

광섬유 내의 원편광 복굴절에 관한 연구

박해수*, 오상기, 은재정*
한국전기연구원, 창원대학교*

A study on the circular birefringence in optical fiber

Park Hae Soo, Oh Sang Ki, Eun Jae Jeong
KERI, CNU

Abstract - 선복굴절과 원복굴절을 갖는 광섬유의 원편광 복굴절 해석을 비틀림을 준 단일광섬유 및 이중광섬유에 대하여 Faraday 회전에 대한 변조깊이로 나타내었으며, 이중광섬유를 사용할 경우, 출력 편광을 조절할 수 있으며, 또한 이중광섬유를 사용함으로써 비틀림율이 낮을 경우에도 적절한 변조 깊이를 얻을 수 있다. 이때, 비틀림율은 12-20turns/m 정도였다.

1. 서 론

단일모드 광섬유는 광섬유 센서 시스템, 예를 들어, 전류 센서나 간섭 측정 장치뿐만 아니라 광통신 시스템 등에 광범위하게 사용되고 있다. 따라서, 단일모드 광섬유내의 편광 특성들을 이해하는 것은 여러 응용 시스템의 동작과 구조를 이해하는데 기초가 된다.

이상적인 단일모드 광섬유의 경우, 서로 수직 편광된 두 개의 전파모드들이 존재하고 이들 모드는 동일한 위상 속도로 전파된다. 하지만, 실제 광섬유는, 위와 같은 속회 모드들을 억제하며, 이는 밴딩이나 압력 또는 광섬유 제조 과정에서 그리고 코어의 타원율로 인한 스트레인으로 기인된다¹. 또한 이와 같은 효과로 인해, 광섬유내의 선복굴절 또는 위상 지연을 유발시킴으로써 광섬유내의 편광상태를 변화시킨다. 또한 자기광학 효과 즉, Faraday 효과로 인한 원복굴절 및 광섬유 내부의 선복굴절에 의한 편광상태의 변화도 연구되었다^{2,3}.

따라서, 본 논문에서는 단일 선복굴절 광섬유에 대하여 비틀림 및 Faraday 효과에 의해 발생하는 원복굴절에 대하여 연구하였다. 또한, 단일광섬유 대신 이중광섬유를 사용하여 원복굴절 및 선복굴절 효과를 시뮬레이션을 통해 살펴보았다.

2. 본 론

2.1 복굴절 파라미터

광섬유에 대한 기하학적 또는 매질 특성들에 대한 변화는 모드간의 파워 결합을 발생시킨다. 따라서, 변화를 겪는 광섬유의 전기장은 변화를 겪지 않는 모드들의 중첩으로 표현할 수 있고, 이는 파워 결합 방정식으로 설명할 수 있다. 이같은 광섬유의 기하학적 변화 및 매질 특성의 변화는 광섬유 밴딩이나 압력, 그리고 비틀림 및 Faraday 효과로 구분할 수 있다. 일반적으로, 광섬유 밴딩은 선복굴절을 유발하는데, 이는 광섬유 상에 스트레인을 유발시켜 코어의 굴절을 변화를 야기 시키며, 또한 광섬유의 밴딩 반경과도 관련 있다³.

비틀림은 광섬유 상에 광활성(g)이나 원복굴절을 유발하며, 이때, 광활성은 비틀림율(T)과 관련 있고, P₁₂는 광섬유를 구성하는 매질에 대한 스트레인 광학 텐서 중 영이 아닌 독립 요소들과 관계 있다. 따라서, 실리카 광섬유의 경우, n₀=1.46이고 (P₁₂-P₁₁)=0.15임으로, 광활성 g=n₀(P₁₂-P₁₁)/2에 의해 g=0.16이 된다. 따라서, 비틀림으로 유도된 원복굴절 δ=gT/2의 관계에 의해 0.8T가 된다^{1,3}.

또한, 빛이 전파되는 방향에 자기장을 인가하면, 광활성을 유발하고 이는 자기장의 방향과 강도에 따라 편광을 회전시키는 현상을 Faraday 효과라 한다. 이러한 Faraday 효과 또한 원복굴절을 유도한다.

