

# 구부러짐으로 발생한 편광 의존 손실에 의한 단일 모드 광섬유에서의 펄스의 수축

## Pulse Narrowing in Single Mode Fiber due to Bending-Induced Polarization Dependent Loss

이용욱, 윤일용, 이병호  
서울대학교 전기공학부  
byoungho@plaza.snu.ac.kr

단일 모드 광섬유로 구성된 광섬유 케이블은 실제 매설 작업이나 현장 설치 작업에서 빈번히 구부러질 수 있다. 이러한 기계적인 구부러짐은 광섬유의 복굴절과 손실을 변화시켜, 광섬유의 편광 모드 분산(PMD) 과 편광 의존 손실(PDL)에 영향을 줄 수 있다. 만약 광섬유 케이블이 외란에 의해서 구부러진다면, 구부러짐에 의한 스트레스에 의해 추가적인 PMD와 PDL이 발생될 수 있다. 결과적으로 이렇게 구부러짐에 의해 발생한 PMD와 PDL은 입력 펄스에 왜곡을 가져오게 되고, 이는 시스템의 성능저하를 가져오게 된다. 따라서 구부러짐으로 발생한 PMD와 PDL에 의해 왜곡되는 펄스에 대한 조사가 필요하게 된다. 본 논문에서는 25mm에서 50mm까지의 굴곡 반경에 대한 함수로 입력과 출력 펄스 폭의 차이를 계산하였다. 그리고, 출력 펄스의 왜곡 양상을 자세히 살펴볼 수 있도록, 일정한 굴곡 반경에서 굴곡된 평면(Bending curvature plane)과 기준 평면(이를 0°로 규정함)이 이루는 각도에 따라 정규화된 출력 펄스의 모양을 나타내었다.

계산을 위해 우선적으로 광섬유 케이블은 고유의 PMD (1차 근사값)와 PDL값을 두 개의 연결된 균일한 광섬유 영역으로 모델링하였다. 구부러짐으로 발생한 PMD와 PDL을 고려하기 위해서 이러한 기본적인 모델에서 가상적인 광섬유 영역을 두 연결된 광섬유 영역사이에 추가하였다. 따라서 시뮬레이션은 세 영역으로 이루어진 시스템을 고려하여 다음과 같은 전달 행렬을 이용하여 수행되었다.

$$T(w) = T_3(w) \cdot T_2(w) \cdot T_1(w) \quad (1)$$

단,  $T_n(w) = R(-\theta_n) \cdot U(\alpha_n, \beta_n) \cdot R(\theta_n)$ ,  $n=1, 2, 3$  이고,  $R(\theta)$ 은  $2 \times 2$  Jones 회전 행렬이며,  $U(\alpha_n, \beta_n)$ 는 PMD ( $\beta_n$ )와 PDL ( $\alpha_n$ )을 의미하는 유니타리 행렬이다. 그리고,  $T_2(w)$ 는 구부러짐으로 발생한 PMD ( $\beta_2$ )와 PDL ( $\alpha_2$ )을 고려한 시스템의 요소 전달 행렬이다.

구부러짐으로 발생하는 복굴절은 주로 스트레스 효과이며, 다음과 같은 식으로 주어진다 [1].

$$B = -0.25n^3(p_{11} - p_{12})(1 + \mu)(b/R)^2 \quad (2)$$

단,  $n$ 은 코어의 굴절률,  $p_{11}$ ,  $p_{12}$ 는 스트레인-광학 계수,  $\mu$ 는 실리카의 Poisson's ratio,  $b$ 는 광섬유 클래딩의 반지름 그리고,  $R$ 은 굴곡 반경이다. 이렇게 표현되는 구부러짐으로 발생한 복굴절에 의한 PMD는 다음과 같다 [2].

$$\beta_2 = (1/c)[B + k(dB/dk)] \approx [B/c] \quad (3)$$

단,  $k(= \lambda/2\pi)$ 는 자유공간에서의 진행상수이다.

그리고, 구부러짐으로 발생한 PDL은 참고문헌 3의 논의를 기본으로, 구부러짐으로 발생한 복굴절에 의해 각 축(fast 축과 slow 축)이 갖게 되는 새로운 굴절률을 구하고, 각 축에서 구부러짐으로 발생한 손실들 사이의 차이를 이용하여 구할 수 있다.

