

# GVD와 SPM 현상을 고려한 광링크의 전산해석

정회원 전 영 윤\*

## Optical link simulation based on GVD and Self-Phase Modulation Phenomena

Young-Yun Chun\* *Regular Member*

요 약

이 연구에서는 광섬유에 도파되는 광펄스의 GVD와 광섬유의 비선형 현상에 대한 이론적 해석과 SSFM방법을 사용한 시뮬레이션 프로그램을 만들었다. 그리고 광원의 출력, 광섬유의 종류, 광섬유의 비선형특성 및 광증폭 특성치 등의 다양한 조건을 고려한 광링크 시뮬레이션을 수행하였다. 이러한 광링크 시뮬레이션 결과는 실험치와 잘 일치하고 있었다. 따라서 10Gb/s급 단일 채널 및 다채널 WDM 전송시스템 설계에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

ABSTRACT

The combined effects of GVD and nonlinear phenomena on optical pulses propagating inside a fiber are analyzed and a simulation program on fiber nonlinearities using Split-Step Fourier Method is developed. Optical link simulations are described as a function of optical output power, kinds of fiber, fiber nonlinearities and optical amplifier characteristics. The simulation results are consistent with experimental values. We can apply the developed program for the design of a single 10Gb/s channel and WDM system.

### I. 서 론

광전송 속도는 인터넷 및 광대역서비스의 증가와 함께 수십 Gb/s에서 수백 Gb/s에 이르고 있고, 무중계전송거리 또한 수백km까지 증가하고 있다. 이러한 전송속도와 전송거리의 증가로 인하여 현재 사용중인 단일모드 광섬유에 고속(WDM), 장거리 광전송장치를 적용할 경우 전송품질에 영향을 주지 않았던 광섬유의 변수들이 아주 중요한 전송 제한 요소로 작용하게 된다. 기존의 광섬유에 1.3 $\mu$ m 파장대를 사용할 경우 색분산 보다는 손실제한 요소였으나, 1.55 $\mu$ m를 사용할 경우 색분산에 의한 제한 효과가 크게 된다. 전송거리, 전송품질 등의 문제 해결방안으로 광섬유 증폭기를 사용하거나 1.55 $\mu$ m 대역에서 색분산이 최소인 분산천이 광섬유를 사용하기도 한다.

또한 장거리 전송에서 큰 광출력을 내기 위하여 광증폭기를 적용할 경우 광섬유의 비선형현상이 전송제한 요소로 작용하며, 또한 수십 채널 이상을 수용하는 WDM 시스템을 운용할 경우 이러한 비선형현상에 의한 제한요인이 큰 역할을 하게 되므로 이를 최소화하기 위하여 넓은 파장영역에서 색분산이 영에 가까운 non-zero shifted 광섬유를 사용하려는 추세이다.

본 연구에서는 먼저 광섬유의 GVD와 비선형 현상을 분석하여 보고, 이들을 해석하기 위한 simulation 방법을 살펴보고, 또한 광섬유의 선형, 비선형 및 광원 등의 다양한 조건들을 도입한 시스템의 광링크 simulation 과 측정 결과를 비교 분석하고자 한다.

\* 원광보건대학 정보통신과(cyoung@sky.wkbc.ac.kr)

논문번호: T00027-0816, 접수일자: 2000년 8월 16일

\* 이 논문은 2000년도 원광보건대학 교내연구비에 의하여 연구되었음

## II. 광섬유에서 GVD와 비선형 현상

광섬유를 진행하는 단일 채널의 고속광신호의 비선형 슈뢰딩거 방정식은 다음과 같이 주어진다<sup>[1]</sup>

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{\alpha}{2} A + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} \\ = i\gamma \left[ |A|^2 A + \frac{2i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial T} (|A|^2 A) - T_{RA} \frac{\partial |A|}{\partial T} \right] \quad (2-1)$$

