

광통신 시스템에서 PDL로 인한 PMD 보상 수준 한계에 대한 연구

김나영 · 이덕기 · 윤호성 · 박남규[†]

서울대학교 전기·컴퓨터공학부

Ⓣ 151-742 서울시 관악구 신림동 산56-1

(2000년 12월 21일 받음, 2001년 2월 7일 수정본 받음)

본 논문에서는 10 Gb/s의 광전송 시스템에서 편광모드별 광손실(PDL)이 개입되었을 때, 전송 시스템이 받는 영향과 편광 모드 분산에 대한 보상회로의 실효성이 어떻게 감소되는지를 컴퓨터 모의 실험을 통해 분석하였다. 그 결과 편광모드별 광손실의 양이 늘어남에 따라서 시스템의 성능은 비례하여 감소되는 형태를 보였으며, 편광모드 분산에 대한 보상회로의 성능 또한 감소되었다. 이는 모드별 광손실의 효과가 포함되었을 때에는 단순한 속도 차이 외에 펄스의 모양이 그대로 유지되는 축인 PSP의 직교성이 상실되기 때문에 펄스의 속도 차이에 왜곡이 더해져서 보상이 어렵기 때문이다. 따라서 PDL 소자가 다수 포함되는 장거리 광대역 광전송 시스템에서의 편광모드 분산에 대한 보상회로 설계 시에 이에 대한 속도가 필요함을 알 수 있었다.

Keyword : OC.010.

I. 서 론

광증폭기의 등장으로 광통신 시스템에서의 전송 거리가 수백 km까지 확장되고 전송 용량이 40 Gb/s 이상에 달하게 되면서, 편광모드 분산(polarization mode dispersion: PMD)에 의한 시스템의 성능 저하에 대한 연구가 새로운 국면을 맞이하게 되었다. 확률적으로 변화하는 특성을 가진 편광모드 분산에 의한 효과를 보상하기 위해서 많은 방법이 제안되었는데, 편광 제어기(polarization controller)를 이용하여 두 모드의 광파를 분리시켜서 서로 다른 지연을 적용함으로써 속도 차이를 보상하거나,^[6] 광섬유에 브래그 격자(Bragg grating)를 새기는 방법,^[7] 전기 신호로 전환시킨 후 보상하는 방법 등이 있었다. 그런데 시간 차이만을 주어서 편광모드 분산을 해결하는 방법에는 한계가 있는데, 편광모드 분산이 주파수에 따라 다르게 작용하기 때문이다.^[4,5] 따라서, 이러한 고차 편광모드 분산을 해결하려는 노력 또한 최근 들어 집중적으로 연구, 발표되고 있다.^[6,7]

이와 더불어 편광모드별 손실(polarization dependent loss: PDL)이 편광모드 분산과 결합하여 발생하는 문제점 또한 고차 편광모드 분산에 의한 효과와 비슷한 형태로 시스템의 성능을 저하시킨다. 광전송 네트워크 내에 필요한 광증폭기, 파장 다중 분할기, 광교환기, 광배분기, 광절연기, circulator 등의 소자들은 편광모드별로 손실이 서로 다르며, 광신호가 이 소자들을 거치면서 편광모드 별로 다른 정도로 감쇄되면서 광섬유 내의 편광모드 분산에 의해 왜곡되는 효과가 더해지고 서로 영향을 끼치는 것이다.^[11]

본 논문에서는 편광모드 분산이 광섬유 내에서 일어나는 원인과 이를 컴퓨터 시뮬레이션으로 구성하기 위해 모델링하는

방법에 대해 설명한 후, 10 Gb/s의 광전송 링크에서 편광모드별 손실에 의해 편광모드 분산이 받는 영향과 이를 보상하는 방법의 실효성에 대해 알아보았다.

II. 이론적 배경

광섬유 내에서 발생하는 편광 효과를 기술하기 위해서 일반적으로 사용되는 방법은 존스 행렬(Jones matrix)을 전달 함수로 사용하여 빛의 입력과 출력 사이의 관계를 명시하는 것이다.^[2,3] 이러한 관계식은 광섬유 내에서 편광모드 분산으로 인한 시간 변이가 가간섭성 시간(coherence time)에 비해 짧다는 가정 하에서 성립한다. 존스 행렬의 일반적 형태를 식 (1)에서 나타내었다. $\alpha(\omega)$ 와 $u_1(\omega)$, $u_2(\omega)$ 는 모두 복소수이며 $|u_1|^2 + |u_2|^2 = 1$ 의 관계가 성립된다. 광섬유로 들어가는 빛을 $E_1(\omega)$, 광섬유를 통과하여 나오는 빛을 $E_2(\omega)$ 라고 한다면 두 빛은 편광 상태에 따라서 두 모드의 중첩으로 표현되므로 2차원 복소수 벡터가 되고, 이들 사이의 관계는 식 (2)와 같다.

$$T(\omega) = e^{\alpha(\omega)} \begin{bmatrix} u_1(\omega) & u_2(\omega) \\ -u_2^*(\omega) & u_1^*(\omega) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$E_2(\omega) = T(\omega)E_1(\omega) \quad (2)$$

일반적으로 $T(\omega)$ 는 Hermitian이 되고 따라서 고유벡터 값을 가지게 되는데, 이는 특정한 편광 상태의 빛이 입사되면 출력 단에서 주파수의 선형적인 변화에 대해서는 편광 상태가 변하지 않고 그대로 나오게 됨을 의미한다. 그리고 이러한 상태를 principle states of polarization(PSP)이라고 한다. PSP는 각각 빛이 가장 빠르게 진행하는 모드(fast mode)와 가장 느린 모드(slow mode)를 나타낸다. principle state는 서로 수직이므로 모든 빛의 편광 상태는 이 두 모드의 중첩으로 표현

[†]E-mail: nkpark@plaza.snu.ac.kr

될 수 있다.

