

論文2003-40SD-10-6

Fresnel 방정식에 근거한 광섬유 편광자의 해석 및 특성분석 (Analysis of the Optical Fiber Polarizer Based on the Fresnel Equations)

金 佶 煥 * , 趙 峻 庸 * , 李 景 植 *

(Gil Hwan Kim, Joon Yong Cho, and Kyung Shik Lee)

요 약

본 논문에서는 광섬유 내에 브루스터 각(Brewster angle)으로 경사진 plate를 형성시킴으로써 구현될 수 있는 광섬유 편광자에 대한 해석을 잘 알려진 Fresnel 방정식을 이용해서 해석해 보았으며, Yeh의 전자기파 해석 방법과 비교해 본 결과 서로 잘 부합된다는 것을 알았다.

Abstract

The characteristics of the optical fiber polarizer have been analyzed theoretically by using the Fresnel equations and compared with the results computed by the Yeh's electromagnetic theory. we found that they agreed reasonably well each other for the optical fiber polarizer of our interest.

Keyword : 광섬유 편광자, 브루스터 각

I. 서 론

최근 들어 광통신 시스템이나 광 센싱 시스템에서 편광자의 중요성이 점차 증가하고 있다. 광섬유 편광자는 기존의 벌크 형태의 편광자보다 소형이며, 삽입손실이 매우 적기 때문에 현재 많은 연구가 진행 중이다. 이전까지 제안되어진 광섬유 편광자를 제작할 수 있는 방법에는, 테이퍼된 광섬유에 metal을 코팅하여 제작하는 방법^[1]과 복굴절이 있는 광섬유에 UV빔을 조사시켜 장주기 격자를 삽입시키는 방법^[2] 등이 있다. 지금까지 광섬유 편광자의 동작특성은 Coupled mode 이론이나

Volume Current method^[3] 등을 통해서 해석되어 왔다. 본 논문에서는 광섬유 편광자를 해석하는데 있어서 위의 방법들에 비해서 훨씬 간단한 Fresnel 방정식에 기초를 둔 해석방법에 대해서 고찰해보고, 이 방법으로 시뮬레이션해본 결과를 Yeh의 전자기파 전송이론^[4]의 시뮬레이션 결과와 비교해 보겠다. 2장에서는 본 논문에서 제안하는 광섬유 편광자에 대한 해석방법에 대해서 살펴볼 것이며, 3장에서는 여러가지 파라미터에 따른 광섬유 편광자의 동작 특성을 시뮬레이션을 통해 분석해 보도록 하겠다.

* 正會員, 成均館大學校 情報通信工學府

(SungKyunKwan University Information & Communication Engineering)

※ 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2000-

00251)지원으로 수행되었음.

接受日字:2002年9月9日, 수정완료일:2003年10月10日

II. Fresnel 방정식에 근거한 광섬유 편광자의 해석

본 장에서는 굴절률이 다른 평판(plate)들이 <그림 1>처럼 주기적으로 반복되는 구조를 갖는 광섬유 편광

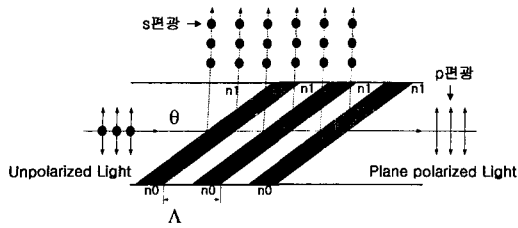


그림 1. 광섬유 편광자의 구조
Fig. 1. Schematic of a typical optical fiber polarizer.