A는 광신호에 대한 파동함수이고,  $\alpha$ 는 광섬유의 감쇠상수이다. (2-1)식의 왼쪽 3째, 4째항은 색분산에 의한 GVD(group velocity dispersion)효과를 나타내고,  $\beta_2, \beta_3$ 는 전파상수  $\beta$ 의  $\omega$ 에 대한 2, 3차 미분항이며, 단위는 각각  $\text{ps}^2/\text{km}$ ,  $\text{ps}^3/\text{km}$ 이다. 그리고 위식의 오른쪽 항들은 광섬유내에서 광신호의 비선형 현상을 나타내는 요인들이며,  $\gamma$ 는 광섬유에서의 유효면적  $A_{\text{eff}}$ , 비선형 굴절율  $n_2$  등에 의해서 결정되는 비선형 계수로서 다음과 같이 정의된다.

$$\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{c A_{\text{eff}}} \quad (2-2)$$

(2-1)식의 오른쪽 첫번째, 두번째 항은 SPM(Self Phase Modulation)효과를 나타내고, (2-1)식의 왼쪽 4번째 항은 GVD의 고차 색분산, 오른쪽 2번째 항은 SPM의 self steeping을 나타내는 것으로 광펄스의 폭이 작은 경우 ( $< 100\text{fs}$ )에는 고려되어야 하지만 광펄스 폭이  $100\text{fs}$ 이상인 경우는 무시할 수 있다. 오른쪽 3째 항은 SRS(Stimulated Raman Scattering)에 대한 것이다. 이 외에도 여러 광신호의 상호 관계에서 발생하는 비선형 현상인 XPM(Cross Phase Modulation), SBS(Stimulated Brillouin Scattering) 등도 위 식을 조금 변형하여 나타낼 수 있다. 단일채널이며, 광펄스 폭이  $100\text{fs}$  이상인 경우 (2-1)식은 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} - \frac{\alpha}{2} A + i\gamma |A|^2 A \quad (2-3)$$

## III. 비선형 현상과 광링크의 수치해석

1. SSFM(Split-Step Fourier Method) 비선형 슈뢰딩거 방정식을 수치해석으로 풀기 위

해서 사용하는 방법은 여러가지가 알려져 있다<sup>[2,3]</sup>. 여기서는 그 중에서도 속도가 빠르고, 정밀도가 높은 SSFM을 적용하였다. 이 SSFM에서는 계산될 항을 편미분 연산부분과 비선형 연산부분으로 나누어 서로 독립적으로 계산한다. 편미분은 시간영역에서 계산에 어려움이 있으므로 주파수 영역으로 바꾸어 계산하면 그 과정을 대수적으로 처리할 수 있는 잇점이 있다.

$$\frac{\partial}{\partial T} \quad (F.T.) \quad \Leftrightarrow \quad i\omega \quad (3-1)$$

로 변환되는 특성을 이용하여 SSFM을 적용한다. 이 때 비선형 연산항과 신호감쇠 항은 시간영역에서 처리한다. 그리고 SSFM은 이렇게 독립된 연산을 하기 위하여 전체 구간을 아주 작은 구간(step)으로 나누어 계산한다.

이러한 연산자로 (2-3)식은 다음과 같이 나타낸다.

$$\frac{\partial A}{\partial z} = (\hat{D} + \hat{N})A \quad (3-2)$$

여기서  $\hat{D}$ 는 선형 매질에서 분산과 손실을 고려해 주기 위한 미분연산자이며,  $\hat{N}$ 은 비선형 현상을 고려해 주기 위한 비선형 연산자이다. (3-1)과 (3-2)식을 (2-3)식에 적용하면 각 연산자는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\hat{D} = -\frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2}{\partial T^2} + \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3}{\partial T^3} - \frac{\alpha}{2} \quad (3-3)$$

$$\hat{N} = i\gamma |A|^2 \quad (3-4)$$

앞에서 언급한 바와 같이 전송매체인 광섬유를 매우 작은 구간  $h$ 로 나눈 후 분산 효과와 비선형 효과를 독립적으로 고려하여 전파되는 광신호의 (3-2)식의 해는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A(z+h, T) = \exp(h\hat{D})\exp(h\hat{N})A(z, T) \quad (3-5)$$

(3-5)식에서 구간  $h$ 에서  $\hat{D}=0$ 라고 가정한 후 비선형 효과만을 고려하고, 다시  $\hat{N}=0$ 라고 가정한 후 분산 효과만을 고려하여 광신호가 전파하는 특성을 분석한다.

