

PMD와 PDL에 미치는 chirp의 영향

윤일용, 이용욱, 이병호  
서울대학교 전기·컴퓨터 공학부

Effect of Chirp on Polarization Mode Dispersion and Polarization-Dependent Loss

Il Yong Yoon, Yong Wook Lee, Byoung-ho Lee  
School of Electrical Engineering & Computer Science, Seoul National University

**Abstract** - Numerical simulation for effect of chirp on PMD and PDL was accomplished. we assumed two uniform fiber concatenation with both polarization mode dispersion and polarization-dependent loss. We showed that polarization mode dispersion is increased with chirp parameter and polarization-dependent loss is decreased with chirp. And we accomplished mathematical analysis.

1. 서 론

편광 모드 분산(PMD)은 광전송 시스템의 전송속도가 증가함에 따라 매우 중요한 문제중의 하나로 부각되고 있다. PMD는 principal states of polarization (PSP's)라 불리는 두 편광 상태 사이에서 군속도 차이인 differential group delay(DGD)를 일으키며 이것은 광펄스의 폭을 퍼지게 한다. 한편 대부분의 광소자는 편광 의존 손실(PDL)을 PMD와 함께 가지고 있는데 만약 PDL이 광통신 시스템에 추가된다면 이것이 PMD와 서로 상호작용을 일으키며 더 복잡한 문제점들을 발생시키게 된다. 본 논문에서는 전송되는 광펄스의 칩이 PMD와 PDL에 미치는 영향을 고찰하고 그에 대한 수학적 분석을 수행하였다.

2. 본 론

2.1 이론

PMD와 PDL을 가진 광섬유는 2x2 존스 행렬로 모델링 할 수 있으며 이를 통과한 출력 펄스도 존스 행렬을 통해 구할 수 있다. 만약 광섬유가 N개의 균일한 광섬유로 구성되어 있다면 전체의 광섬유의 존스행렬은 각각의 균일 광섬유의 존스행렬을 곱해서 구해질 수 있다. 이러한 전체 시스템의 존스 행렬을  $T(\omega)$ 라고 하고  $\Psi_{in}(\omega)$ 를 입력 광펄스의 주파수 성분,  $\varphi$ 가 입력 편광 상태라고 하면 2차원 출력 존스 벡터는  $\Psi_{out}(\omega) = T(\omega) \cdot \Psi_{in}(\omega) \cdot \varphi$ 로 표시할 수 있다 [1]. 한편 출력 광세기기는 다음과 같이 나타낼 수 있으며

$$P_{out} = \int \Psi(\omega) \cdot \Psi_{out}^*(\omega) \cdot \Psi_{out}(\omega) d\omega$$

$$= \varphi^+ \cdot \int T^+(\omega) T(\omega) |\Psi_{in}(\omega)|^2 d\omega \cdot \varphi,$$

여기에서  $P_{out}$ 의 고유치를 통해 입력 편광상태에 따른 가장 높은 광세기와 가장 낮은 광세기를 알 수 있으므로 PDL을 구할 수 있다. 또한 펄스의 평균 시간 지연은

$$\langle t \rangle = \left( \int \Psi_{out}^+(t) \cdot t \cdot \Psi_{out}(t) dt \right) / P_{out} = (\varphi^+ P_1 \varphi) / P_{out}$$

로써 나타낼 수 있으며 여기서,

$$P_1 = i \cdot \int [ T^*(\omega) T'(\omega) |\Psi_{in}(\omega)|^2 + T'(\omega) T(\omega) \Psi_{in}(\omega) \Psi_{in}^*(\omega) ] d\omega \quad (1)$$

이고 따라서 실효 PMD는 입력 편광 상태에 따른 시간 지연의 최대 변동폭인  $\max(\langle t \rangle) - \min(\langle t \rangle)$ 로 나타낼 수 있다.

2.2 시뮬레이션 결과

시뮬레이션에서는 서로 연결된, 각각 PMD와 PDL 모두를 갖는 두개의 광섬유를 가정하였다. 입력 광펄스는 칩된 가우시안 펄스를 가정하였고 펄스폭은 100ps, 칩 파라미터값 C는 0, +1, +2, +3의 값을 사용하여 계산을 수행하였다. 두개의 광섬유를 연결하고 한 광섬유는 고정된 채로 다른 광섬유를 중심축에 대해 회전시켜 상대적인 각도를 변화시키면서 실효 PMD와 PDL을 계산해보았다. 앞으로 첫번째 광섬유 부분의 PMD와 PDL을  $PMD_1$ 과  $PDL_1$ 로 표시하고 두번째 광섬유 부분에 대해서도 같은 방법으로 표시하고자 한다. 그림 1.은 PMD의 칩에 대한 의존성을 보여주고 있다.