자에 대한 간단한 해석방법에 대해서 설명하겠다. 여기서 설명하려고 하는 해석방법은 Volume Current method나 Yeh의 전자기와 전송이론보다 간단한 방법으로, 입사하는 평면파가 경계면에서 Fresnel 방정식에 따라서 투과 및 반사한다고 가정하고 해석하는 방법이다. 먼저, 광섬유 편광자는 <그림 1>에서와 같이 코어 부분에 n_0 와 n_1 으로 구성된 경사진 영역을 교대로 반복되게 함으로써, 두 영역 사이의 경계면에 평행한 방향으로 편광된 빛은 반사되고 평행한 방향과 수직인 방향으로 편광된 빛은 전부 투과하게 만든 소자이다. 그런데, 만일 <그림 1>과 같이 굴절률 n_0 와 n_1 이 주기적으로 반복이 되면 도파하는 코어모드가 광섬유 편광자 내부에서 코어모드와 클래딩모드 또는 방사모드로 결합할 수 있다^[5, 6]. 물론 이때 광섬유 편광자는 광섬유 격자의 구조를 하게 되며, 격자 간격 Λ 가 식 (1)과 같은 값을 갖게 될 때 도파하던 코어모드는 광섬유 모드(코어모드, 클래딩모드) 또는 방사 모드로 결합이 일어날 수 있다.

$$\Lambda = \lambda_0 / (n_{c, \beta 01} \pm n_{c, \beta 2}) \quad (1)$$

여기서, $n_{c, \beta 01}$ 는 LP_{01} 코어모드의 유효굴절률이고, $n_{c, \beta 2}$ 는 광섬유 모드 또는 구속되지 않은 방사모드의 유효굴절률이며, λ_0 는 동작 파장이다. 수식 1에서 + 부호는 격자간격이 짧은 격자(Short Period Grating)내에서 입사빔이 반사되면서 모드 결합이 일어나는 것을 나타내며, - 부호는 격자간격이 긴 격자(Long Period Grating)내에서 입사빔이 투과되면서 모드결합이 일어나는 것을 나타낸다.

본 논문에서 소개하고자 하는 편광자의 해석방법은 우선 굴절률이 n_0 와 n_1 인 평판(plate)이 <그림 1>처럼 브루스터 각(Brewster angle) θ_B 와 비슷한 각(θ)으로 기울어져서, 주기 Λ 를 간격으로 교대로 반복이 되고, 이 편광자의 입사면과 평행하게 선형 편광된 파(p-편광)와

이와 수직하게 편광된 파(s-편광)가 입사하며, plate가 $\theta \approx \theta_B$ 으로 기울어져 있을 경우에 s-편광과 p-편광 빛의 반사계수는 Fresnel 방정식에 따른다고 가정하고 해석하고자 한다. 이때, 경계면에서 반사되는 파(또는 모드)의 반사각은 충분히 커서 다중반사를 무시할 수 있다고 가정한다. 여기서, 주기 Λ 를 광섬유 모드와의 결합은 없으나 방사모드와의 결합이 있을 수 있는 영역의 값으로 정하는 경우, 다중 반사를 무시할 수 있기 때문에 위의 가정은 성립한다. 따라서, 위의 가정에 해당되는 광섬유 편광자의 주기 Λ 에 대한 범위는 대략 식 (2)와 같다고 할 수 있다.

$$\lambda_0 / (n_{eff01} + n_{effd}) < \Lambda < \lambda_0 / n_{eff01} \quad (2)$$

위의 수식에서 n_{eff01} 과 n_{effd} 은 각각 LP_{01} 코어모드와 최고차 클래딩모드의 유효굴절률이다. 본 논문에서는 광섬유 편광자가 식 (2)를 만족하는 주기를 갖는다고 가정하고 해석하려고 한다.

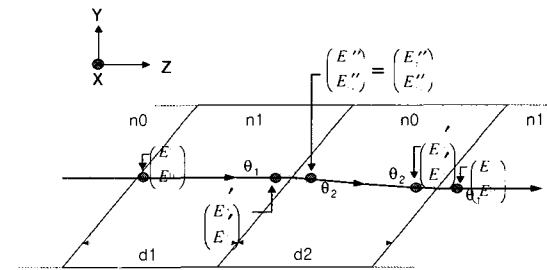


그림 2. 광섬유 편광자의 동작 원리
Fig. 2. Operating principle of the optical fiber polarizer.