식 (3-5)에서 선형효과의 지수함수 연산자  $\exp(h\hat{D})$ 는 (3-6)식과 같이 Fourier 변환을 함으로써 주파수 영역에서 계산을 하는데, 이는 선형 현상을 나타내는 연산자가 시간에 대한 미분항들로 구

성이 되어 있기 때문이다.

$$\exp(h\hat{D})B(z, T) = "F^{-1}\exp[h\hat{D}(i\omega)]F"B(z, T) \tag{3-6}$$

여기서 F는 Fourier-transform 연산자이며, F<sup>-1</sup>은 역(inverse) Fourier-transform 연산자를 나타낸다.

(3-5)의 해는 그림 1에서 보듯이 작은 구간 h를 다시 분리하여 식(3-7)과 같이 적용함으로써 정확도를 향상시킬 수 있다.

$$A(z+h, T) = \exp\left(\frac{h}{2}\hat{D}\right)\exp\left(\int_z^{z+h}\hat{N}(z')dz'\right)\exp\left(\frac{h}{2}\hat{D}\right)A(z, T) \tag{3-7}$$

(3-5)와 (3-7)의 주된 차이점은 비선형 현상을 작은 구간 h의 경계부분이 아닌 중앙에서의 광신호에 대해 고려한다는 것이다. 이는 Symmetrized SSFM 이라 불리 운다. 그림 1에서 알 수 있듯이 먼저 구간 [0, h/2]에서 선형 현상만으로 계산한 뒤, 이를 이용해서 구간 [0, h]에 걸쳐 발생하는 비선형 현상을 고려해 주게 되며, 앞에서 구한 값을 이용해서 나머지 [h/2, h]부분에서 선형 현상을 계산함으로써, 구간 [0, h]에 걸쳐 선형, 비선형 현상을 모두 고려해 주는 방법이다.

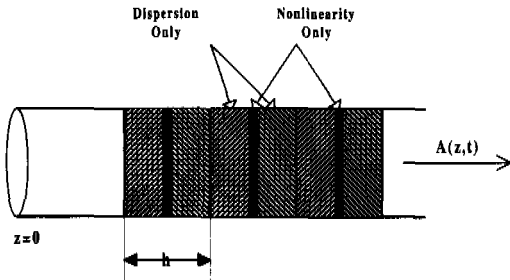


그림 1. Symmetrized SSFM

즉, 식 (3-3)을 Fourier 변환을 하게 되면

$$\hat{D}(i\omega) = -\frac{i}{2}\beta_2\omega^2 - \frac{1}{6}\beta_3\omega^3 - \frac{\alpha}{2} \tag{3-8}$$

로 표현되며, 또한, 식 (3-7)에서 비선형 현상을 고려해 주기 위해서 적분식은 trapezoidal법을 사용하여 구간 h가 매우 작다면 다음과 같이 간략화할 수 있다<sup>[3]</sup>.

$$\int_z^{z+h}\hat{N}(z')dz' = \frac{h}{2}[\hat{N}(z) + \hat{N}(z+h)] \tag{3-9}$$

그림 2는 광섬유내에서 전송되는 광신호를 해석하기 위한 SSFM 방식의 순서도를 나타낸다.