광통신 시스템에서 일어나는 편광모드분산 효과를 살펴보기 위해서는 두 개의 직교하는 빛의 파동이 광섬유 내에서 진행하며 일으키는 상호작용을 함께 계산해야 한다. 즉, 광섬유 내에서 진행하는 빛을 두 PSP의 상태로 표기하여 이 두 요소로 이루어진 2차원 벡터에 관한 식인 Manakov-PMD equation을 풀어야 한다. 식 (3)과 (4)는 Manakov-PMD equation을 나타낸 것이다.

$$i\frac{\partial A}{\partial z} + b\Sigma A + ib\Sigma\frac{\partial A}{\partial t} - \frac{1}{2}\beta''\frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + n_2k_0\left[\frac{5}{6}|A|^2A + \frac{1}{6}(A + \sigma_3 A) + \frac{1}{3}B\right] = 0 \quad (3)$$

또는

$$i\frac{\partial A}{\partial z} + b\Sigma A + ib\Sigma\frac{\partial A}{\partial t} - \frac{1}{2}\beta''\frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + n_2k_0\left[|A|^2A - \frac{1}{3}(A + \sigma_2 A)\sigma_2 A\right] = 0 \quad (4)$$

이 식에는 비선형성과 색분산을 나타내는 값이 포함되며, 일반적인 선형 편광모드 분산에 해당하는 값과, 두 PSP축에 대해서 서로 다른 비선형 효과가 적용되고 있음을 나타내는 비선형 편광모드 분산의 성분이 명시되어 있다. 빛의 진행 상수는 서로 직각인 두 방향으로, β_1 과 β_2 의 방향으로 편광되어 있음을 나타낸다. 이 두 진행 상수의 차이가 복굴절 변수인 $b = (\beta_1 - \beta_2)/2$ 이다. 그리고 단위 길이당 group delay의 차이는 $b' = (\beta'_1 - \beta'_2)/2$ 로 프라임은 각주파수에 대해서 미분한 값을 알려준다. b 는 birefringence의 차이를 나타내며, b' 은 그 차이를 각주파수에 대해서 미분한 값이다. $A = (A_1, A_2)'$ 로 각각의 두 편광 성분의 complex envelope를 나타내는 성분 A_1, A_2 로 이루어진 열벡터이다. 그리고 벡터 B 는 $(A_1^* A_2^2, A_2^* A_1^2)'$ 로 정의된다. 여기서 *표시는 complex conjugation을 나타내며, 광섬유의 진행 방향은 z 축으로 삼고, 광신호의 중심이 시간에 따라 움직이는 진행 시간을 t 축으로 삼아서 표현하였다. 그리고 행렬

$$\Sigma = \sigma_3 \cos(2\alpha) + \sigma_1 \sin(2\alpha) \quad (5)$$

이며 파울리의 행렬은 정의대로 다음 식과 같이 표현된다.

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \sigma_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \\ \sigma_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

는 잘게 쪼개진 광섬유의 조각들이 만나서 두 광파가 random 하게 coupling이 일어나는 각도인 randomly rotation angle 이다.^[1]

Manakov-PMD equation을 predictor-corrector method를 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 하기 위해서 앞의 식의 linear part만을 Fourier Transform하여 풀면,

$$\tilde{A}(z + \Delta z, \omega) = \exp\left[\frac{i}{2}\beta''\omega^2\Delta z\right]M(\omega)\tilde{A}(z, \omega) \quad (7)$$

$$i\frac{\partial M}{\partial z} + (b + b'\omega)\Sigma M = 0 \quad (8)$$

이 된다. 이 때 $M(\omega)$ 은 $M(z=0, \omega)=I$ 의 초기 조건을 만족하여야 하며, $M(\omega)$ 이 광섬유의 복굴절 값이 확률적으로 변화하는 특성을 나타내는 식으로써 이를 풀기 위해서는 각 구간 ΔZ 를 더 작은 구간인 δz 로 나누어 풀어야 한다. 푸는 과정은 아래의 식 (9)~(12)에 나타나 있다.

$$m_j(\omega) = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$m_{11} = m_{22}^* = \cos[(b + b'\omega)\delta z] + i\cos(2\alpha_j)\sin[(b + b'\omega)\delta z] \quad (10)$$

$$m_{12} = m_{21}^* = i\sin(2\alpha_j)\sin[(b + b'\omega)\delta z] \quad (11)$$

$$M(\omega) = \prod_{j=0}^N m_j(\omega) \quad (12)$$

전달함수 $M(\omega)$ 에는 빛의 편광 상태가 poincaré 구 위에서 중심 주파수 성분의 위치를 기준으로 하여 매우 빠르게 움직이는 현상이 나타나 있다.

본 논문에서 Manakov-PMD equation을 풀기 위해 사용한 변수들의 값은 다음과 같다.

- $L_{corr} = 100$ m : correlation length
- $\Lambda_{beat} = 50$ m : beat length
- $D_{PMD} = 3$ ps/(km)^{1/2} : polarization mode dispersion coefficient
- $\delta z = \Lambda_{beat}/30 = 1.67$ m : subinterval length unit

그리고 b, b' 은 다음 식과 같이 정해진다.

$$b = \frac{\pi}{\Lambda_{beat}}, \quad b' = \frac{D_{PMD}}{2(2L_{corr})^{1/2}}, \quad \langle(\Delta\alpha)^2\rangle^{1/2} = \left(\frac{\delta z}{2L_{corr}}\right)^{1/2} \quad (13)$$

$\langle(\Delta\alpha)^2\rangle^{1/2}$ 는 α 값의 변화의 표준편차를 나타낸다.

그런데, Manakov-PMD equation에서 비선형 편광모드 분산은 현재의 광통신 시스템에서 무시할 만한 정도라고 할 수 있다. 비선형 편광모드 분산의 물리적 의미는 각 편광 상태에서 비선형 효과(Kerr effect)의 세기를 빠르게 변동시키는 값을 말한다. 이 변화의 정도는 복굴절에 의해 정해지는 것이 아니라 비선형 효과의 값에 의해 정해진다. 그런데 이러한 변화가 너무나 빠르게 진행되기 때문에 전체적인 변화의 알짜합은 거의 0에 가깝다. 따라서 Poincaré 구 상에서 편광 상태의 혼합이 너무 천천히 일어나지 않는다는 보장 하에서는 이러한 효과를 무시할 수 있다.