<그림 2>는 광섬유 편광자의 한 부분으로, 굴절률이 서로 다른 두개의 plate가 하나의 셀(cell)을 구성한 것이다. 본 논문의 광섬유 편광자는 <그림 1>에서와 같이 서로 다른 굴절률을 가지는 plate가 주기적으로 있기 때문에 <그림 2>를 해석함으로써 많은 plate들이 존재하는 광섬유 편광자의 특성을 예측할 수 있다. s-편광면이 x축과 평행하고 p-편광면이 y축과 평행하다고 가정할 때, 도파하는 전계의 s성분 및 p성분의 크기는 각각 E_{sx} 와 E_{sy} (N 은 # of plate)이고 $d1$ 과 $d2$ 는 서로 다른 굴절률을 가지는 plate의 두께이다. 본 논문에서의 plate의 두께는 기울어지는 각도와 무관하게 일정하며, $d1$ 과 $d2$ 는 항상 같다고 가정한다. 또한, θ_1 과 θ_2 는 굴절률이 각각 n_0 와 n_1 인 격자면에 입사하는 빛의

각도를 나타낸다.

<그림 2>의 셀에 입사하는 빛은 굴절률 n_1 인 plate를 도파하다가 굴절률 n_0 인 plate의 전면부에서 투과와 반사가 일어난다. 이때, s-편광된 빔과 p-편광된 빔의 투과량 t_x 와 t_y 는 각각 Fresnel 방정식에 따라서 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} E_{1r}^* \\ E_{1y}^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_x & 0 \\ 0 & t_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{1r}' \\ E_{1y}' \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\text{where, } t_x = t_{\parallel} = \left(\frac{E_{1r}^*}{E_{1r}'} \right) = \frac{2n_1 \cos\theta_1}{n_1 \cos\theta_1 + n_0 \cos\theta_2}$$

$$t_y = t_{\perp} = \left(\frac{E_{1y}^*}{E_{1y}'} \right) = \frac{2n_1 \cos\theta_1}{n_1 \cos\theta_2 + n_0 \cos\theta_1}$$

또한, 입사한 빛이 각각의 plate를 도파하면서 받게 되는 영향은 아래의 식 (4)로 설명할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} E_{2r}' \\ E_{2y}' \end{pmatrix} = e^{ik_0 n_0 d_1} \cdot \begin{pmatrix} E_{2r}'' \\ E_{2y}'' \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} E_{1r}' \\ E_{1y}' \end{pmatrix} = e^{ik_0 n_0 d_2} \cdot \begin{pmatrix} E_{1r} \\ E_{1y} \end{pmatrix} \quad (4)$$

여기서, k_0 는 진공상태에서의 전파상수이며, 굴절률 n_0 인 plate의 전면부를 투과한 빛은 다시 전면부와 같이 후면부에서도 투과와 반사가 일어나므로 아래와 같은 식 (5)로 전개 할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} E_{2r} \\ E_{2y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t'_x & 0 \\ 0 & t'_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{2r}' \\ E_{2y}' \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\text{where, } t'_x = t_{\parallel} = \left(\frac{E_{2r}}{E_{2r}'} \right) = \frac{2n_0 \cos\theta_2}{n_0 \cos\theta_2 + n_1 \cos\theta_1}$$

$$t'_y = t_{\perp} = \left(\frac{E_{2y}}{E_{2y}'} \right) = \frac{2n_0 \cos\theta_2}{n_0 \cos\theta_1 + n_1 \cos\theta_2}$$

위의 식 (3)~식 (5)에 의해서, <그림 2>에서의 출력에 대한 식은 식 (6)과 같이 정리될 수 있다.