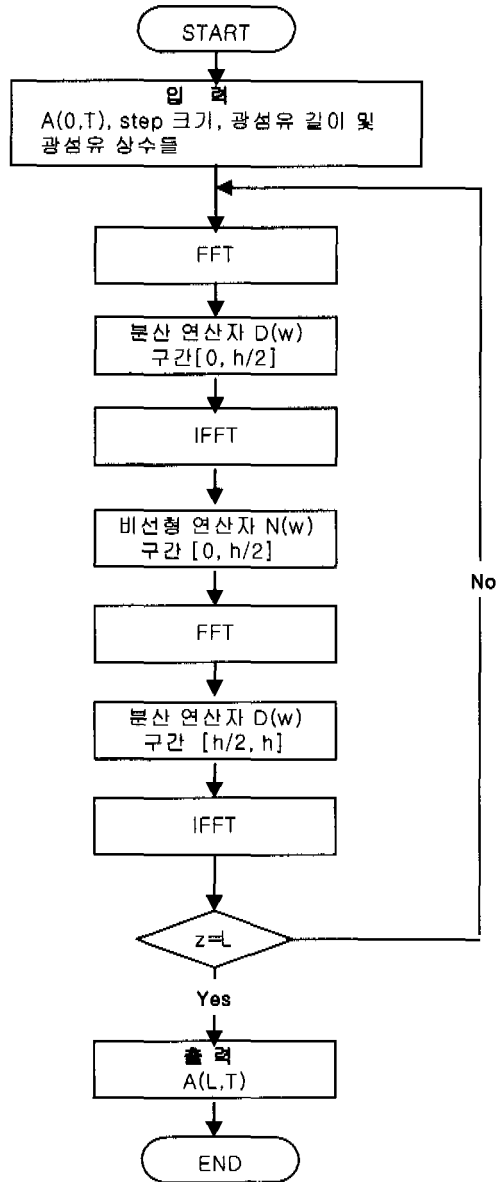


그림 2. Symmetrized SSFM의 순서도

일반적으로 수 Gb/s급 이상의 광송수신기에 사용되는 광원의 펄스가 광섬유에 도파될 때 색분산에 의한 broadening은 pulse edge의 steepness에 매우 민감하다. 이러한 광 펄스는 일반적인 Gaussian으로 근사할 수 없기 때문에 super Gaussian 형태를 사용한다. 따라서 본 연구에서는 입사 광 펄스 형을 다음과 같은 super Gaussian pulse를 사용하였다.

$$U(0, T) = \exp\left[-\frac{1+iC}{2}\left(\frac{T}{T_0}\right)^{2m}\right] \quad (3-10)$$

$$A(z, T) = \sqrt{P_0} \exp(-az/2) U(z, T) \quad (3-11)$$

여기서 C는 chirp 상수, T<sub>0</sub>는 초기 펄스폭으로 광신호의 bit-rate를 나타내며, P<sub>0</sub>는 입력펄스의 피크 파워, m은 펄스의 sharpness를 나타낸다. (3-10)식에서 m=1이면 Gaussian pulse이고, m이 클수록 구형파에 가깝게 된다.

## 2. 광링크 시뮬레이션

그림 3은 광링크 전송특성을 시뮬레이션하기 위한 전송시스템의 간략한 블록도이다. 그림에서 알 수 있듯이 광전송시스템은 송신부, 링크, 수신부로 구성된다. 송신부는 PRBS(Pseudo-Random Binary Sequence)발생기와 LD 및 변조기, 링크는 광섬유와 증폭기, 그리고 수신부는 필터와 광수신기 등으로 구성된다. 특히 링크는 광섬유의 종류와 광증폭기의 특성에 의해 결정된다. 광섬유의 특성은 GVD, SPM, XPM, FWM(Four-Wave Mixing), SRS(Stimulated Raman Scattering), 그리고 SBS 등으로 표현된다. 광증폭기의 특성은 이득, ASE(Amplified Spontaneous Emission), gain saturation, 그리고 dynamic transition 등으로 표현된다. 이 시뮬레이션에서는 단일 채널과 GVD 및 SPM에 의한 광도파 특성만을 계산하였다.

