

WDM 광통신 시스템을 위한 단일모드 광섬유 무편광기

이동렬 · 전상민 · 김용평[†]

경희대학교 전자정보대학/레이저공학연구소

☎ 449-701 경기도 용인시 기흥읍 서천리 1

(2003년 1월 21일 받음, 2003년 4월 9일 수정본 받음)

2×2 방향성 결합기와 단일모드 광섬유를 이용하여 무편광기를 구현하였다. 행렬식을 이용한 모의실험을 통해 편광도를 줄이는 방법을 이론적으로 설명하였고 이를 실험적으로 검증하였다. 0.05 nm 이하의 좁은 선폭을 가진 편광된 입력광원의 편광상태 변화에 대해 -20 dB의 출력 편광도를 얻을 수 있었다. 광섬유 지연선의 길이를 광원의 가산섭 길이보다 충분히 길게 함으로써 입력광의 편광 변화에 의한 강도 잡음을 효과적으로 없앨 수 있음을 실험적으로 검증하였다.

주제어 : optical fiber, depolarizer, polarization control

I. 서 론

광의 특성 중 편광은 특히나 제어하기 힘든 성질의 하나이다. 편광 변화에 따른 출력강도의 변화는 광통신 시스템에 큰 영향을 끼친다. 좁은 선폭을 가진 편광된 광이 단일모드 광섬유를 전파할 때 수십 km를 지난 후에도 높은 편광도가 관찰된다.^[1] 편광 상태는 기계적, 환경적 변화에 의해 매우 불규칙하게 변화하게 되는데 광섬유 시스템을 이루고 있는 많은 소자들 즉, 광 스위치, 광 결합/분배기, 커넥터(connector) 등이 편광의 변화에 민감한 성질을 갖고 있으므로 결국 편광의 변화는 출력단에서 강도 잡음을 일으키게 된다. 코히어런트(coherent) 광통신 시스템이나 간섭계형 센서에서 편광 상태의 변화는 신호 페이딩(fading)을 일으키게 되고^[2,3] EDFA(Erbium doped fiber amplifier)에서 홀 버닝(hole burning)의 원인이 되어^[4] 전체적인 시스템의 성능을 저하시킨다. 편광 변화로 인한 이러한 문제점들을 해결하기 위해, 1) 편광 유지 광섬유를 이용하는 방법,^[5] 2) 출력단에 편광 조절기를 삽입하여 원하는 출력 편광 상태를 인위적으로 만드는 방법,^[6] 3) 무편광된 광을 사용하는 방법^[7,8] 등 다양한 접근 방법으로 연구가 진행되어 왔다.

본 연구에서는 무편광된 광을 사용하는 방법에 초점을 맞추었다. 리옷 무편광기(Lyot depolarizer)와 같은 기존의 무편광기는 선폭이 매우 넓은 SLD(super luminescent diode)를 광원으로 사용하였다. 이러한 무편광기는 센서용으로는 적당하나 가격이 비싸다. 가장 최근의 광섬유 무편광기의 연구 결과는 수 nm의 선폭을 가진 1310 nm 대역의 광원을 이용하여 저가의 무편광기를 구현하기에 이르렀다.^[9] 그러나 WDM(wavelength division multiplexing)이 0.05 nm 이하의 선폭을 갖는 1550 nm 대역의 광원을 사용하기 때문에 이를 위한 광통신 소자로 쓰이기엔 한계가 있다. 또한 석영(quartz)을 이용한 무편광기는 광학적 정렬이 어렵고 진동 등의 기계적 변화

에 민감하기 때문에 광섬유 시스템에 적용하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 좁은 선폭의 1550 nm 대역 DFB LD(distributed feedback laser diode)를 광원으로 사용하여 무편광기를 구현하고 편광도를 측정함으로써 WDM을 위한 광통신 소자로서의 응용 가능성을 검토하였다. 무편광기의 성능을 나타내기 위해 편광된 광 파위의 비율로써 정의되는 편광도를 이용하였다. 비등방성 단일 모드 광섬유에서의 편광도에 대한 일반적 표현은 이미 보고 되었다.^[10] 모드결합 이론 또한 실험적으로 입증되었다.^[11] 이와 함께 본 논문에서는 행렬식을 이용하여 편광도를 계산하는 방법^[12]과 이를 모의 실험하는 방법을 적용시켰다.^[13] 이러한 방법의 광섬유 무편광기는 단일 모드 광섬유 결합기를 이용한 저렴한 구조를 가지며 단일 모드 광섬유 시스템에 수동형 소자로 쓰일 수 있고, 또한 편광축을 맞출 필요가 없는 장점을 갖는다.