$$\begin{pmatrix} E_{2r} \\ E_{2y} \end{pmatrix} = e^{ik_0(n_0 d_1 + n_1 d_2)} \begin{pmatrix} t'_x & 0 \\ 0 & t'_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_x & 0 \\ 0 & t_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{1r} \\ E_{1y} \end{pmatrix} \quad (6)$$

<그림 1>에서와 같이 plate가 주기적으로 N-1번 반복되는 경우는 식 (6)은 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$\begin{pmatrix} E_{Nr} \\ E_{Ny} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{pmatrix}^{N-1} \begin{pmatrix} E_{1r} \\ E_{1y} \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} e^{ik_0(n_0 d_1 + n_1 d_2)(N-1)} (t'_x)^{N-1} & 0 \\ 0 & e^{ik_0(n_0 d_1 + n_1 d_2)(N-1)} (t'_y)^{N-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{1r} \\ E_{1y} \end{pmatrix}$$

따라서, 광섬유 편광자로부터 나오는 s-편광과 p-편광된 빔의 파워를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{P_r}{P_o} = \left| \frac{E_{Nr}}{E_{1r}} \right|^2 = |t'_x t_x|^{2(N-1)}$$

$$\frac{P_y}{P_o} = \left| \frac{E_{Ny}}{E_{1y}} \right|^2 = |t'_y t_y|^{2(N-1)} \quad (8)$$

III. 광섬유 편광자의 시뮬레이션 결과 및 분석

이상에서는 본 논문에서 제안하는 광섬유 편광자를 Fresnel 방정식에 근거해서 시뮬레이션을 하고 그 결과를 Yeh의 전자기와 전송이론을 이용한 해석방법과 서로 비교해볼 것이다. 그리고 시뮬레이션에서 얻어진 결과들을 바탕으로 광섬유 편광자의 성능을 살펴볼 것이다.

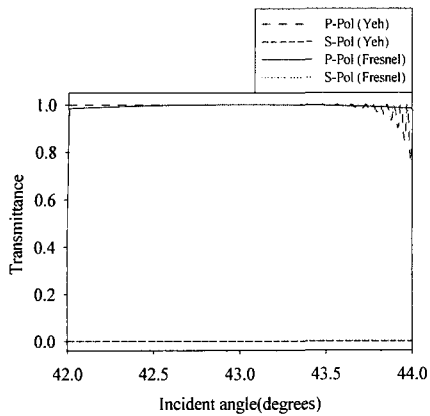
1. 광섬유 편광자에 대한 해석 방법의 비교

광섬유 편광자에 대한 시뮬레이션 결과를 비교하기 위해서 본 시뮬레이션에서는 광섬유 편광자의 동작과 장을 우선 1.55 μ m로 가정하였다. 또한, <그림 1>에서와 같이 광섬유 편광자를 구성하고 있는 plate들의 주기 Λ 는 코어 굴절률이 1.5이고 코어와 클래드간의 상대 굴절률차가 0.005라고 가정하였을 때 수식 2의 범위 안에 해당되는 임의의 값을 선택하였다. 아래의 <표 1>에는 두가지 해석방법을 비교하기 위해 사용된 주요 파라미터들의 값들과 이때 예상되는 s-편광빔과 p-편광빔의 소거비(Extinction ratio)를 나타내고 있다.

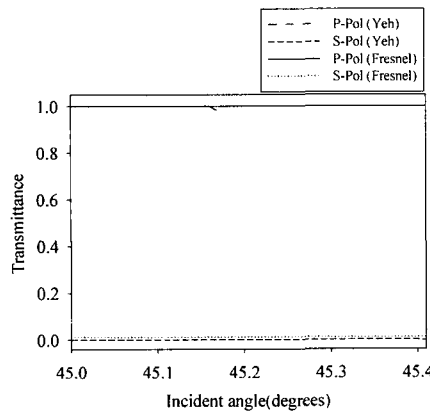
표 1. 시뮬레이션 파라미터 Table 1.