그림 3에서 보는 바와 같이 광펄스의 파형(chirp), 전송속도, 신호변조 방식, 광섬유의 색분산, 색분산

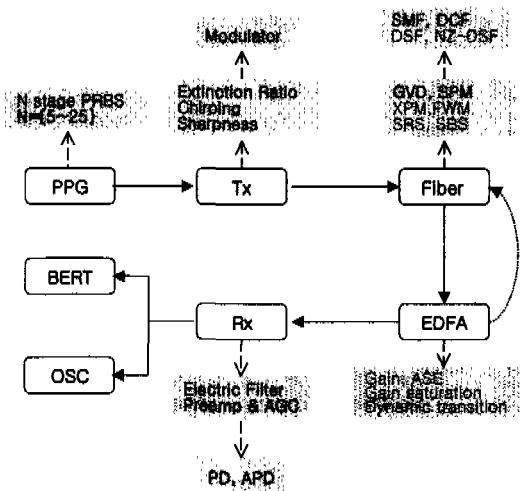


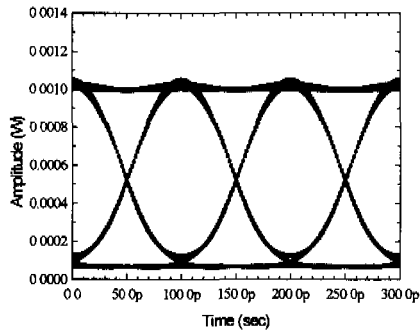
그림 3. 링크 시뮬레이션 블록도

보상 광섬유, 광섬유의 비선형 특성치, 전송거리 등에 따른 변수들을 사용하여 출력단에서 계산된 eye pattern과 측정된 eye pattern을 비교 분석하였다.

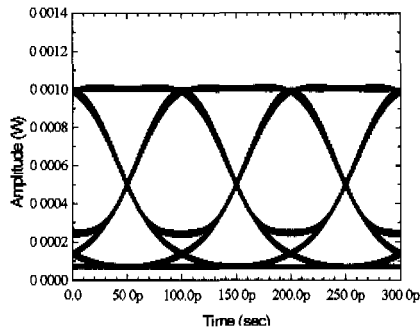
## IV. 시뮬레이션 및 측정 결과

그림 4에서 그림 8까지는 다양한 조건에서 링크 전송을 시뮬레이션한 결과이며, 비트율이 10Gbps, 펄스의 sharpness가 1.6, 입력 광파워 0dBm, 그리고 PN sequence의 길이를 7bits로 하였고, 광펄스의 첩(chirp)은 각각 {0.0, -0.5, +0.5} 인 경우 등을 적용하여 광섬유의 길이에 따른 수신단의 eye pattern으로 전송특성을 조사하였다. 먼저 그림4에서 그림 6은 첩의 영향을 전송거리에 따라 분석한 결과이다. 그림 4는 첩이 없는 경우 단일모드 광섬유(non-shifted SMF)의 길이가 {20km, 40km, 60km, 80km}일 때 전송거리 변화에 따른 eye pattern을 보이고 있다. 전송거리가 증가함에 따라 색분산에 의해 인접 펄스간의 간섭이 증가하여 "0" level이 증가하여 eye pattern의 닫힘 현상을 볼 수 있다. 특히, 전송거리가 80km 이상이면 간섭에 의해 eye 가 거의 닫히므로 수신기에서 "0" level과 "1" level을 구분하기 어려워진다. 그림 5는 첩이 0.5인 경우로 그림 4의 첩이 없는 경우보다 약 20km 더 전송 가능함을 볼 수 있다. 즉, 그림 5에서 60km를 전송한 결과와 그림 4에서 40km를 전송한 후의 eye pattern이 거의 유사함을 볼 수 있다. 그림 6은 첩이 +0.5인 경우로 그림 4의 첩이 없는 경우보다 전송 가능한 거리가 약 20km 적음을 확인할 수 있다. 즉, 그림 6에서 20km를 전송한 결과와 그림 4에서 40km를 전송한 후의 eye pattern이 거의 유사함을 볼 수 있다.