이러한 가정이 성립하지 않는 경우는 L_{corr} 이 비선형 특성과 색분산 특성이 발생하는 단위 길이에 필적할 만하게 길거나, Λ_{beat} 에 비해서 너무 짧을 때이다. 보통은 L_{corr} 의 길이가 비트 길이보다는 훨씬 길고 비선형 특성이나 색분산 특성의 단위 길이보다 짧으므로 비선형 편광모드 분산의 효과는 무시할 수가 있게 된다. 이 경우, Poincaré 구 상에서 혼합되는 편광 상태를 한꺼번에 더해준다면, 시뮬레이션의 스텝 길이를 δz 단위가 아니라 원래의 dz 단위로 증가시킬 수 있게 되므로 시뮬레이션의 속도가 빨라지게 된다. 이러한 방법을 coarse-step method라고 한다.^[1] Coarse-step 방법을 이용하려면, 비선형

편광모드 분산의 효과를 식에서 분리시켜야 하는데, 이를 위해서 2차원 벡터로 표현되는 빛을 각 광섬유 조각의 복굴절 축에 맞춰서 회전 변환시켜 Ψ 을 구하고 이를 식 (4)에 대입하여 식 (15)를 얻는다.

$$\Psi = \begin{pmatrix} U \\ V \end{pmatrix} = R^{-1}A = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} A \quad (14)$$

$$i \frac{\partial \Psi}{\partial z} + \tilde{\Sigma} \Psi + ib' \sigma_3 \frac{\partial \Psi}{\partial t} - \frac{1}{2} \beta'' \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} + n_2 k_0 \left[\frac{5}{6} |\Psi|^2 \Psi + \frac{1}{6} (\Psi^\dagger \sigma_3 \Psi) \sigma_3 \Psi + \frac{1}{3} N \right] = 0 \quad (15)$$

$$\tilde{\Sigma} = \begin{pmatrix} b & -i\alpha_z \\ i\alpha_z & -b \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$\alpha_z = \frac{d\alpha}{dz} \quad (17)$$

이 때 복굴절의 축이 고정되어 있다면, $\tilde{\Sigma} = 0$ 이라 생각할 수 있고 N 은 매우 빠르게 Poincaré 구 상에서 변화하는 값인 비선형 편광모드 분산에 해당하는 값으로 0이라 생각한다. 그리고 이를 다시, $\Psi = \exp(-i\sigma_3 z) \Psi$ 으로 변환한 후에 프라임 표시를 제거하고 다시 정리하면, 식 (15)는 다음의 식 (18)과 같이 간단하게 정리될 수 있다.

$$i \frac{\partial \Psi}{\partial z} + ib' \sigma_3 \frac{\partial \Psi}{\partial t} - \frac{1}{2} \beta'' \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} + n_2 k_0 \left[\frac{5}{6} |\Psi|^2 \Psi + \frac{1}{6} (\Psi^\dagger \sigma_3 \Psi) \sigma_3 \Psi \right] = 0 \quad (18)$$

이 식을 풀면, 편광모드 분산 변화의 정도가 다른 요소의 변화 정도에 비해 작기 때문에 발생하는 시뮬레이션의 시간을 줄일 수 있게 되는데 시뮬레이션의 단위 길이가 100 m~1 km 정도로 증가할 수 있게 된다.

Poincaré 구 상에서 E-field가 scattering 되는 효과를 주기 위해서 색분산과 비선형 효과를 포함시켜 광파를 진행시킨 후 각 스텝의 마지막 부분에서, $\Psi' = S\Psi$ 로 S행렬을 곱해줌으로써 더해준다. 행렬 S는 두 가지 방법으로 표현 가능하다.

$$S = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \exp(i\phi) \\ -\sin \alpha \exp(i\phi) & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (19)$$

$$S = \begin{pmatrix} \cos \alpha \exp(i\phi) & \sin \alpha \exp(i\phi) \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (20)$$

(19)의 경우는 $\cos 2\alpha$ 와 ϕ 가 uniform distribution에서 random하게 선택되는 특성을 가지고 있으며, (20)의 경우는 α 와 ϕ 가 uniform distribution에서 random하게 선택되는 특성을 가지고 있다. 최종적으로 다음 식을 통해서 N개의 광섬유 조각을 통과하여 나온 광파를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \tilde{\Psi}(z=N\Delta, \omega) &= \prod_{n=1}^N (S_n S_\omega) \tilde{\Psi}(z=0, \omega) \\ &= S_n S_\omega S_{n-1} S_\omega S_{n-2} S_\omega \dots S_1 S_\omega \tilde{\Psi}(z=0, \omega) \end{aligned} \quad (21)$$

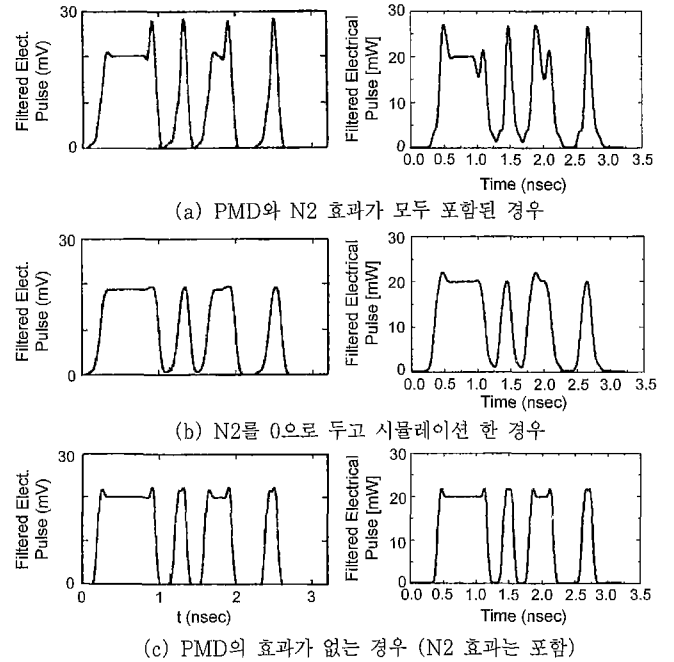


그림 1. CNLS 방정식을 컴퓨터 시뮬레이션 한 결과의 비교.