Δn	편광자의 길이(mm)	Extinction Ratio (p-편광빔:s-편광빔)		$\Lambda(\mu m)$	Brewster angle (degrees)	비고
0.1	0.935	Yeh	1 : 10 ⁻³ 이하	0.773	43.03	그림 3(a)
		Fresnel	1 : 10 ⁻⁵			
0.01	36.4	Yeh	1 : 10 ⁻³ 이하	0.728	45.19	그림 3(b)
		Fresnel	1 : 10 ⁻²			

<표 1>에서 Δn 은 <그림 2>에서와 같이 두개의 서로 다른 plate의 굴절률 n_0 와 n_1 의 차(Δn)로써 0.1과 0.01값을 택했다. 여기에서 편광자의 길이는 각각의 굴



(a)



(b)

그림 3. Fresnel 방정식에 근거한 해석방법과 Yeh의 전자기파 전송이론을 이용한 해석방법을 이용한 시뮬레이션의 투과 스펙트럼 (a) Δn 이 0.1인 경우 (b) Δn 이 0.01인 경우

Fig. 3. The comparison between the transmittance Spectra of the optical fiber polarizers expected by the Fresnel equations and the Yeh's electromagnetic theory. (a) : $\Delta n = 0.1$ (b) : $\Delta n = 0.01$

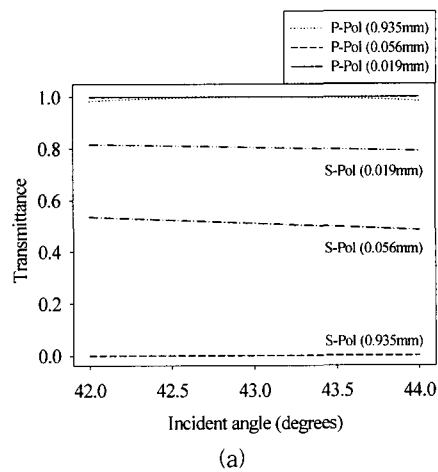
절물의 차가 0.1일 때와 0.01일 때 <표 1>에서와 같은 p-편광빔과 s-편광빔의 소거비를 얻기 위한 값이며, plate의 주기 Λ 는 광섬유 편광자의 동작파장을 $1.55\mu\text{m}$ 로 하기위해 수식 2의 범위 내에서 임의로 선택된 값이다. <그림 3>은 <표 1>의 파라미터 값을 가지고 시뮬레이션한 p-편광과 s-편광 빔의 투과 스펙트럼을 보여주는 그림이다. <그림 3(a)>는 Δn 이 0.1일 때이고, <그림 3(b)>는 Δn 이 0.01일 때이다. 이들 <그림 3(a)>와 <그림 3(b)>는 본 논문에서 제안하는 Fresnel 방정식에 근거한 해석방법과 Yeh의 전자기파 전송이론을 이용한

해석방법의 시뮬레이션 결과를 비교하는 그림으로, 입사각에 대한 투과 스펙트럼이 거의 일치하는 것을 보여주고 있다.

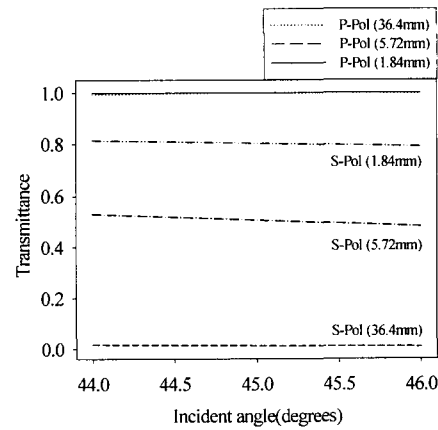
2. 광섬유 편광자의 성능분석

광섬유 편광자의 성능분석을 위해서 본 논문에서는 Δn 이 0.1과 0.01일 때에 편광자의 길이에 따른 Extinction ratio를 분석해볼 것이다. 시뮬레이션을 하기 위해 사용된 해석 방법으로는 본 논문에서 제안하고 있는 Fresnel 방정식에 근거한 해석방법을 이용하였다.