II. 이 론

결합기에 연결된 고리형 구조의 광섬유 지연선(fiber-ring delay-line)은 그림 1과 같이 입력단 중 하나를 출력단 중 하나에 연결함으로써 만든다. 단일 모드 광섬유는 선형 복굴절 및 원형 복굴절을 갖기 때문에 이를 지연기(retarder)와 회전기(rotator)의 연결로 모델링 할 수 있다.^[14,15] 이러한 단일 모드 광섬유 모델에 대한 존스 행렬(Jones matrix)은 다음과 같다.

$$R_e(\delta, \varphi) = \begin{bmatrix} A & B \\ B & A^* \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$R_o(\Omega) = \begin{bmatrix} C & D \\ -D & C \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 R_e 는 지연기의 존스 행렬, R_o 는 회전기의 존스 행렬이며,

$$A = e^{i\delta/2} \cos^2(\varphi) + e^{-i\delta/2} \sin^2(\varphi)$$

[†]E-mail: ypkim@khu.ac.kr

$$\begin{aligned} B &= 2i\sin(\varphi)\cos(\varphi)\sin(\delta/2) \\ C &= \cos(\Omega/2) \\ D &= \sin(\Omega/2) \end{aligned}$$

이고, δ 은 지연기의 지연율, φ 는 지연기의 빠른 축 방위각, Ω 는 회전기의 회전율이다.

고리형 구조의 광섬유 지연선을 순환하여 나오는 출력을 계산하기 위해 손실이 없는 시스템이라 가정하고 가능한 모든 편광상태를 나타낼 수 있는 입력광을 $J_i(\psi, \chi)$ 라 하여 그 세기를 I_i 라 하면

$$J_i(\psi, \chi) = \frac{I_i}{2} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서

$$\begin{aligned} A &= 1 + \cos(2\psi) \cos(2\chi) \\ B &= \sin(2\psi)\cos(2\chi) - i\sin(2\chi) \\ D &= 1 - \cos(2\psi)\cos(2\chi) \end{aligned}$$

이고, $I_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 이다. ψ 와 χ 는 입력광의 편광상태를 나타내는 방위각과 타원율이다. 그림 1에서의 입력단 1에서 출력단 3과 4로의 결합행렬을 각각 K_d, K_c 라 하자. 그러면,

$$K_d = \begin{bmatrix} \sqrt{1-k} & 0 \\ 0 & \sqrt{1-k} \end{bmatrix}, K_c = \begin{bmatrix} \sqrt{k} & 0 \\ 0 & \sqrt{k} \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서 k 는 결합 계수이다. 입력광 $J_i(\psi, \chi)$ 가 지연기(R_e), 회전기(R_o) 및 결합기(K_d, R_c)를 포함하는 복굴절 소자 M 을 통과할 때 그 행렬 표현은 다음과 같다.

$$J' = MJ_iM^+ \quad (5)$$

여기서 M^* 는 M 의 Hermitian conjugate이며 quasi-monochromatic 근사에서 행렬의 변환법칙이다. 고리형 구조의 광섬유 지연선을 순환하는 각각의 순환파에 대한 복굴절 행렬은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} M_0 &= K_d \\ M_1 &= K_c R_o R_e K_c \\ M_2 &= K_c R_o R_e K_d R_o R_e K_c \\ \dots \\ M_n &= K_c (R_o R_e K_d)^{n-1} R_o R_e K_c \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 M_0 는 고리형 구조의 광섬유 지연선을 한번도 통과하지 않고 결합기를 통해 직접 나가는 파에 대한 복굴절 행렬이고,

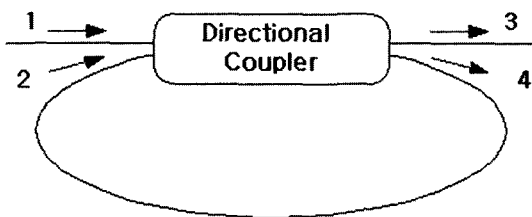


그림 1. 고리형 구조의 광섬유 지연선.

M_1 은 광섬유 지연선을 한번 통과한 것, M_2 는 광섬유 지연선을 두 번 통과한 것, 따라서 M_n 은 광섬유 지연선을 n 번 통과한 것이다. 그러므로 개개의 순환파들의 행렬은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} J_0' &= M_0 J_i M_0^+ \\ J_1' &= M_1 J_i M_1^+ \\ J_2' &= M_2 J_i M_2^+ \\ \dots \\ J_n' &= M_n J_i M_n^+ \end{aligned} \quad (7)$$