이 때, $\tilde{\Psi}(z, \omega)$ 는 $\Psi(z, t)$ 의 Fourier Transform이다. S_n 은 각 광섬유 조각에서의 scattering matrix이고 S_ω 는 DGD를 주는 효과로 식 (22)와 같다.

$$S_\omega = \exp(ib' \sigma_3 \omega \Delta) = \begin{pmatrix} \exp(ib' \omega \Delta) & 0 \\ 0 & \exp(-ib' \omega \Delta) \end{pmatrix} \quad (22)$$

이 방법을 구현하여 얻은 결과와 기존의 논문의 결과를 비교한 것을 그림 1에 나타내었다.

그림 1에서 왼쪽의 그림들은 [1]에 기재된 그림이고 오른쪽의 그림들은 새로 시뮬레이션 한 결과로 시뮬레이션이 기존의 결과와 잘 맞는 것을 보여준다. (a)는 비선형 효과와 편광모드 분산 효과가 함께 포함된 경우이고, (b)의 경우는 비선형 효과를 0으로 두었을 때, (c)의 경우는 비선형 효과는 포함시키고 편광모드 분산의 효과는 없다고 가정한 결과이다. (a)와 (b)에 포함된 편광모드 분산 효과는 확률적으로 변화하므로 난수 발생의 상황에 따라 다른 그래프를 얻게 된다. 그래프에서 rising edge나 trailing edge의 모양이 약간 다를 수도 있는데, 확률적 특성 때문이다.

III. 시뮬레이션 결과

일반적으로 단일 모드 광섬유의 광손실은 광섬유 내에서 존재하는 두 모드에 상관없이 동일하다. 그러나 광소자 내에 아주 작은 비등방성(anisotropy)이 있게 되면 전송 계수는 입력 편광 상태에 따라서 다르게 적용될 수 있다. 커플러나 광절연체(optical isolator), 필터, 다중화기 등의 소자는 편광 상태에 따라서 전송 계수가 달라지는 효과인 polarization dependent loss(PDL)가 있다.^[9] 전체 시스템의 PDL은 링크 내에 포함된

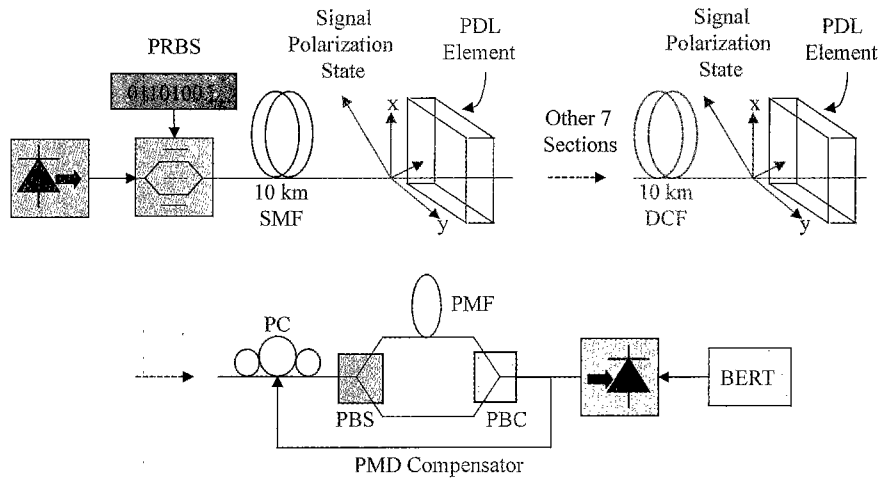


그림 2. PDL 소자가 포함된 전송 시스템 모델.

PDL 소자들의 효과가 합쳐져서 나타나는데, 이 효과는 시간과 주파수에 따라서 변화하는 값으로 랜덤한 특성을 가지고 있다. 또한 전체 링크 PDL은 각 소자들의 PDL의 단순합이 아니라 각 소자들이 어떻게 배치되어 있는가에 따라서 달라지며, 광섬유에 편광모드 분산이 있는 경우에 편광 상태의 확률적 특성에 따라서도 변화하므로 그 정도를 미리 가늠하기가 어려운 면이 있다.

PDL의 축은 빛이 그 축과 평행하게 입사하였을 때 가장 광손실이 작은 축으로 정의된다. T_{max} 과 T_{min} 을 각각 최대 전달 계수와 최소 전달 계수라고 정의했을 때 PDL의 값은 dB 단위로 식 (23)과 같이 정의된다.

$$PDL = 10 \log_{10} \left(\frac{T_{max}}{T_{min}} \right) \quad (23)$$

PDL의 단위를 위와 같이 정의하였을 때, 2×2 광섬유 커플러의 PDL은 0.3 dB 정도이고 가변파장 대역통과 필터의 PDL의 값은 0.2~0.4 dB 정도라고 한다.^[9] 압력이나 온도 변화와 같은 국지적인 변화에 대해 이러한 광손실의 변화는 약 0.1 dB 정도 커지거나 작아질 수 있다. 따라서 PDL의 값을 확률적으로 변화한다고 생각하고 시뮬레이션 하는 것이 중요하다.

그림 2는 논문에서 사용한 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 보여주고 있다. 확률적 특성을 관찰하기 위해서 몬테-카를로 (Monte-Carlo) 시뮬레이션 방법을 이용하였다. 광섬유에는 PDL 값이 없고 편광모드 분산 효과만 있으며 10 km 마다 있는 링크 내의 소자에만 PDL이 있다고 가정하였다. 총 전송 거리는 80 km로 편광모드 분산 효과를 확인하기에는 다소 짧은 거리인데, 몬테-카를로 방식에 의한 결과 도출에 걸리는 시간을 줄이기 위해서 광섬유 내의 편광모드 분산 값을 다소 크게 책정한 후 거리를 줄이는 방식을 택하였다. 그리고 EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier)의 ASE와 결합하는 효과를 고려하지 않기 위해서 시스템 내에 EDFA를 포함시키지 않았는데, 이 또한 링크의 길이를 줄여줄게 하였다. 편광모드 분산과 PDL의 관계만을 도출해내기 위해 끝단에 dispersion

compensation fiber (DCF)를 연결하여 색분산(chromatic dispersion)의 효과는 시스템의 성능에 영향을 미치지 않도록 해 주었다.