<표 2>는 편광자의 길이에 따른 p-편광빔과 s-편광빔의 소거비(Extinction ratio)의 값을 나타내고 있다.



(a)



(b)

그림 4. 편광자의 길이에 따른 Extinction Ratio의 변화 (a) Δn 이 0.1인 경우 (b) Δn 이 0.01인 경우

Fig. 4. Extinction ratio for the optical fiber polarizers with different lengths. (a) : $\Delta n = 0.1$ (b) : $\Delta n = 0.01$

표 2. Δn 이 0.1일 때의 광섬유 편광자의 특성
Table 2.

Δn	plate의 기울기 (degrees)	편광자의 길이(mm)	Extinction Ratio (p-편광빔:s-편광빔)	비고
0.1	43.03	0.019	1 : 0.8	그림 4(a)
		0.066	1 : 0.5	
		0.935	1 : 10^{-5}	

<표 2>에서 볼 수 있듯이 Δn 이 0.1이고, plate의 기울기가 브루스터 각(θ_B)일 때, 광섬유 편광자의 길이가 증가할수록 Extinction ratio는 향상됨을 보이고 있다. <그림 4(a)>는 plate의 기울기가 브루스터 각(θ_B) $\pm 1^\circ$ 인 범위에서 <표 2>의 파라미터 값들을 이용해 시뮬레이션한 것이다. 각각의 경우에서 p-편광빔은 편광자의 길이의 변화와는 무관하게 거의 모두 투과되는 스펙트럼을 보이고 있지만, s-편광빔은 편광자의 길이에 따라 투과 스펙트럼이 변화하는 것을 볼 수 있다.

표 3. Δn 이 0.01일 때의 광섬유 편광자의 특성
Table 3.

Δn	plate의 기울기 (degrees)	편광자의 길이(mm)	Extinction Ratio (p-편광빔:s-편광빔)	비고
0.01	45.19	1.84	1 : 0.8	그림 4(b)
		5.72	1 : 0.5	
		36.4	1 : 10^{-2}	

<표 3>에서는 Δn 이 0.01일 때의 광섬유 편광자의 특성을 나타낸 것이다. <표 2>에서와 같이 plate의 기울기가 브루스터 각에서 편광자의 길이가 증가할수록 p-편광빔과 s-편광빔의 소거비(Extinction ratio)는 향상됨을 보이고 있다. <그림 4(b)>는 <표 3>의 파라미터 값을 이용해 plate의 기울기가 브루스터 각(θ_B) $\pm 1^\circ$ 인 범위에서 시뮬레이션한 것으로 편광자의 길이가 증가할수록 Extinction ratio가 향상됨을 보이고 있다. 또한, <그림 4(a)>와 마찬가지로 각각의 경우에서 p-편광빔은 거의 일치하는 스펙트럼을 보이고 있다.

결론적으로 위의 두 경우에서, Δn 이 0.1과 0.01인 때를 비교하여 보면, Δn 이 크면 편광자의 길이를 작게 하여도 큰 p-편광빔과 s-편광빔의 소거비를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 광섬유 편광자를 소형으로 설계하기 위해서는 Δn 의 값을 크게 하는 것이 바람직하다.