출력은 개개의 순환파들의 합과 같다. 따라서,

$$J_e = J_0' + J_1' + J_2' + \dots = \sum_{n=0}^N J_n' \quad (8)$$

식 (8)로부터 출력파의 편광상태 J_n' 은 $\psi, \chi, n, \delta, \varphi, \Omega, k$ 값들에 의해 변하는 복굴절 행렬 M_n 에 의해 결정된다. 그러므로 순환 고리형 광섬유 지연선의 복굴절 때문에 출력단으로 나오는 순환파($J_0', J_1', J_2', \dots, J_n'$)들은 각각 다를 것이고 이는 입력 편광상태 $J_i(\psi, \chi)$ 와 복굴절 행렬 M_n 에 의존한다. 따라서 무편광은 고리형 광섬유 지연선의 복굴절과 결합기의 결합 계수를 적절히 선택함으로써 만들 수 있다. 이때 고리형 구조의 광섬유 지연선에서 간섭이나 공진이 없어야 하며 이러한 조건은 광원의 가간섭 길이보다 광섬유 지연선의 길이를 길게 함으로써 쉽게 만족시킬 수 있다. 입력파의 비간섭성 순환 때문에 출력파는 다른 강도를 가진 다른 편광상태의 중첩이다. 무편광은 순환 빔의 수많은 각각의 편광상태가 합쳐질 때 일어난다. 즉, 서로 다른 무수히 많은 편광상태들이 각각의 강도를 갖고 간섭 없이 중첩이 되므로 고리형 구조의 광섬유 지연선을 통과한 출력파는 결국 무편광된 광이 된다. 출력파의 편광도(DOP)는 다음과 같다.^[12]

$$DOP = (1 - [4\det(J_e)/\text{Tr}(J_e)^2])^{1/2} \quad (9)$$

여기서, $\det(J_e)$ 는 J_e 의 행렬식(determinant)이고 $\text{Tr}(J_e)$ 는 행렬의 트레이스(trace)이다.

그림 2-a~2-c는 입력 편광상태를 변화시켰을 때 δ, φ, Ω 값들에 대한 출력 편광도의 관계를 보인 그림이다. 그림 2-a는 지연기의 지연율(Ω)을 제외한 나머지를 임의의 값($k=2/3, \varphi=\pi/3, \Omega=\pi/3$)으로 주었을 때 입력 편광 상태의 변화에 따른 지연율에 대한 최대, 최소 편광도를 나타내고, 그림 2-b는 회전율(φ)을 제외한 나머지를 임의의 값($k=2/3, \delta=\pi/3, \Omega=\pi/3$)으로 주었을 때 입력 편광 상태의 변화에 따른 회전율에 대한 최대, 최소 편광도를, 그림 2-c는 지연기의 빠른 축 방위각(φ)을 제외한 나머지를 임의의 값($k=2/3, \delta=\pi/3, \Omega=\pi/3$)으로 주었을 때 입력 편광 상태의 변화에 따른 지연기의 빠른 축 방위각에 대한 최대, 최소 편광도를 나타낸다. 그림 2-a~2-c를 통해 최소 편광도를 얻기 위한 광섬유 지연선 복굴절의 최적 값들은 다음과 같이 일반화 되었다.

$$\delta = \pm(2m+1)\pi, \Omega = \pm(2m+1)\pi, \varphi = \text{임의의 값} \quad (10)$$

여기서 m 은 정수이다. 결합계수 k 의 최적값을 계산하기 위해 식 (10)으로부터 구해진 값($\delta=\pi, \Omega=\pi, \varphi=\pi$)들을 대입하여

