank tensor로 표시된다.

단일 모우드 광섬유가 각도 τ 만큼 비틀림을 받았을 때 섭동된 유전율 $\bar{\epsilon}$ 는

$$\bar{\epsilon}_4 = -P_{44} n_0^4 \tau x \quad (19)$$

$$\bar{\epsilon}_5 = P_{44} n_0^4 \tau y \quad (20)$$

로 주어지며 위 식에서 P_{ij} 는 elasto-optic tensor를 의미한다.⁴⁹⁾

이 때의 결합계수는

$$k_{11} = k_{22} = 0 \quad (21)$$

$$k_{12} = k_{21} = -i n_0^2 P_{44} \tau / 2 \quad (22)$$

과 같다.

따라서 optical activity는 결합계수와 다음과 같은 관계가 있으므로⁴⁵⁾

$$\begin{aligned} \Psi &= -i(k_{12} + k_{21}) \\ &= -n_0^2 P_{44} \tau \\ &= (n_0^2 / 2)(P_{12} - P_{11}) \end{aligned} \quad (23)$$

와 같이 주어진다.

실리카의 경우 $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ 에서 굴절률이 $n_0 = 1.46$ 이고 $P_{12} - P_{11} = 0.15$ 이므로 이 값을 (23)식에 代入하여 정리하면 $\Psi = 0.16 \tau$ 가 된다.

따라서 광섬유로부터 나오는 빛의 편각 회전각(ϕ)은 optical activity(Ψ)와 $\phi = \Psi/2$ 의 관계가 있으므로 비틀림을 받은 광섬유로부터 나오는 光出力은 회전편광되고 理論的結果에 의하여 편광회전각과 비틀림각의 비는 $\phi/\tau = 0.08$ 과 같이 주어지게 된다.

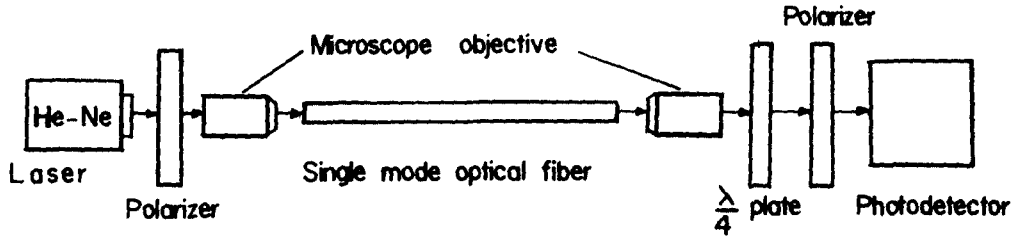


그림 2 intrinsic birefringence 측정장치
Intrinsic birefringence measurement apparatus.

4. 實驗 및 結果

그림 2는 intrinsic birefringence를 測定하기 위한 실험장치로서 그림과 같이 $\lambda/4$ plate를 광섬유의 출력수에 놓고 회전시키면 타원광의 장축과 단축이 $\lambda/4$ plate의 fast, slow 축과 일치할 때 직선편광된 빛이 나오게 되며 이것은 出力側の linear polarizer에 의해 分析된다.

광검출기에 의하여 편광 파라미터가 P 와 같으며 그 때 $\lambda/4$ plate의 fast 축과 出力側の linear polarizer 축과 이루는 각도는 다음과 같이 주어진다.

$$P = \cos 2\xi \tag{24}$$

그러므로 ξ 를 측정함으로써 P 를 알 수 있다. 따라서 적당한 초기상태를 조절함으로써 입력편광기와 $\lambda/4$ plate의 상대적인 방향을 측정할 수 있으며 입력 편광기의 변화에 대해 $\lambda/4$ plate의 방향 ξ 를 측정함으로써 절대 크기 θ 와 ϕ 가 유도되고 (5), (6)식에 의해 $|\cos \delta|$ 가 결정된다.

따라서 입력직선 편광기, $\lambda/4$ plate와 출력직선 편광기의 회전각을 조절함으로써 광검출기에 의해 intrinsic birefringence를 측정할 수 있다.

본 실험에 사용된 단일 모우드 광섬유의 특성은 표 1과 같으며 실험결과 intrinsic birefringence는 2.57deg/m의 값을 갖는 것으로 나타났다.