본 논문에서 제안하는 광섬유 편광자를 구현하기 위한 방법으로는 광섬유를 절삭하는 방법, 광섬유를 압박하는 방법 그리고 광섬유에 UV빔을 조사하는 방법 등이 사용될 수 있을 것이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 삽입손실이 적고, 소형으로 구현될 수 있는 광섬유 편광자를 제안하고 이 광섬유 편광자의 동작원리에 대하여 Fresnel 방정식에 근거한 해석을 하였으며, 시뮬레이션을 통해서 그 특성을 확인하였다. 두 개의 서로 다른 plate의 굴절률 n_0 와 n_1 의 차이(Δn)와 광섬유 편광자의 길이, 그리고 광섬유 편광자에 입사하는 각도에 따른 p-편광빔과 s-편광빔의 소거비(Extinction ratio)를 확인 할 수 있었다. 또한 Yeh의 전자기파 전송이론과 본 논문에서 제안하고 있는 해석 방법이 비교적 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 향후에 본 연구에서 제안하는 광섬유 편광자들을 직접 제작해 보고 이론적인 시뮬레이션을 통한 결과와 비교해 볼 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] A. Diez, M. V. Andres, D.O. Culverhouse, "In-Line Polarizers and Filters Made of Metal-coated Tapered Fibers : Resonant Excitation of Hybrid Plasma Modes", Photonics Technology Letters, Vol. 10, No. 6, pp 823, June 1998.
- [2] B. Ortega, L. Dong, W. F. Liu, J. P. de Sandro, L. Reekie, S. I. Tsypina, V. N. Bagratashvili, R. I. Laming, "High-Performance Optical Fiber Polarizers Based on Long-Period Gratings in Birefringent Optical Fibers", Photonics Technology Letters, Vol. 9, No. 10, pp 1370, October 1997.
- [3] Yufeng Li, Mark Froggatt, and Turan Erdogan, "Volume Current Method for Analysis of Tilted Fiber Gratings", Journal of Lightwave Technology, Vol. 19, No. 10, pp1580, October 2001.
- [4] P.Yeh, A.Yariv "Optical Waves in Crystals: Propagation and Control of Laser Radiation",

Chap.6, 2002.

[5] K.S. Lee, "Mode Coupling in tilted planar waveguide gratings", Applied Optics, Vol. 39, Issue. 33, pp 6144-6149, 2000.

[6] K.S. Lee and T. Erdogan, "Fiber Mode Conversion with tilted gratings in an optical fiber", J. Opt. Soc. Am, Vol. 18, No. 5, pp 1176-1185, 2001.

[7] T. Erdogan and J. Sipe, "Tilted fiber phase gratings", J. Opt. Soc. Am, Vol. 13, Issue. 2, pp 296-1996.

[8] K.S. Lee and J.Y. Cho, "Polarization mode coupling in birefringent fiber gratings", J. Opt. Soc. Am, Vol. 19, pp 1621-1631, 2002.

저 자 소 개



金 佶 煥(正會員)
 2002년 2월 : 공주대학교 공대 정보통신공학과 졸업. 2002년 3월~현재 : 성균관대 대학원 정보통신공학부(석사과정) 재학중. <주관심분야 : 광통신, 광전자, 광센서>



李 景 植(正會員)
 1979년 : 성균관대 공대 전자공학과 졸업. 1978년 12월~1980년 8월 : 한국통신기술연구소(현 전자통신연구소) 근무. 1982년 : University of Colorado(Boulder)대 석사. 1985년 8월 : University of Colorado대 박사학위 취득(Electrical Engineering dept.). 1985년 9월~1986년 8월 : University of Colorado대 연구 교수. 1986년 9월~1988년 7월 : 미국 립표준연구소(NIST) 근무. 1988년 7월~1990년 2월 : 미 TACAN Corp. 근무. 1998년 9월~1999년 8월 : University of Rochester, Institute of Optics, 방문교수. 1990년 3월~현재 : 성균관대 정보통신공학부 교수. <주관심분야 : 광통신소자 및 시스템, 광섬유소자, 광섬유센서, PMD 보상, photonic devices 등>



趙 峻 庸(正會員)
 1998년 2월 : 성균관대 공대 전자공학과 졸업. 2000년 2월 : 성균관대 대학원 전기전자 및 컴퓨터공학과 졸업(석사). 2000년 2월~현재 : 성균관대 대학원 정보통신공학부(박사과정) 재학중. <주관심분야 : 광통신, 광전자, 광센서>