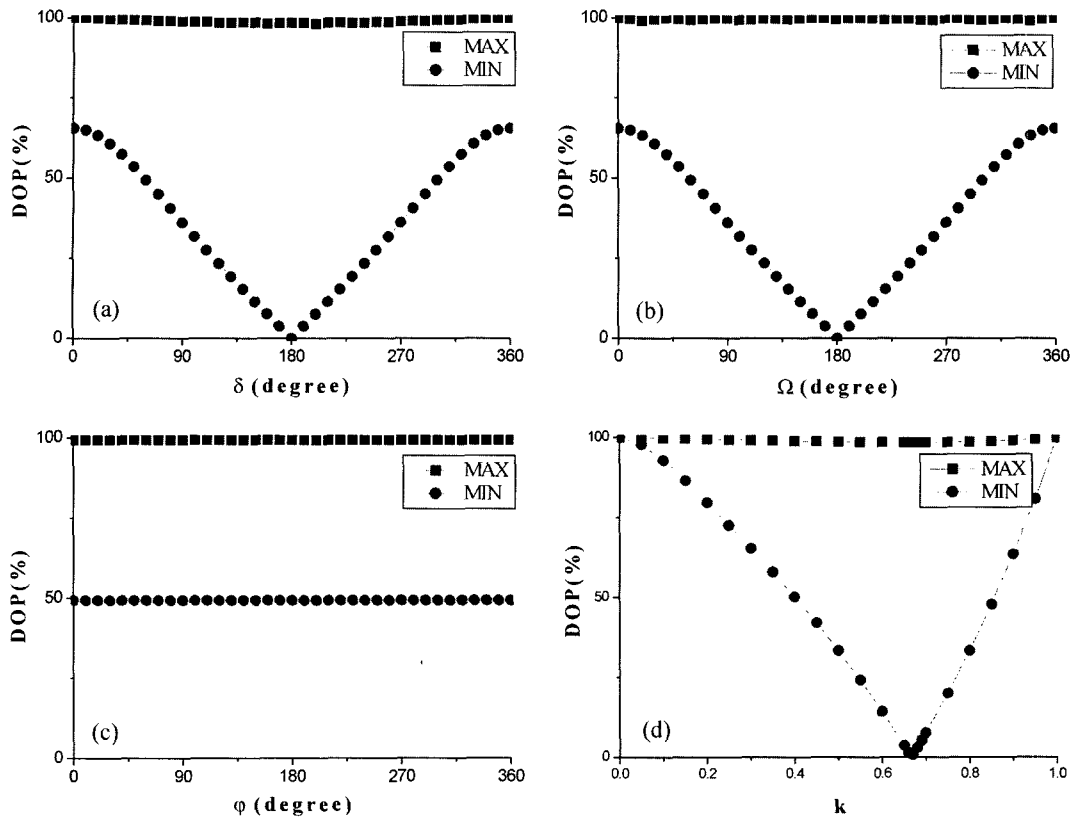


그림 2. (a) 입력 편광상태의 변화에 대한 고리형 광섬유 지연선의 출력 편광도의 특성 : 지연율에 대한 출력 편광도($k=2/3, \phi=\pi/3, \Omega=\pi/3$), (b) 입력 편광상태의 변화에 대한 고리형 광섬유 지연선의 출력 편광도의 특성 : 회전율에 대한 출력 편광도($k=2/3, \phi=\pi/3, \delta=\pi/3$), (c) 입력 편광상태의 변화에 대한 고리형 광섬유 지연선의 출력 편광도의 특성 : 방위각에 대한 출력 편광도($k=2/3, \phi=\pi/3, \Omega=\pi/3$), (d) 입력 편광상태의 변화에 대한 고리형 광섬유 지연선의 출력 편광도의 특성 : 결합계수에 대한 출력 편광도($\delta=\pi, \Omega=\pi, \phi=\pi$).

입력 편광 상태의 변화에 따른 결합계수에 대한 최대, 최소 편광도를 계산하였다. 이때 결합계수에 대한 출력 편광도는 그림 2-d에 나타나있다. 모든 파라미터들을 최적화 시켰을 때 얻을 수 있는 최소 출력 편광도는 0.1%보다 낮게 계산되었다.

그림 3은 두 개의 방향성 결합기를 사용할 때의 개념도이다. 첫 번째 결합기의 출력은 입력광의 편광 상태에 따라 부분 편광된 광이다. 즉, 편광된 광과 무편광된 광의 합으로 다음과 같이 표현 가능하다.

$$J_{e1} = J_{e1}^{(dep)} + J_{e1}^{(pol)} \quad (11)$$

여기서 J_{e1} 은 첫 번째 방향성 결합기의 출력광이고 그중 $J_{e1}^{(dep)}$ 은 무편광된 광, $J_{e1}^{(pol)}$ 은 편광된 광을 나타낸다.

입력 편광을 변화시키며 최적화 시킨 파라미터를 대입했을

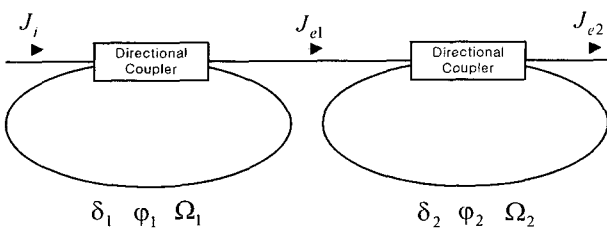


그림 3. 두 개의 방향성 결합기를 직렬 연결시킨 무편광기의 구조.

때의 출력 편광도는 그림 4-a와 같다. 이것은 하나의 방향성 결합기를 이용하여 무편광기를 구현 했을 때, 광섬유 지연선의 복굴절 $R_c(\delta, \phi), R_c(\Omega)$ 과 결합계수 k , 그리고 입력 편광 상태를 적절히 조절함에 따라 0.1%에서 100%까지 출력 편광도가 변할 수 있음을 보여준다. 두 번째 방향성 결합기의 광섬유 지연선은 첫 번째 방향성 결합기의 출력광중 편광된 광을 무편광시키기 위해 사용한다. 첫 번째 방향성 결합기의 출력에 대해 두 번째 방향성 결합기의 광섬유 지연선의 복굴절을 조절해 주었을 때 입력 편광 상태의 변화에 따른 출력 편광도가 그림 4-b에 나타나있다.