사용한 소자의 변수들은 다음과 같다.

- Laser Power : 6 mW
- Bit Rate : 10 Gb/s
- Fiber Length : SMF 70 km, DCF 10 km
- Fiber Effective Area : SMF 80 μm^2 , DCF 25 μm^2
- Fiber Dispersion : SMF 17 ps/km·nm, DCF-120 ps/km·nm
- Kerr Nonlinearity Coefficient :
SMF 2.36×10^{-20} , DCF 2.6×10^{-20}

시뮬레이션에서는 편광모드 분산 보상을 위해서는 1차 및 2차 보상을 사용하였다. 시스템의 DGD는 각주파수에 대한 1차 함수라고 가정하였다. 식 (24)에서처럼, DGD는 각주파수와 무관한 τ_0 와 중심 주파수와 차이만큼($\omega - \omega_0$)에 비례하는 1차 계수가 있다고 생각했다.^[7]

$$\tau(\omega) = \tau_0 + \tau_1(\omega - \omega_0) \quad (24)$$

τ_0 는 간섭에 의한 방법(interferometric method)을 이용하여 각 편광 모드의 빛의 상관 관계(correlation)가 최대가 되는 time delay로 측정하였다.^[10] τ_1 은 앞에서 구한 τ_0 만큼의 DGD를 보상에 준 다음, BER을 측정하면서 BER을 최소로 만들어주는 τ_1 의 값을 능동적으로 찾아가도록 구성하였다.

이러한 시스템 구성을 통한 시뮬레이션 결과가 그림 3과 4에 나타나 있다.

그림 3은 비트 지속 기간(bit duration) 대 DGD가 각각 0, 0.13, 0.24, 0.35, 0.44인 다섯 가지 경우에 대해, 전체 링크 내의 PDL이 0.7 dB까지 늘어남에 따라서 BER이 어떻게 나빠지는지를 보여준다. 이 때 링크 PDL은 PDL 축의 각도가 확률적으로 변화한다는 가정 하에 평균적으로 가질 수 있는 값으로 생각하였다. 그래프에서 안이 비어있는 기호는 편광모드 분산을 하지 않은 경우이고, 안이 칠해져 있는 기호는 편광모드 분산을 하여 시스템의 성능이 향상된 그래프를 나타낸

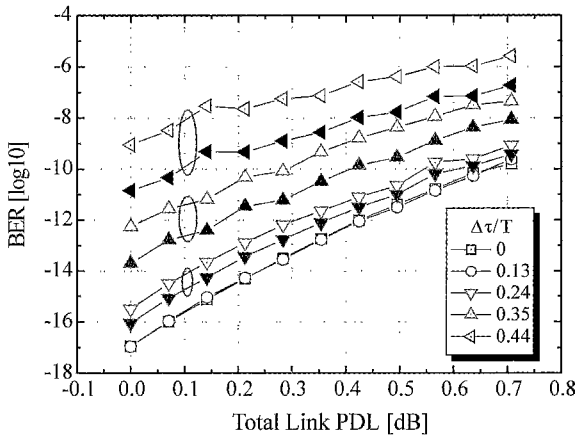


그림 3. 링크 내 PDL에 따른 BER.

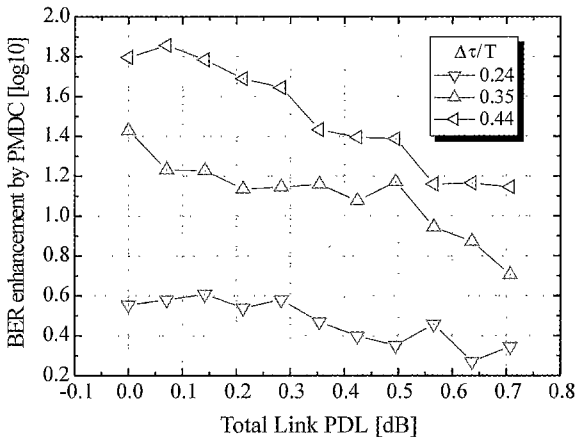


그림 4. 링크 내 PDL에 따른 PMD 보상 능력의 차이.

다. DGD가 한 비트 지속기간에 대해 0.1인 경우는 시스템에 거의 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 그리고 DGD가 점차로 늘어남에 따라서 BER이 나빠지며 편광모드 분산을 통해서 향상되는 BER의 정도도 같이 증가하는 것을 시뮬레이션을 통해서 확인할 수 있었다. 특히, 시스템 성능의 임계점을 10^{-12} BER이라고 생각한다면, PDL이 없는 경우에는 $\Delta\tau/T$ 가 0.35 이상이 되면 문제가 생기며, PDL이 0.3 dB 정도만 있으면, 허용 가능한 $\Delta\tau/T$ 가 0.24 정도로 줄어들음을 알 수 있다.