2.2 선복굴절 및 원복굴절을 갖는 광섬유

일반적으로 자기광학 광섬유 전류센서에 응용되는 Faraday 효과는 외부 자기장이 매질 상에 선편광된 빛의 방향에 평행하게 인가될 때, 출력 광의 편광 방향이 회전하는 현상으로, 광섬유 매질 상에 원복굴절을 유발시킨다. 만약 내부 선복굴절을 갖는 광섬유에 자기장이 인가된다면, 두 개의 복굴절 효과는 중첩되어 다음과 같은 형태의 행렬식을 갖는다².

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}_{z=L} = \begin{bmatrix} \cos(\frac{\phi}{2}) + i\cos(\chi)\sin(\frac{\phi}{2}) & -\sin(\chi)\sin(\frac{\phi}{2}) \\ \sin(\chi)\sin(\frac{\phi}{2}) & \cos(\frac{\phi}{2}) - i\cos(\chi)\sin(\frac{\phi}{2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}_0 \quad (1)$$

여기서, (φ/2)² = (δ/2)² + F²이고 tanχ = F/(δ/2)이다.

자기광학 매질을 통과한 빛에 대하여 Faraday 회전(F)의 증가는 인가된 자기장의 진폭에 비례하고 이는 자기장의 크기를 증가시키거나 인가된 매질의 길이를 증가시킴으로서 가능하다. 하지만, 원복굴절과 선복굴절 둘 다 존재하는 매질의 경우, 선복굴절은 Faraday 효과를 갖는 광섬유의 길이를 제한하며, 편광상태를 변화시킨다. 따라서, 광섬유의 길이를 증가시키고 선복굴절로 인한 편광상태의 변화를 줄이기 위해, 비틀림으로 인한 큰 원복굴절이 광학 매질 내에서 필요하게 된다.

2.3 다중광섬유

광섬유 전류 센서의 경우, 센싱 헤더를 광원과 검출기로 연결시키는 입출력 리드가 요구된다. 하지만, 이러한 입출력 리드로 인한 편광 변화는 실제 Faraday 효과로 인한 편광 회전을 변화시켜 정확한 측정값을 얻을 수 없도록 하는 큰 문제점을 낳을 수 있다. 이러한 문제는 다중광섬유의 편광특성을 연구함으로써 해결할 수 있다. 서로 다른 n개의 광섬유들이 연속적으로 구성될 경우, 이들 광섬유의 출력 편광은 식(1)에 나타난 행렬식의 곱으로 표현될 수 있고 이때, 각각의 특성 파라미터는 다음으로 나타낼 수 있다.

$$\cos(x_n) = \frac{5\varepsilon_n^2 - 4\varepsilon_n\sqrt{\varepsilon_n^2 + 16\rho_n^2}}{5\varepsilon_n^2 + 32\rho_n^2 - 4\varepsilon_n\sqrt{\varepsilon_n^2 + 16\rho_n^2}} \quad (2)$$

$$\sin(x_n) = \frac{8\rho_n(5\varepsilon_n^2 + 16\rho_n^2 - 4\varepsilon_n\sqrt{\varepsilon_n^2 + 16\rho_n^2})}{(2\varepsilon_n - \sqrt{\varepsilon_n^2 + 16\rho_n^2})(5\varepsilon_n^2 + 32\rho_n^2 - 4\varepsilon_n\sqrt{\varepsilon_n^2 + 16\rho_n^2})} \quad (3)$$

$$\phi_n = (k_{+n} - k_{-n})L_n \quad (4)$$

$$k_{\pm n} = \frac{\omega^2\mu}{2} \{ \varepsilon_x + \varepsilon_y \pm \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + 4\gamma_n^2} \} \quad (5)$$

여기서, ρ_n = T_n + F_n, ε_n은 선복굴절, L_n은 광섬유 길이

그리고 $\gamma_n = \sqrt{\frac{\epsilon_n \mu_n^2}{\omega^2 \mu_n}}$ 이다. 또한 T_n 은 원복굴절이고 F_n 은 Faraday 회전률이다.