III. 실험 및 결과

두개의 방향성 결합기를 이용한 출력의 무편광화를 위한 실험 구성은 그림 5에 나타냈다.

입력광원으로 사용한 광원은 (주)엠텍의 레이저 다이오드 마운트(laser diode mount) MSMT-10, 레이저 다이오드 드라이버(laser diode driver) MSLD-3을 사용하였다. 레이저 다이오드 드라이버의 구동 전류는 50 mA이며 구동 온도는 20°C 이다. 출력 파장은 1555 nm이며 FWHM은 0.05 nm 이하이다.

방향성 결합기는 (주)신한 포토닉스에서 주문 제작하였으며 1550 nm 대역에서 2/3의 결합계수를 갖는다. 편광 조절기

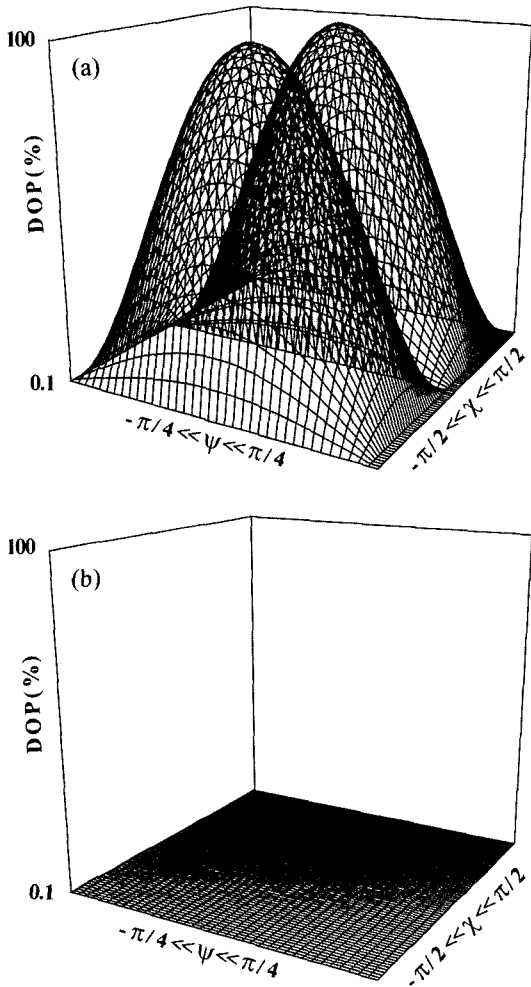


그림 4. (a) 입력 편광 변화에 따른 첫 번째 방향성 결합기의 출력 편광도의 변화 : ($\delta_1 = \pi, \Omega_1 = \pi, \varphi_1 = \pi, k = 2/3$), (b) 입력 편광 변화에 따른 두 번째 방향성 결합기의 출력 편광도의 변화 : ($\delta_2 = \pi, \Omega_2 = \pi, \varphi_2 = \pi, k_2 = 2/3$).

(polarization controller)는 Fiber Pro사의 PC1000을 사용하였다. 입력단의 편광 조절기(PC1)은 입력광의 편광 상태를 변화시키기 위해 사용하였고, 첫 번째 방향성 결합기의 고리형 구조의 광섬유 지연선에 삽입된 편광 조절기(PC2)와 두 번째 방향성 결합기의 고리형 구조의 광섬유 지연선에 삽입된 편광 조절기(PC3)은 광섬유 지연선의 복굴절을 조절하기 위해 사용하였으며, 출력단의 편광 조절기(PC4)는 출력의 편광 상태를 변화시키기 위해 사용하였다. 광섬유 스푼(fiber spool)은 광원의 가간섭 길이보다 지연선의 길이를 훨씬 길게 하기 위해, 즉 비간섭 조건을 만족시키기 위해 삽입 하였다. DFB-LD의 경우 간섭현상을 없애기 위해서는 지연선의 길이를 광원의 가간섭 길이보다 수십배 이상 길게 해야 한다. 실험에 쓰인 광원의 가간섭길이는 측정된 FWHM에 의해 약 5 cm로 계산되었는데 실험을 통해 간섭 현상이 완전히 없어지는 지연선의 길이는 약 100 m로 관찰되었다. 이는 광원의 선폭을 측정 한 OSA(optical spectrum analyzer)의 분해능이 0.05 nm로써 실제 광원의 선폭은 그보다 더 좁기 때문이라 생각된다. 광섬유 스푼은 지름 15 cm에 3M사의 단일모드 광섬유를 100번 감아 제작하였고 분석기(analyzer)로 쓰인 편광기(polarizer)는 무편광기의 출력을 확인하기 위해 편광에 민감한 광섬유 소자(fiber-optic device)로 쓰였다. 광신호 수광에 사용된 광 검출기는 Fermionics사의 모델 FD80 제품을 사용하였으며 중심파장 1550 nm에서 응답도 0.95를 갖는다.