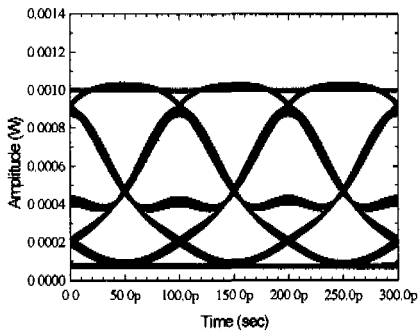
그림 7은 SPM에 의한 영향을 분석하기 위해 광신호의 입력레벨이 +10dBm인 경우 비정상분산(abnormal dispersion) 영역과 정상 분산(normal dispersion)을 통과한 후의 eye pattern을 보이고 있다. 그림 7(a)는 단일모드 광섬유 80km에 해당하는 D=+1048psec/nm의 색분산을 겪은 후의 결과로 그림 4(c)에서 광신호의 입력레벨이 0dBm인 경우보다 eye pattern의 열림 정도가 다소 큼을 확인할 수 있다. 이는 비정상 분산을 갖는 광섬유에 입사되는 광신호의 입력레벨이 증가함에 따라 비선형 현상인 SPM의 영향이 증가하고, 광펄스의 rising edge와 falling edge에서 주파수 이동이 색분산에 의한 펄스 퍼짐과 반대방향으로 발생하기 때문이다.



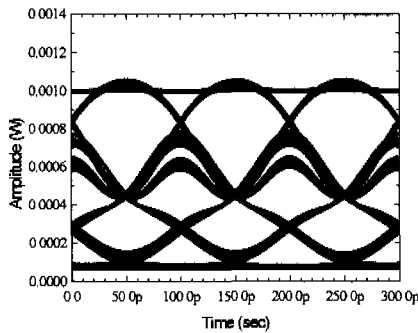
(a) L=20km



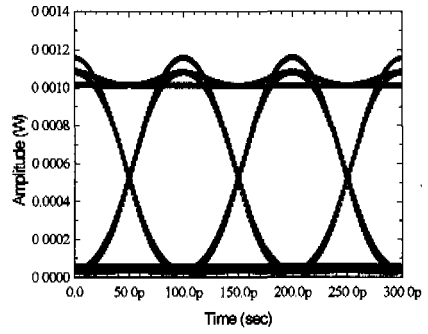
(b) L=40km



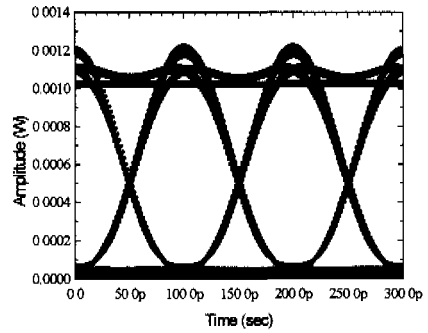
(c) L=60km



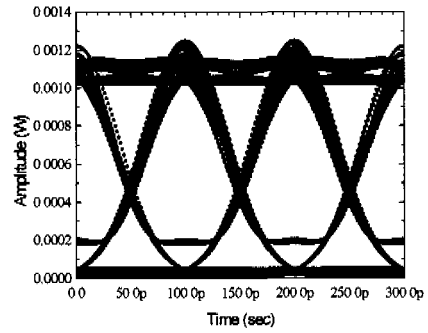
(d) L=80km



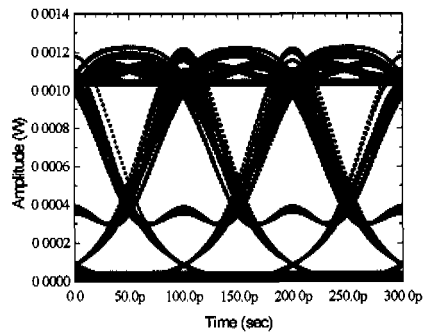
(a) L=20km



(b) L=40km



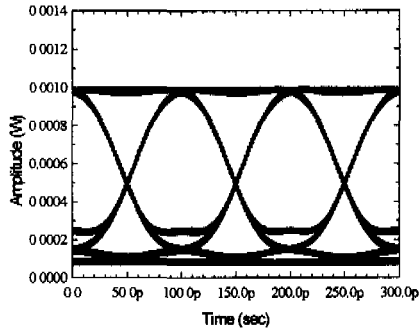
(c) L=60km



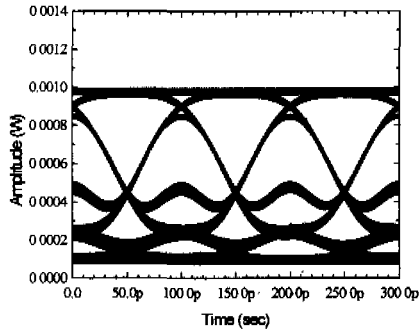
(d) L=80km

그림 4. chirp이 없는 경우 eye pattern (Br=10Gb/s, m=1.6, PN=7stage)