그림 4는 링크 PDL이 증가함에 따라서 편광모드 분산에 대한 보상을 통해서 획득할 수 있는 BER의 개선이 어떻게 감소하는지를 자세히 나타낸 그림이다. 그림에서 확인할 수 있듯이, $\Delta\tau/T$ 가 0.24 정도 되는 경우는 링크 내 PDL이 증가하는 정도에 비해서 편광모드 분산 보상에 의해서 BER의 개선이 감소되는 정도가 있기는 하지만 미약하다고 할 수 있겠다. 대체로 $10^{0.6}$ 에서 $10^{0.2}$ 정도로 BER의 개선 능력이 감소하였다. 반면에 $\Delta\tau/T$ 가 0.35, 0.44 정도인 경우는 편광모드 분산의 보상을 통해서 얻을 수 있는 BER 개선의 정도가 눈에 띄게 감소한다는 사실을 알 수 있다. $\Delta\tau/T$ 가 0.35인 경우는 $10^{1.4}$ 에서 $10^{0.5}$ 정도로 PMD 보상에 의해서 줄어드는 BER의 정도가 감소하였고, $\Delta\tau/T$ 가 0.44인 경우는 $10^{1.8}$ 에서 $10^{1.1}$ 정도로 감소하였다. 이러한 결과는 광전송 시스템 내에 포함되

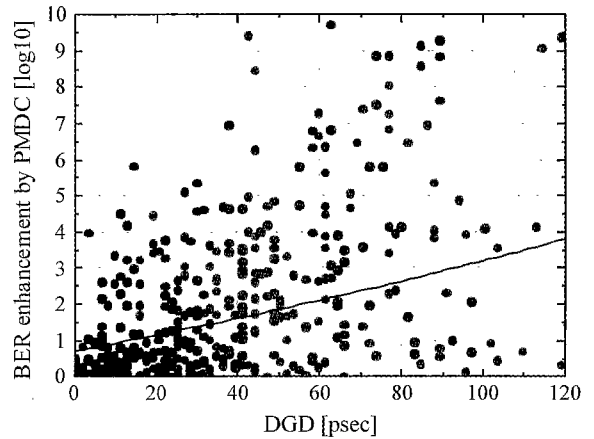


그림 5. PDL이 없을 때 편광모드 분산의 보상으로 감소되는 BER.

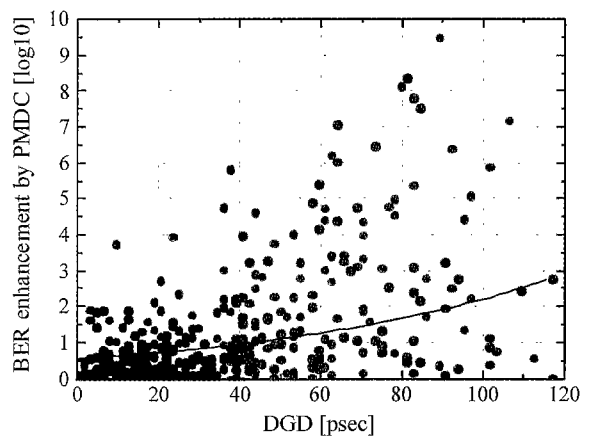
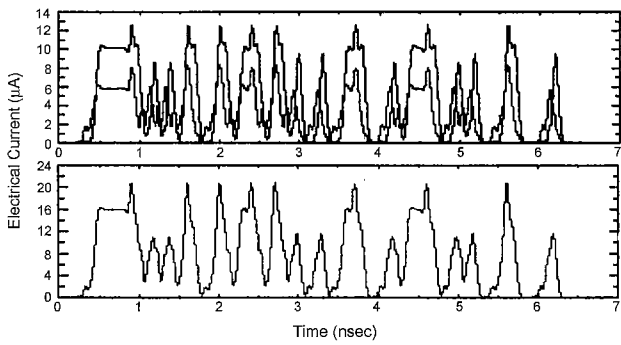


그림 6. PDL이 있을 때 편광모드 분산의 보상으로 감소되는 BER.

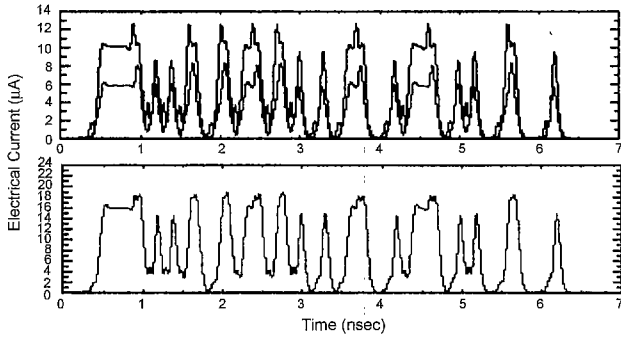
어 있는 소자들의 PDL의 축적된 효과가 존재할 때 이를 염두에 두지 않고 편광모드 분산에 대해서 보상을 해준다면, 충분한 효과를 보지 못할 수도 있다는 것을 암시하는 것이다. 상대적으로 비용이 많이 드는 편광모드 분산에 대한 보상의 실효성을 확인하기 위해서는 시스템 내에 포함되는 PDL 소자들의 특성과 값에 대한 고려가 필요한 것이다.

그림 5와 6은 각각 DGD가 변화함에 따라서 편광모드 분산에 대한 보상이 PMDC의 BER 개선 능력을 얼마나 감소시키는지를 PDL이 없는 경우와 링크 전체의 평균 PDL이 0.7 dB인 경우에 대해 흩어져 있는 점들로 표현한 것이다. 그래프에서 곡선으로 나타낸 것은 분포된 점들에 대해 fitting한 것이다. 두 그래프를 비교해보면, 그림 5, 즉 PDL이 없는 경우에 비해서 그림 6의 경우의 분포 그래프가 훨씬 아래쪽으로 치우쳐 있다는 것을 알 수 있다. 또한 DGD가 커질수록 편광모드 분산에 대한 보상효과가 더 커진다는 것도 알 수가 있다.