표 1 광섬유의 특성
Properties of the fiber

core composition	GeO_2/SiO_2
cladding composition	B_2O_3/SiO_2
core diameter	$4\mu m$
overall fiber diameter	$130\mu m$
relative index difference	1×10^{-3}

그림 3은 비틀림에 의한 birefringence를 측정하기 위한 실험장치를 나타낸 것이다.

실험에 사용된 단일 모우드 광섬유는 2m 정도로서 intrinsic birefringence는 $\leq 5^\circ$ 이하가 되고 지연효과를 더욱 줄이기 위해 입력 편광각은 비틀림이 없을 때 출력 편광각과 평행하도록 선택하였다.

광섬유가 비틀림을 받았을 때 나오는 빛은 직선편광을 유지하며 편광방향은 회전하게 된다.

따라서 비틀림각에 따른 출력 편광각 변화를 나타내면 그림 4와 같다.

그림에서 보면 편광각 (ϕ)는 광섬유의 비틀림각 (τ)에 대해 선형적으로 변화하고 광섬유 길이에는 무관함을 알 수 있다.

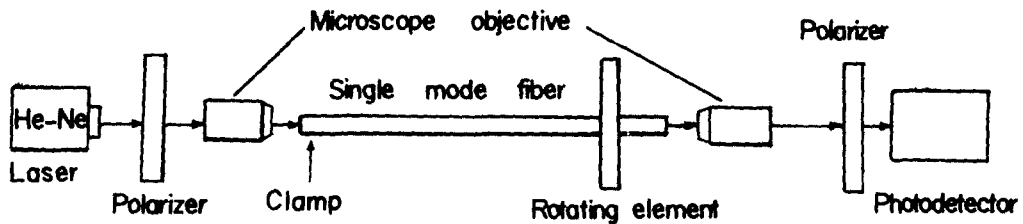


그림 3 비틀림에 의한 birefringence 측정장치
Twist-induced birefringence measurement apparatus.

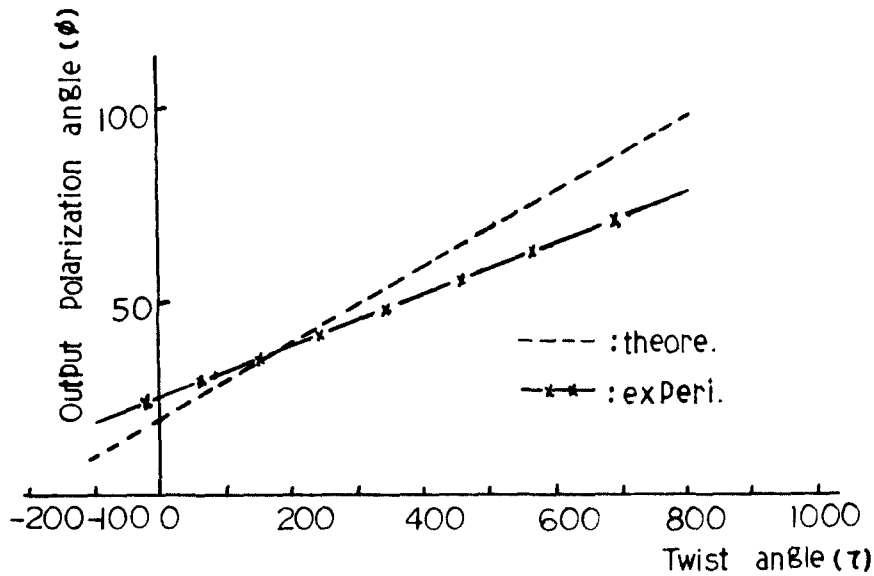


그림 4 비틀림각에 따른 출력편광각의 도표
Graph of polarization angle against twist angle.

또한 광섬유의 비틀림각(τ)에 대한 출력 편광각(ϕ)의 실험결과는 $\phi/\tau=0.069$ 로 나타나 Ulrich & Simon⁽⁵⁾의 실험결과 ($\phi/\tau=0.065$)와 거의 비슷한 결과를 얻었으며 이론치와 약간의 차이는 이론식을 계산하는데 도핑 실리카 코어의 elastooptic 계수가 순수 실리카와 약간 다르기 때문에 나타난 것으로 분석되었다.

5. 結 論

本 論文에서는 단일 모우드 광섬유에 대한 intrinsic birefringence 특성과 비틀림에 의한 birefringence에 대해 理論的 分析과 實驗을 하였다.