편광도는 다음과 같은 방법으로 측정한다.^[12]

$$DOP[dB] = \log \left[\frac{I_{max}(\epsilon, \theta_a) - I_{min}(\epsilon, \theta_a)}{I_{max}(\epsilon, \theta_a) + I_{min}(\epsilon, \theta_a)} \right] \quad (12)$$

여기서 $I_{max}(\epsilon, \theta_a)$ 와 $I_{min}(\epsilon, \theta_a)$ 는 모든 가능한 편광상태에서 관찰되는 강도의 최소값과 최대값이다. PC4를 조절하였을 때 오실로스코프로 관찰되는 출력 강도의 최대, 최소값(ϵ)과 분석기를 회전시켰을 때 오실로스코프로 관찰되는 출력 강도의 최대, 최소값(θ_a)을 측정하여 편광도를 계산한다. 만일 무편광기의 출

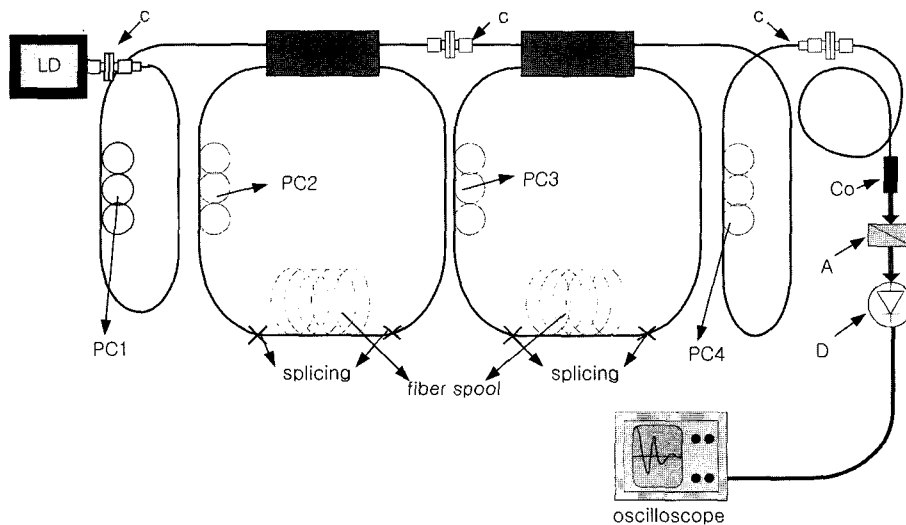


그림 5. 두 개의 방향성 결합기를 이용한 광섬유 무편광기 실험 구성도(c: connector, DC: directional coupler, PC: polarization controller Co: collimator, A: analyzer, D: photo detector).