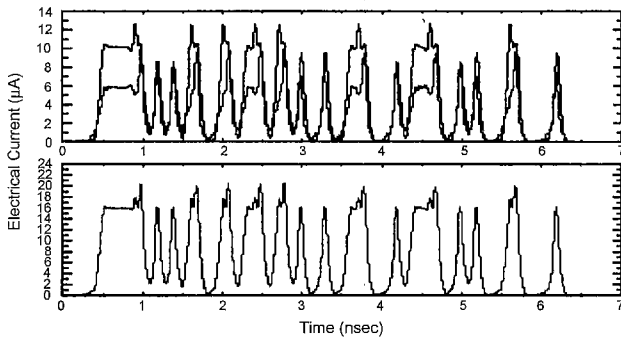
그림 7은 수신단에서 빛을 받아서 PIN Diode를 거쳐서 나온 전류를 시간축에 대해서 그려본 것이다. 각 그래프는 PC로 두 광신호를 PSP 축에 대해서 분리시킨 후 각각 PIN Diode를 거친 전기 신호를 겹쳐서 그린 것과, $E_{out} = E_x \hat{x} + E_y \hat{y}$ 벡터인 광신호가 $|E_x|^2 + |E_y|^2$ 에 비례하는 세기를 가지는 빛이 PIN Diode를 통과하여 얻은 전기 신호를 그린 그림으로



(a) 편광모드 분산에 대한 보상을 하지 않은 경우



(b) 1차 편광모드 분산에 대한 보상을 한 경우



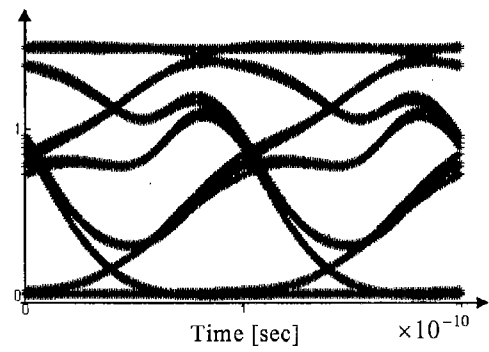
(c) 2차 편광모드 분산에 대한 보상까지 한 경우

그림 7. 시간 축에서 본 두 편광 모드의 신호와 백터합.

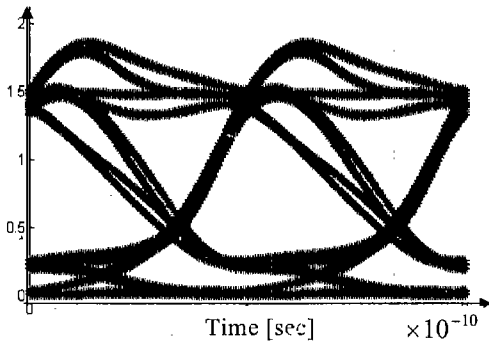
구성되어 있다.

(a)는 편광모드 분산을 하지 않은 경우를 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 두 모드의 신호가 τ_0 만큼의 시간차를 두고 shift 되어 있는 것을 알 수 있다. 이로 인해서 ISI(inter-symbol interference)가 발생하여 “0” 레벨은 올라오고 “1”의 레벨이 감소되는 현상이 나타나 있다. (b)는 τ_0 만큼의 주파수와 관련 없는 평균 DGD를 구해서 그만큼의 time delay를 fast mode의 빛에 적용하여서 보상해 준 것이다. 이를 통해서 펄스의 모양이 좋아진 것을 확인할 수 있다. 그러나 고차 편광모드 분산의 효과에 의해서 생긴 신호의 왜곡까지는 보상하기 어려운 상태라 하겠다. (c)의 그림은 각주파수에 비례하여 다르게 적용할 수 있는 DGD를, BER이 가장 작게 되는 지점으로 찾아서 보상해 준 것인데, (b)와 비교하여 볼 때 어느 정도 펄스의 왜곡이 감소한 것을 알 수 있다.

또한 그림 7을 통해서 알 수 있는 것은, 편광모드 분산으로 나빠진 시스템의 상태를 확인하기 위한 정보로써 DGD만으로



(a) PMD 보상 전의 모양



(b) PMD 보상 후의 모양

그림 8. 수신단에서의 Eye Diagram.

는 부족하다는 것이다. 단순한 time delay만이 있는 경우보다 고차 편광모드 분산으로 인해서 신호의 왜곡이 많이 생겼을 때의 오류 발생 확률이 커지기 때문이다. PDL이 시스템에 끼치는 영향도 이와 비슷하다고 하겠다.

그림 8는 수신단에서의 eye를 그린 것이다. (a)는 편광모드 분산을 보상하기 전이고 (b)는 편광모드 분산을 보상한 후이다. 그림에서 볼 수 있듯이 편광모드 분산은 두 모드의 펄스간의 시간차를 만들기 때문에 eye가 좌우로 심하게 일그러지게 된다. 편광모드 분산을 보상해줌으로써 이러한 jitter 현상이 개선되어서 (b)에서 볼 수 있듯이 eye가 많이 향상되게 된다. Eye diagram은 128 비트의 신호를 한 비트 내에서 64개의 샘플을 취하여 그렸다.

컴퓨터 시뮬레이션 결과, 광전송 시스템 내에 PDL이 있는 경우에 PMD 보상의 효과가 감소한다는 사실을 확인하였는데, 이러한 현상이 발생하는 이유는 PDL이 없는 경우에는 서로 수직을 이루던 PSP의 축이 더 이상 직교하지 않기 때문이다.^[11] 따라서 이렇게 PDL이 포함되는 경우에는 시스템의 끝단에서 이제까지 축적된 편광모드 분산의 효과를 반대로 주기 위해 fast mode의 광신호에 대해서 적절한 time delay를 주는 것이 적절한 PSP축을 PC로 찾아서 배열하는데 어려움을 겪게 된다. 그리고 직교성이 유지될 때는 서로 간섭하지 않았던 두 모드의 빛이 직교성이 깨어지면서 phase에 따라서 보강 간섭 및 상쇄 간섭 등이 일어날 수도 있게 되어 신호의 왜곡이 생기게 된다. 이로 인해 특정한 PDL의 값의 지점과 PDL 축과 PSP 축간의 특정한 배열은 오히려 광신호의 왜곡을 줄여줄 수도 있다는 연구결과도 발표된 바 있다.^[12] 그런데, 이는 매우 특

정한 상황에서 가능한 것으로 확률적으로 빠르게 변화하는 실제 시스템 상황에서 PDL은 평균적으로 PMD 보상의 효과를 떨어뜨리게 된다.^[13] 또한 PDL이 포함되면 편광모드 분산의 확률적 분포 특성 또한 변화하게 된다.^[12] 따라서 PMD 보상 시스템의 설계 시에는 이를 해결하기 위한 방법이 강구되어야 할 것으로 보인다.