분석과정에서 광섬유는 선형 지연기로서 모델링하였으며 Jones 행렬에 의해 intrinsic birefringence를 측정할 결과 약 $2.57^\circ/\text{m}$ 의 낮은 값은 가짐을 알았다. 이러한 값은 최근 Smith⁽¹⁴⁾에 의해 보고된 $2.6^\circ/\text{m}$ 보다도 더 작은 값으로 본 실험에 사용된 광섬유가 전류측정용 sensor로서 더 적당한 함을 알 수 있다.

비틀림에 의한 편광상태 변화는 섭동이론에 의하여 전개하였으며 분석결과 광섬유가 비틀림을 받았을 때 optical activity를 일으키며 회전각은 비틀림각에 선형적으로 변화함을 분석하였다.

参 考 文 献

- (1) V. Ramaswamy et al., "Polarization effects in short length single mode fibers," B. S. T. J., vol. 57, no. 3, pp. 635, 1978.
- (2) P. Kaminov, "Polarization in Optical fibers," IEEE J. Quantum Electronics, vol. QE-17, no. 1, pp. 15, 1981.
- (3) T. G. Giallorenzi et al., "Optical fiber sensor technology," IEEE J. Quantum Electronics, vol. QE-18, no. 4, pp. 626, 1982.
- (4) H. Schneider, et al., "Low birefringence single mode optical fibers; Preparation and Polarization characteristics," Appl. Opt. vol. 17, pp. 3035, 1978.
- (5) R. Ulrich & A. Simon, "Polarization Optics of twisted single mode fibers," Appl. Opt. vol. 18, no. 3, pp. 2241, 1979.
- (6) R. Ulrich et al., "Bending-induced birefringence in single mode fibers," Opt. Lett., vol. 5, no. 6, pp. 273, 1980.
- (7) G. B. Hocker, "Fiber-Optic sensing of pressure and temperature," Appl. Opt. vol. 18, no. 9, pp. 1445, 1979.
- (8) S. C. Rashleigh, "Magnetic field sensing with a single mode fiber," Opt. Lett., vol. 6, pp. 19, 1981.
- (9) 金恩洙, 朴漢李外, "single mode optical fiber의 polarization과 magneto-optic 특성에 관한 연구," 대한전자공학회 1982년도 하계종합학술발표대회 vol. 5, no. 1, pp. 116.
- (10) 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.
- (11) 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.

(12) A Papp and H. Harms, "Polarization Optics of index-gradient optical waveguide fibers," Appl. Opt., vol. 14, no. 10, pp. 2406, 1975.

(13) H. Harms, et al., "Magneto-optical properties of index gradient optical fibers," Appl. Opt. vol. 15, no. 3, pp. 709, 1976.

(14) A.M Smith, "Optical fiber for current measurement applications," Opt. and Laser Tech., pp. 25, 1980.

(15) 金恩洙, 金基榮外, "단일 모드 광섬유에서의 Faraday rotation 해석에 관한 연구," 한국통신학회, 정공지동, pp. 67,

1982, 10.

(16) 金恩洙, 金基榮外, "single mode optical fiber의 birefringence"에 관한 연구," 대한전자공학회 정공지동 vol. 6, no 1., pp. 57, 1982, 9.

(17) A. M. Smith, "Automated birefringence measurement system," J. phys. E: sci Instrum., vol. 12, 1979.

(18) A. M. Smith, "Birefringence induced by bends and twists in single mode optical fiber," Appl. Opt. vol. 17 no. 5, pp. 2606, 1980.

(19) D. Grag, "American Institute of physics Handbook," New York: McGraw Hill, 1960, pp. 6-230.



金恩洙 (Eun Soo KIM) 正會員
 1955年 8月 1日生
 1978年 2月: 延世大學校電子工學科卒業
 1980年 2月: 延世大學校大學院電子工學科卒業(工學碩士)
 1980年 3月~現在: 延世大學校大學院電子工學科博士課程
 1981年 3月~現在: 光云工科學電子工學科專任講師



朴漢奎 (Han Kyu PARK) 正會員
 1941年 6月 21日生
 1964年 2月: 延世大學校電氣工學科卒業
 1968年 2月: 延世大學校大學院電氣工學科卒業(工學碩士)
 1973年: 佛蘭西 파리대학교(프랑스대학교)博士課程修了(DEA)
 1975年: 佛蘭西 파리6대학(ph. D)
 1976年~現在: 延世大學校工科學電子工學科教授