이제 선형 편광된 입력 가우시안 펄스를 가정하면, 출력 펄스는 다음과 같이 표현된다.

$$\Psi_{out}(w) = T(w) \cdot \Psi_{in}(w) \cdot \phi \quad (4)$$

단,  $\phi$ 는 입력 편광 상태이고,  $\phi^+ \cdot \phi = 1$ 이다. 그리고, 광섬유에서의 펄스의 평균적인 시간 지연은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\langle t \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \Psi_{out}^+(w) \cdot i \frac{\partial}{\partial w} \Psi_{out}(w) / \int_{-\infty}^{\infty} |\Psi_{out}(w)|^2 dw \quad (5)$$

단,  $\Psi_{out}(w)$ 은 출력 펄스의 푸리에 변환된 모습이다. 여기서 출력 펄스 폭과 입력 펄스 폭을 비교하기 위하여, 펄스 폭  $\sigma$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\sigma^2 = \langle t^2 \rangle - \langle t \rangle^2 \quad (6)$$

위와 같은 논의를 바탕으로 얻은 결과로서, 그림 1은 굴곡 반경에 따라서 입·출력 펄스 폭의 차이를 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 구부러짐에 의해 발생한 PMD는 그 값이 매우 미미한 것을 알 수 있지만, 특정한 굴곡 반경에서 펄스 폭이 줄어드는 것을 발견할 수 있다 (구부러짐이 없었을 경우의 펄스 폭의 차는 약 6.95ps). 이는 구부러짐에 의해 발생한 PDL이 두 개의 입력 주 편광 상태 (Principal State of Polarization) 들 중 한 성분의 영향으로 지연되는 펄스의 크기를 감쇄시켜, 전체적으로 볼 때 PMD의 영향으로 늘어나는 펄스 폭을 감소시키기 때문이다. 그림 2는 32mm의 굴곡 반경에서 굴곡 평면과 기준 평면이 이루는 각도에 따라 변하는 정규화된 출력 펄스의 모양을 나타내고 있다. 결과적으로 구부러짐으로 발생한 PDL은 특정한 굴곡 평면 각도에서 펄스 폭을 감소시키는 역할을 한다.

1. R. Ulrich, S. C. Rashleigh, and W. Eickhoff, "Bending-induced birefringence in single-mode fiber," Optics Letters, vol. 5, No. 6, pp. 273-275, 1980.
2. N. Shibata, M. Tsubokawa, and S. Seikai, "Polarization mode dispersion in a coil of single-mode fiber," Optics Letters, Vol. 10, No. 2, pp. 92-94, 1985.
3. Hagen Renner, "Bending losses of coated single-mode fibers: a simple approach," Journal of Lightwave Technology, Vol. 10, No. 5, pp. 544-551, 1992.

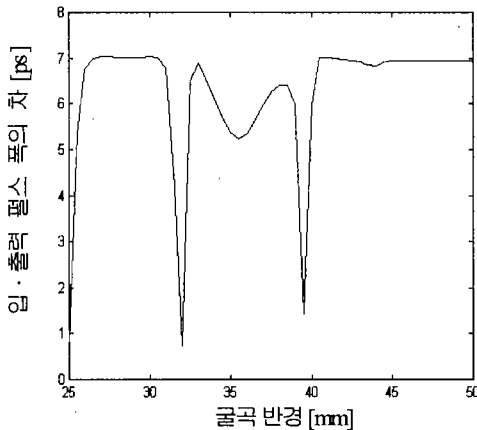


그림 1. 굴곡 반경에 따른 입·출력 펄스 폭의 차이

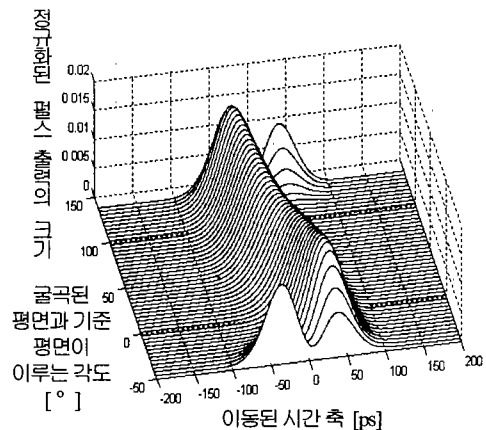


그림 2. 굴곡 반경이 32mm인 경우, 굴곡 평면과 기준평면이 이루는 각도의 함수로 나타낸 정규화된 출력의 모양

(시뮬레이션 상수 :  $n=1.447$ ,  $\Delta n=0.29\%$ ,  $\mu=0.17$ ,  $\lambda=1550\text{nm}$ ,  $a=4\mu\text{m}$ ,  $b=62.5\mu\text{m}$ ,  $p_{11}-p_{12}=-0.139$ ,  $\theta_1=\theta_3=0^\circ$ ,  $\alpha_1=\alpha_3=0.0576$ ,  $\beta_1=\beta_3=20\text{ps}$ ,  $\tau=25\text{ps}$ ,  $\phi=[\cos(\pi/4) \sin(\pi/4)]^t$ , 구부러진 광섬유의 길이=1m)