IV. 결 론

본 논문에서는 편광모드 분산에 대한 보상회로가 수신단에 포함되어 있는 10 Gb/s의 광전송 시스템에서 polarization dependent loss(PDL)가 미치는 영향에 대해서 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 알아보았다. 전송 거리가 길어지고 전송률이 높아지고 있는 광통신 시스템의 발전 경향으로 인해 편광모드 분산을 해결하고자 하는 노력들이 많이 전개되었다. 그런데 이러한 기존의 방법들은 아직까지 PDL이 시스템에 포함되었을 때의 효과에 대해서는 만족할만한 결과를 도출하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 링크 내의 PDL을 증가시켜가면서 시스템의 성능이 어떻게 저하되는지에 대하여 BER을 기준으로 살펴보고자 하였다. 현실적인 시스템에 대한 분석을 위해서 광섬유에는 PDL이 없고 불연속적으로 흩어져있는 광소자들에만 PDL이 있다고 가정하였다. 또한 PDL의 값과 PDL 소자와 광신호가 coupling되는 각도는 편광모드 분산과 마찬가지로 확률적 부정성을 가지고 있기 때문에 시스템의 성능은 확률적 특성을 가지고 빠르게 변화한다고 생각하였다. 도출된 결과를 통해 링크 내 PDL이 증가함에 따라서 시스템의 성능이 저하되며, 뿐만 아니라 편광모드 분산의 보상 정도도 함께 감소된다는 사실을 알게 되었다. 색분산의 효과를 보상해주고 6 mW의 세기로 10 Gb/s의 광신호가 80 km의 전송 시스템을 지났을 때, DGD가 비트 지속 기간의 0.44 정도인 경우에는 링크 내 평균 PDL이 0.7 dB 가량 증가하자 약 $10^{0.8}$ 정도의 BER 개선 능력이 감소하였다. 이는 PDL의 존재로 인해서 PSP의 축의 직교성이 사라지고 시스템의 왜곡이 더해져서 편광모드 분산에 대한 보상회로가 광신호가 광섬유를 통과하면서 축적된 편광모드 분산 효과를 되돌리기 어렵기 때문이다. 따라서 편광모드 분산의 효과를 성공적으로 제거하기 위해서는 PMD와 PDL 사이에서 일어나는 상호 효과를 고려해야 하며 이를 염두에 둔 시스템의 설계가 필요할 것이다.

참고문헌

[1] D. Marcuse, C. R. Menyuk and P. K. A. Wai, "Application

of the manakov-PMD equation to studies of signal propagation in optical fibers with randomly varying birefringence," *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, no. 9, pp. 1735-1746, 1997.

- [2] C. D. Poole and J. Nagel, *Optical Fiber Telecommunications* (Academic Press, San Diego, USA, 1997), Chapter 2.
- [3] D. Penninckx and V. Morénas, "Jones matrix of polarization mode dispersion," *Opt. Lett.*, vol. 24, no. 13, pp. 875-877, 1999.
- [4] H. Bülow, "System outage probability due to first- and second-order PMD," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 10, no. 5, pp. 696-698, 1998.
- [5] P. Ciprut, B. Gisin, N. Gisin, R. Passy, J.P. von der Weid, F. Prieto, and C. W. Zimmer, "Second-order polarization mode dispersion: impact on analog and digital transmissions," *J. Lightwave Technol.*, vol. 16, no. 5, pp. 757-764, 1998.
- [6] A. Mecozzi, M. Shtif, M. Tur, and J. A. Nagel, "A simple compensator for high order polarization mode dispersion effects," *OFC 2000*, WL2, pp. 192-194, 2000.
- [7] Z. Pan, Y. Xie, S. Lee, and A. E. Willner, "Chirp-free tunable PMD compensation using hi-bi nonlinearly-chirped FBGs in a dual-pass configuration," *OFC 2000*, TuH2, pp. 113-115, 2000.
- [8] F. Roy, C. Francia, F. Bruyère, and D. Penninckx, "A simple dynamic polarization mode dispersion compensator," *OFC '99*, TuS4, pp. 275-278, 1999.
- [9] A. E. Amari, N. Gisin, B. Perny, H. Zbinden, and C. W. Zimmer, "Statistical prediction and experimental verification of concatenations of fiber optic components with polarization dependent loss," *J. Lightwave Technol.*, vol. 16, no. 3, pp. 332-339, 1998.
- [10] P. Oberson, K. Julliard, N. Gisin, R. Passy and J.P. von der Weid, "Interferometric polarization mode dispersion measurements with femtosecond sensitivity," *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, no. 10, pp. 1852-1857, 1997.
- [11] B. Huttner, C. Geiser, and N. Gisin, "Polarization-induced distortion in optical fiber networks with polarization-mode dispersion and polarization-dependent losses," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 6, no. 2, pp. 317-329, 2000.
- [12] L. Chen and X. Bao, "Polarization-dependent loss-induced pulse narrowing in birefringent optical fiber with finite differential group delay," *J. Lightwave Technol.*, vol. 18, no. 5, pp. 665-667, 2000.
- [13] Na Young Kim, Duckey Lee, Hosung Yoon, and Namkyoo Park, "Analysis on the limitation of PMD compensator in the 10 Gbps transmission system with polarization dependent loss," accepted for the publication in *OFC 2001*.

Analysis on the PMD compensator's limitation from PDL in the optical communication system

Na Young Kim, Duckey Lee, Hosung Yoon, and Namkyoo Park[†]

School of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University, Seoul 151-742, KOREA

[†]*E-mail: nkpark@plaza.snu.ac.kr*

(Received December 21, 2000 ; Revised manuscript received February 7, 2001)

We analyze the effectiveness of the PMD compensation as a function of the link PDL, to acquire the guidelines for the successful deployment of PMDC. Result shows that the amount of BER improvement from the PMDC is decreased as the link PDL increases. Because PDL elements in the transmission system make well-defined two PSPs under the absence of PDL not orthogonal anymore, and proper definition of fast and slow polarization harder. Accordingly, consideration of PDL's potential effects must be needed for design of polarization mode dispersion compensation.

Keyword : OC.010.