본 논문에서는 식(1)-(5)를 사용하여 이중광섬유의 편광특성을 Faraday 회전률에 대하여 시뮬레이션하였다. 이중광섬유는 길이 L_1 이 5m이고 선복굴절이 5rad/m인 고복굴절 광섬유(HB)와 원복굴절 및 Faraday 회전률이 고려된 길이 L_2 가 20m이고 선복굴절이 0.01rad/m 저복굴절 광섬유(LB)로 구성된다. 또한 광원은 632.8nm He-Ne 레이저를 고려하였다. 먼저, L_1 이 연결되지 않은 경우, 즉, 단일광섬유인 경우, 입력 광은 편광기에 의해 x 축에 대하여 45° 로 선편광되어 L_2 의 광섬유로 입사된다. 또한 출력 편광기는 x 축으로 정렬되어 있다. 이 경우, 시뮬레이션 결과는 그림 1에 \circ 로 나타낸 것으로 이때, 사용한 파라메타는 비틀림율=12turns/m이다. \square 로 나타낸 곡선은 L_1 의 고복굴절 광섬유를 결합시킨 이중광섬유를 이용한 결과로서 Faraday 회전의 변조깊이가 향상됨을 알 수 있다. 또한 실선에 나타낸 결과는 Faraday 회전의 변조깊이가 선복굴절에 의존함을 알 수 있다.

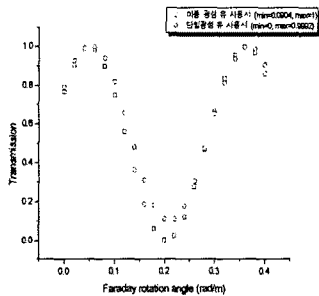


그림 1. 비틀림 율에 대한 단일광섬유 및 이중광섬유의 Faraday 변조 깊이 비교.

그림 2는 각각의 비틀림 율에 대한 Faraday 회전의 변조 깊이를 나타내었다. 이때, 사용한 파라메타는 그림 1의 이중광섬유에 대한 파라메타와 같다. 그림 2에서 보는 것처럼, 이중광섬유를 이용함으로써 비틀림 율이 낮은 경우에도 높은 변조 깊이를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 이때, 적정 비틀림 율은 약 12에서 20사이 정도임을 확인하였다.

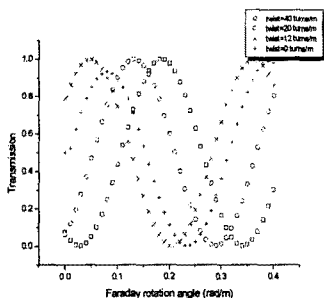


그림 2. 각각의 비틀림 율에 대한 이중광섬유의 Faraday 변조 깊이 비교.

그림 4는 그림 3의 시스템에서 보는 것처럼 이중광섬유의 두 번째 광섬유단에 인가된 전류에 대한 Faraday 회전의 변조 깊이를 나타낸 것이다. 이때, 솔레노이드에 흐르는 전류는 0-40A로 가정하여 시뮬레이션하였다.

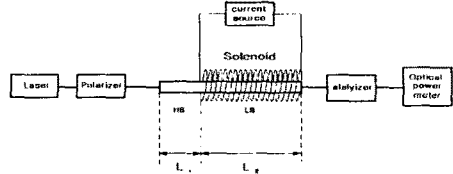


그림 3. Faraday 회전 해석에 사용된 시스템 블록도

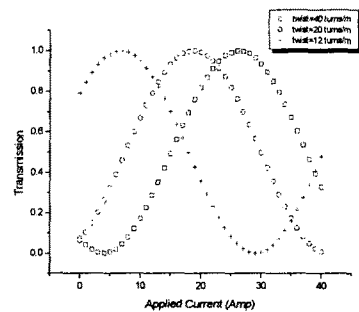


그림 4. 각각의 비틀림 율에 대한 인가전류 대 Faraday 회전의 변조 깊이

3. 결 론

본 논문에서는 선복굴절과 원복굴절을 동시에 갖는 광섬유에 대하여 원편광 복굴절의 해석을 비틀림을 준 단일광섬유 구조와 이중광섬유 구조를 통해 해석하였다. 이중광섬유를 이용한 경우의 Faraday 변조깊이가 단일광섬유 구조를 이용한 변조깊이에 비해 향상됨을 확인할 수 있었고, 또한 적정 비틀림 율은 대략 12turns/m에서 20turns/m임을 확인하였다.

{참 고 문 헌}

[1] R. Ulrich and A. Simon, "Polarization optics of single-mode fibers", Applied Optics, Vol. 18, No. 1 2241-2251, 1979.
 [2] W. J. Tabor and F. S. Chen, "Electromagnetic Propagation through Material Possessing Both F Rotation and Birefringence : Experiments with Ytt Orthoferrite", J. Applied Physics, Vol. 40, No. 2760-2765, 1969.
 [3] A. M. Smith, "Birefringence induced by bends and in single-mode optical fiber", Applied Optics, Vol. 1 15, pp. 2606-2611, 1980.