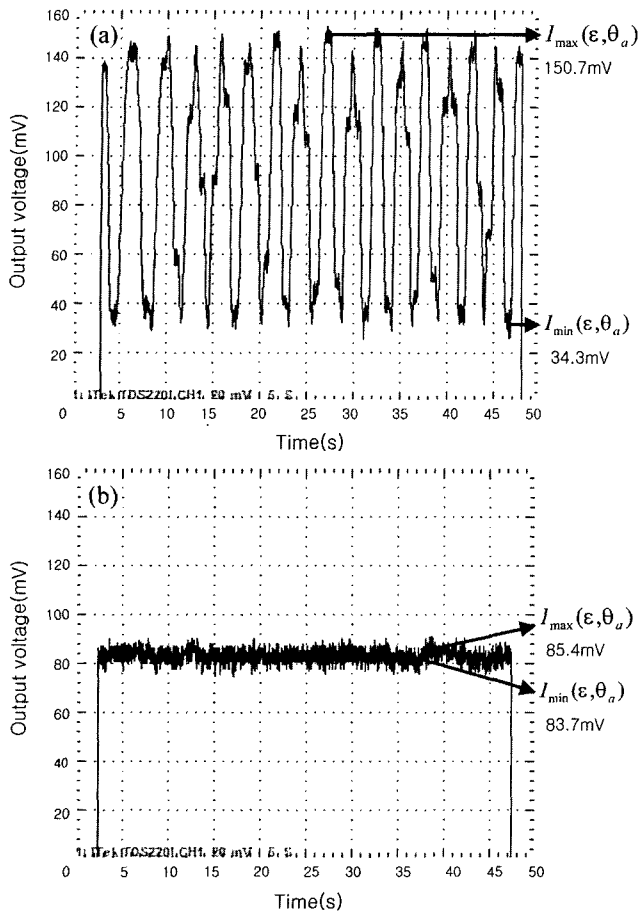


그림 6. (a) 방향성 결합기를 이용한 무편광기의 출력 편광도 : 입력 편광 변화에 대한 첫 번째 방향성 결합기의 출력 편광도, (b) 방향성 결합기를 이용한 무편광기의 출력 편광도 : 입력 편광 변화에 대한 두 번째 방향성 결합기의 출력 편광도.

력이 어느 정도의 편광도를 갖는다면 출력단의 편광 조절기 4에 의해 편광 상태의 변화가 생기게 되고 이는 분석기로 쓰인 편광기를 회전시켰을 때 강도 변화를 일으킬 것이다.

실험은 입력단에 있는 PC1을 조절하여 입력 편광 상태를 변화 시키고 PC2와 PC3을 조절하여 고리형 광섬유 지연선의 복굴절을 조절한 후 PC4를 조절하고 분석기를 회전하여 오실로스코프로 관찰하였다. 오실로스코프는 20 mV/DIV와 5 sec/DIV로 50초 동안의 출력 강도 변화를 관찰하였다. 그림 6-a, 그림 6-b의 실험결과는 실험 시 온도 25.3~25.7°C의 상온에서 측정하였다. 그림 6-a는 입력 편광 상태의 변화에 따른 첫 번째 방향성 결합기의 출력 편광도를 나타낸다. 입력 편광 상태를 변화 시키면서 실험하였을 때 오실로스코프에 50초 동안 강도 변화를 관찰한 결과 $I_{\max}(\epsilon, \theta_a)$ 는 150.7 mV, $I_{\min}(\epsilon, \theta_a)$ 은 34.3 mV로 측정되었다. 이에 의해 식 (12)로 계산한 출력 편광도는 -2 dB 이다. 그림 6-b는 두 개의 방향성 결합기를 이용하여 무편광기를 구현 하였을 때의 두 번째 방향성 결합기의 출력 편광도를 나타낸다. 첫 번째 방향성 결합기의 출력은 편광된 광과 무편광된 광이 섞여 있는 부분 편광된 광이며 이중 편광된 광의 성분들이 두 번째 방향성 결합기의 고리형 구

조의 광섬유 지연선을 통해 무편광된 광이 됨으로써 결국 방향성 결합기를 두개 연결한 광섬유 무편광기의 출력단에서 무편광된 광을 얻을 수 있다. 입력 편광 상태를 변화 시키면서 실험 하였을 때 오실로스코프에 50초 동안 강도 변화를 관찰한 결과 $I_{\max}(\epsilon, \theta_a)$ 는 85.4 mV, $I_{\min}(\epsilon, \theta_a)$ 은 83.7 mV로 측정되었다. 이에 의해 식 (12)로 계산한 출력 편광도는 -20 dB이다. 실제 시스템에서는 광섬유 지연선과 광섬유 스플의 용착 접속(splicing) 손실과 광섬유 자체의 손실, 결합기의 삽입 손실로 인해 실제의 광파워는 이론적인 최적의 결합비율(1:2)로 나뉘지 않게 되어 모의실험을 통해 얻은 이상적인 출력 편광도와 실제 시스템의 출력 편광도는 약 10 dB 정도 차이가 남을 알 수 있다. 따라서 이러한 손실들을 고려하여 실제 결합비율이 1:2가 되게 결합기를 제작한다면 보다 효율적인 광섬유 무편광기가 될 수 있으리라 예상한다.

IV. 결 론

본 논문에서는 두개의 방향성 결합기와 단일모드 광섬유를 이용하여 무편광기를 구성하였다. 광섬유 결합기의 입력단 중 하나를 출력단 중 하나에 연결시켜 고리형 구조의 광섬유 지연선을 만들고 단일 모드 광섬유의 복굴절을 조절하여 두 직교 편광모드간의 공통의 가간섭성을 없애 편광도를 낮추는 행렬 이론, 모의실험, 실제 제작 및 측정된 값을 제시하였다. 기존의 무편광기는 수 nm의 선폴을 갖는 1310 nm 대역의 광원을 사용하여 저가의 센서용 소자로의 응용을 가능케 하였다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 0.05 nm 이하의 아주 좁은 선폴을 가진 DFB-LD를 광원으로 사용하는 경우 광섬유 지연선의 길이를 충분히 길게 함으로써 무편광기를 구현할 수 있음을 실험으로 검증하였다. 이로써 센서 분야에 적용되던 기존의 광섬유 무편광기의 응용 영역을 0.05 nm 이하의 협대역 광원을 사용하는 파장 분할 다중화 광 통신 영역에까지 확장시켰으며 본 연구에서 제안한 광섬유 무편광기는 파장 분할 다중화 광 전송 시스템에서 편광 변화에 의한 강도 잡음을 줄여 전체적인 시스템의 성능을 향상시키는데 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