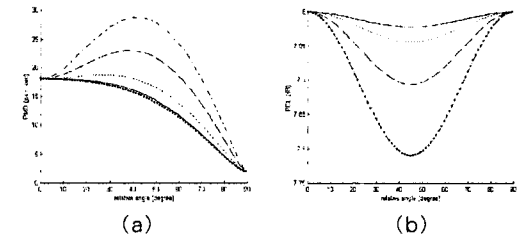


그림 1. (a) PMD에 대한 칩의 영향.  $PDL_1=0dB$ ,  $PDL_2=8dB$ , 실선 : 칩 파라미터=0, 100ps 펄스, 점선 : 칩 파라미터=1, 100ps 펄스, 파선 : 칩 파라미터=2, 100ps 펄스, 일점쇄선 : 칩 파라미터=3, 100ps 펄스, 굵은 점선 : 칩 파라미터=0, 100/√10 ps 펄스 (b) PDL에 대한 칩의 영향. 다른 조건은 (a)와 동일.

PMD는 칩이 증가함에 따라 증가하는 양상을 보인다. 이것은 펄스의 주파수 대역폭만을 고려할 때 기존의 이론적 결과에 반하는 결과라고 할 수 있다. 일반적으로 펄스의 대역폭이 증가하게 되면 펄스의 탈분극화가 커지게 되고 따라서 실효 PMD는 더 감소하게 되며 [1] 이는 그림 1.의 C=3인 칩된 펄스와 동일한 대역폭을 갖는 칩되지 않은 펄스의 경우에서도 볼 수 있다. 하지만 칩의 경우에 있어서는 단순히 칩에 의해 대역폭이 늘어난 효과만으로는 설명되지 않는다. (1)식에서  $P_1$ 의 적분안의 첫번째항  $i \cdot \int T^+(\omega) T'(\omega) |\Psi_{in}(\omega)|^2$ 에서는 입력 펄스 주파수의 절대값만을 취하므로 가우시안 펄스에 대해서 칩이 대역폭증가의 효과만을 나타내지만  $\langle t \rangle$ 에 기여하는  $P_1$ 의 적분안의 두번째 항

$$\begin{aligned} \varphi^+ \cdot \int T^+(\omega) T(\omega) \Psi_{in} \Psi_{in}^* d\omega \cdot \varphi \\ = i \cdot \int P_{out}(\varphi, \omega) \frac{\partial \ln \Psi}{\partial \omega} d\omega \end{aligned}$$

에 대해서는 입력 주파수 성분의 위상 미분 항이 적분에 중요한 영향을 미치게 되므로 주파수 성분의 위상항이 주파수의 함수인 점이 존재할 경우 무시할 수가 없게 된다.

그림 1. (b)는 칩의 PDL에 대한 효과를 보여 주고 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 마찬가지로 실효 PDL값은 칩에 의해 감소하는 경향을 보인다. 이것은 PSP의 주파수 의존성에 기반한 결과라고 할 수 있으며 [2], 칩되지 않은 짧은 펄스는 같은 대역폭을 갖는 칩펄스와 같은 모양의 PDL그래프를 나타낸다. 이는 출력 광세기를 나타내는  $P_{out}$  식에서  $\Psi_{in}(\omega)$ 의 절대값의 제곱만이 들어가기 때문에 칩의 영향이 무시되기 때문이다. 한편 이 경우에서처럼 PSP의 주파수 의존성이 커지게 된 것은 앞부분 광섬유와 뒷부분 광섬유의 PDL을 PSP의 주파수 의존성이 커지도록 조합하였기 때문이다. 즉 PDL<sub>2</sub>가 커질수록 주파수 의존성이 증가되는데 그 이유는 다음과 같다. Gisin 등에 의해서 주 상태 벡터  $\vec{Q}$ 의 변화 방정식이 유도된 바 있는데 [3], 이에 따라 지금 고려되고 있는 두개의 광섬유 연결에 대한 주 상태 벡터를 쉽게 구할 수 있으며 그림 2. 와 같이 도식으로도 알 수 있다.

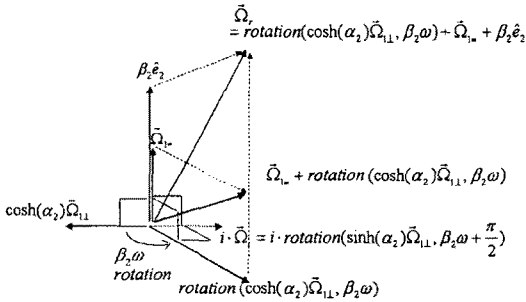


그림 2.  $\vec{Q}$  벡터의 합성 개략도.