이러한 광섬유 무편광기는 광학소자의 기계적인 구동이 전혀 필요 없다. 간단한 커넥터 연결만으로 광학계가 구성되기 때문에 광학적인 정렬이 필요하지 않아 매우 안정적인 시스템을 구성할 수 있고 일반적인 단일모드 광섬유와 광 결합기를 사용함으로써 저가의 제작비용으로 광섬유 시스템에서 수동형 소자로 쓰일 수 있다.

참고문헌

[1] K. Okamoto, Y. Sasaki, T. Miya, M. Kawachi, and T. Eda-
hiro, "Polarization characteristics in long-length V.A.D.
single mode fibers," *Electron. Lett.* 16, pp. 768-769, 1980.
 [2] T. Okoshi, "Polarization-state control schemes for hetero-
dyne or homodyne optical fiber communications," *J. Light-
wave Technol.* 3, pp. 1232-1237, 1985.
 [3] A. D. Kersey, M. J. Marrone, and A. Dandridge, "Observa-

- tion of input-polarization- induced phase noise in interferometric fiber-optic sensors,” *Opt. Lett.* 13, pp. 847- 849, 1988.
- [4] F. Bruyere and O. Audouin, “Penalty in long-haul optical amplifier systems due to polarization dependent loss and gain,” *IEEE Photon. Technol. Lett.* 6, pp. 654-656, 1994.
- [5] J. Noka, K. Okamoto, and Y. Sasaki, “Polarization maintaining fibers and their applications,” *J. Lightwave Technol.* 4, pp. 1071-1089, 1986.
- [6] H. C. Lefevre, “Single-mode fiber fractional wave device and polarization controllers,” *Electron. Lett.* 16, pp. 778-780, 1980.
- [7] M. A. Santoro and C. D. Poole, “Polarization scrambling using a short piece of high- birefringence optical fiber and a multifrequency laser diode,” *J. Lightwave Technol.* 12, pp. 288-293, 1994.
- [8] W. K. Burns, “Degree of polarization in the Lyot depolarizer,” *J. Lightwave Technol.* 1, pp. 475-478, 1983.
- [9] M. Martinelli and J. C. Palais, “Dual fiber-ring depolarizer” *J. Lightwave Technol.* vol. 19, pp. 899-905, 2001.
- [10] J. L. Sakai, S. Machida, and T. Kimura, “Degree of polarization in anisotropic single-mode fibers: theory,” *IEEE J. Quantum Electron.* 18, pp. 488-495, 1982.
- [11] S. C. Rashleigh, W. K. Burns, R. P. Moeller, and R. Ulich, “Polarization holding in birefringent single-mode fibers,” *Opt. Lett.* 7, pp. 40-42, 1982.
- [12] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, Pergameon Oxford, pp. 544-555, 1985.
- [13] P. Shen, J. C. Palais and C. Lin, “Fiber recirculating delay-line tunable depolarizer,” *Appl. Opt.* 37, pp. 443-448, 1998.
- [14] A. J. Barlow, “Optical-fiber birefringence measurement using a photo-elastic modulator,” *J. Lightwave Technol.* 3, pp. 135-144, 1985.
- [15] D. Tang, A. H. Rose, G. Day, and S. M. Etzel, “Annealing of linear birefringence in single-mode fiber coils: application to optical fiber current sensors,” *J. Lightwave Technol.* 9, 1031-1037, 1991.

Single-mode fiber depolarizer for WDM optical communications

Dong-Ryul Lee, Sang-Min Jeon, and Yong-Pyung Kim[†]

College of Electronics and Information / Institute for Laser Engineering, Kyunghee University, Yongin 449-701, KOREA

[†]E-mail: ypkim@khu.ac.kr

(Received January 21, Revised manuscript April 9, 2003)

We realized a depolarizer based on two 2×2 directional couplers and single mode optical fiber. A reduction method for the degree of polarization is demonstrated by using computer simulation, which is verified experimentally. The degree of polarization is -20 dB for the polarized input beam of spectral width less than 0.05 nm. The experimental results verify that the polarization noise, which is due to the change of the input polarization state, can be reduced by making the fiber-ring delay-line length greater than the coherence length of the source.

OCIS Codes : 060.2310, 260.5210, 230.5440.