PDL이 존재할때는 이 벡터가 복소수가 되는데  $\vec{\beta}_n$ 를 n번째 광섬유단의 Poincare sphere 에서의 PMD 벡터,  $\vec{\alpha}_n$ 를 n번째 광섬유단의 Poincare sphere 에서의 PDL 벡터라 하고  $b\vec{e}_n = i\vec{\beta}_n + \vec{\alpha}_n$  인 단위 벡터  $\vec{e}_n$ 를 생각하면 그림 2에서와 같이  $\vec{Q}$ 를 각 광섬유단의 PMD, PDL 벡터로부터 합성할 수 있다.  $\vec{Q}_1$ 의  $\vec{e}_2$  벡터에 대해 평행한 성분인  $\vec{Q}_{11}$ 는 그대로 있지만 PDL이 존재하지 않는 경우와는 달리  $\vec{Q}_1$ 의  $\vec{e}_2$  벡터에 대해 수직인 성분  $\vec{Q}_{1\perp}$ 에  $\cosh(\alpha_2)$ 의 가중치가 주어진다.  $\vec{e}_2$ 에 수직인 평면에서  $\beta_2\omega$  만큼 회전이 되므로 주파수에 의해 회전하는 반경이 커지게 되어서  $\vec{Q}$ 의 주파수 의존성이 커지게 된다. 한편  $\vec{Q}_{1\perp}$ 에 수직인 허수 성분이  $\vec{e}_2$ 에 대해 수직인 평면에서  $\sinh(a)$ 의 가중치가 주어져 생성되게 된다. 이러한  $\vec{Q}$ 의 합성 방식에서 알 수 있듯이 PDL<sub>2</sub>가 증가 되면  $\vec{Q}$ 의 주파수 의존성이 증가되며 PMD<sub>1</sub>이 증가되면 주파수 의존성이 감소된다. 한편 PDL이 존재할때  $T T^{-1}$ 의 고유치인  $\chi = \delta r + i\eta$ 가 복소수가 되며 실수부분은 DGD, 허수 부분은 PSP에서

의 손실의 주파수 의존성을 나타내게 되는데 고려되고 있는 광섬유 연결에 대해서는  $\vec{e}_2$ ,  $\vec{Q}_{1\perp}$ , 생성된 허수 성분들이 각각 서로 직교하기 때문에  $i\eta$ 가 0이 되고  $\delta r$ 는 PDL이 존재하지 않을때와 동일하며 PSP를 구할 때 필요한 정규 주 상태 벡터  $\vec{W} = \frac{\vec{Q}}{\chi}$ 가  $\vec{Q}$  벡터와

방향이 같게 되므로  $\vec{Q}$ 의 주파수 의존성은  $\vec{W}$ 의 주파수 의존성을 나타낸다. 한편  $i\eta$ 는 0이지만 PSP가 주파수에 의해 달라지므로 광신호의 손실도 주파수에 따라 달라진다.

광섬유단의 PDL 조합에 의해 PSP의 주파수 의존성이 달라진다는 것을 검증해 보기 위하여 다른 PDL 조합으로 시뮬레이션을 수행하였다. 즉 전체 PDL은 8dB로 고정시키고 PDL<sub>1</sub>=8dB, PDL<sub>2</sub>=0dB로 놓고 계산해본 결과는 그림 3.과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 PMD와 PDL 모두 칩의 영향을 별로 받지 않는다는 것을 볼 수 있고 이는 사용된 조합이 PSP의 주파수 의존성에 큰 영향을 미치는 PDL<sub>2</sub>를 0으로 놓았기 때문이다.

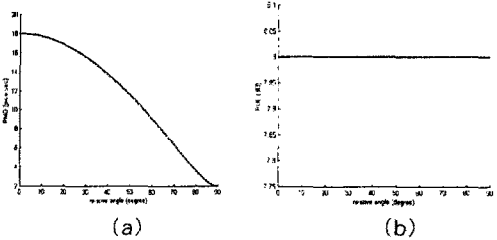


그림 3. (a) PMD에 대한 칩의 영향. PDL<sub>1</sub>=8dB, PDL<sub>2</sub>=0dB, 실선 : 칩 파라미터=0, 100ps 펄스, 점선 : 칩 파라미터=1, 100ps 펄스, 파선 : 칩 파라미터=2, 100ps 펄스, 일점쇄선 : 칩 파라미터=3, 100ps 펄스, 굵은 점선 : 칩 파라미터=0, 100/√10 ps 펄스 (b) PDL에 대한 칩의 영향. 다른 조건은 (a)와 동일.

### 3. 결 론

시뮬레이션을 통해 칩이 부가된 펄스에 대한 두개의 광섬유 연결시스템의 PMD와 PDL특성에 대하여 분석하였다. PMD는 칩 파라미터에 의해 증가하고 PDL은 감소하는 경향을 보였으며 PDL이 PSP의 주파수 의존성을 높이는 이유를 수학적인 분석을 통해 고찰하였다. 광섬유 연결단에 대해서 PDL 조합에 따라 PSP의 주파수 의존성이 달라진다는 것을 알게 되었으며 시뮬레이션을 통해 이를 검증하였다.

### 4. 감사의 글

본 연구는 정보통신부 선도기반기술사업의 지원에 의해 수행되었습니다.

### (참 고 문 헌)

- [1] Ping Lu et al., *J. of Lightwave Technol.*, vol. 19, no. 6, pp. 856-860, 2001.
- [2] B. Huttner et al., *Optics Lett.*, vol. 22, no. 8, pp. 504-506, 1997.
- [3] N. Gisin et al., *Optics Commun.*, vol. 142, pp. 119-125, 1997.