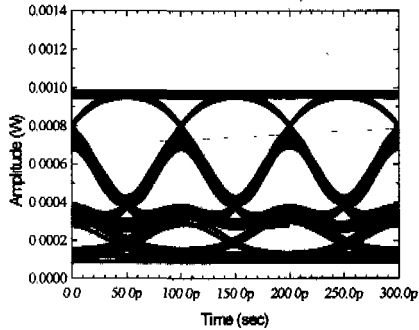
그림 5. negative chirp(C=+0.5)일 경우 eye pattern (Br=10Gb/s, m=1.6, PN=7stage)



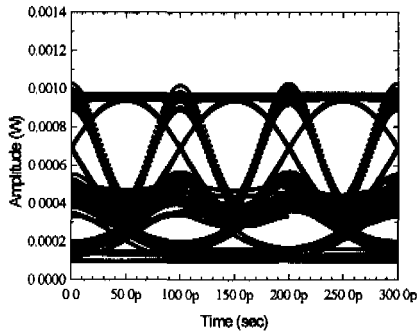
(a) L=20km



(b) L=40km



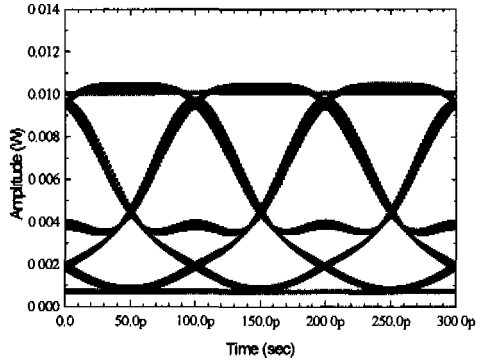
(c) L=60km



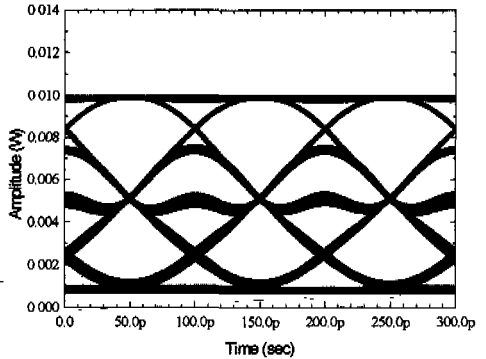
(d) L=80km

그림 6. positive chirp(C=+0.5)일 경우 eye pattern (Br=10Gb/s, m=1.6, PN=7stage)

그러나, 정상분산을 갖는 광섬유에서는 주파수 이동이 색분산에 의한 펄스 퍼짐과 동일방향으로 발생하기 때문에 그림 7(b)와 같이 펄스 퍼짐이 더욱 증가하고 있다.



(a) D=+1048psec/nm



(b) D= -1048psec/nm

그림 7. Pin=10dBm일 경우 anomalous dispersion(a)과 normal dispersion (b)에서 SPM효과에 의한 영향 (Br=10Gbps, C=0.0, m=1.6, PN=7stage)

그림 8은 단일모드 광섬유를 80km 단위로 하고, 색분산을 보상하기 위하여 80km마다 색분산 보상용 DCF(Dispersion Compensation Fiber)를 연결하여 구성한 링크를 다단 전송할 경우 eye pattern 변화를 보여 주고 있다. 즉, 그림 8은 각각 전송 링크가 {160km, 320km, 480km, 640km}인 경우의 전송 결과로 좌측은 시뮬레이션 결과이고, 우측은 실험 결과이다. 그림에서 보듯이 전송거리가 640km인 경우 색분산이 보상된 경우에도 SPM현상 등에 의해 1레벨이 감소하여, eye pattern이 거의 감기고 있음을 확인할 수 있다. 그리고 시뮬레이션 결과와 측정 결과가 잘 일치하고 있다.

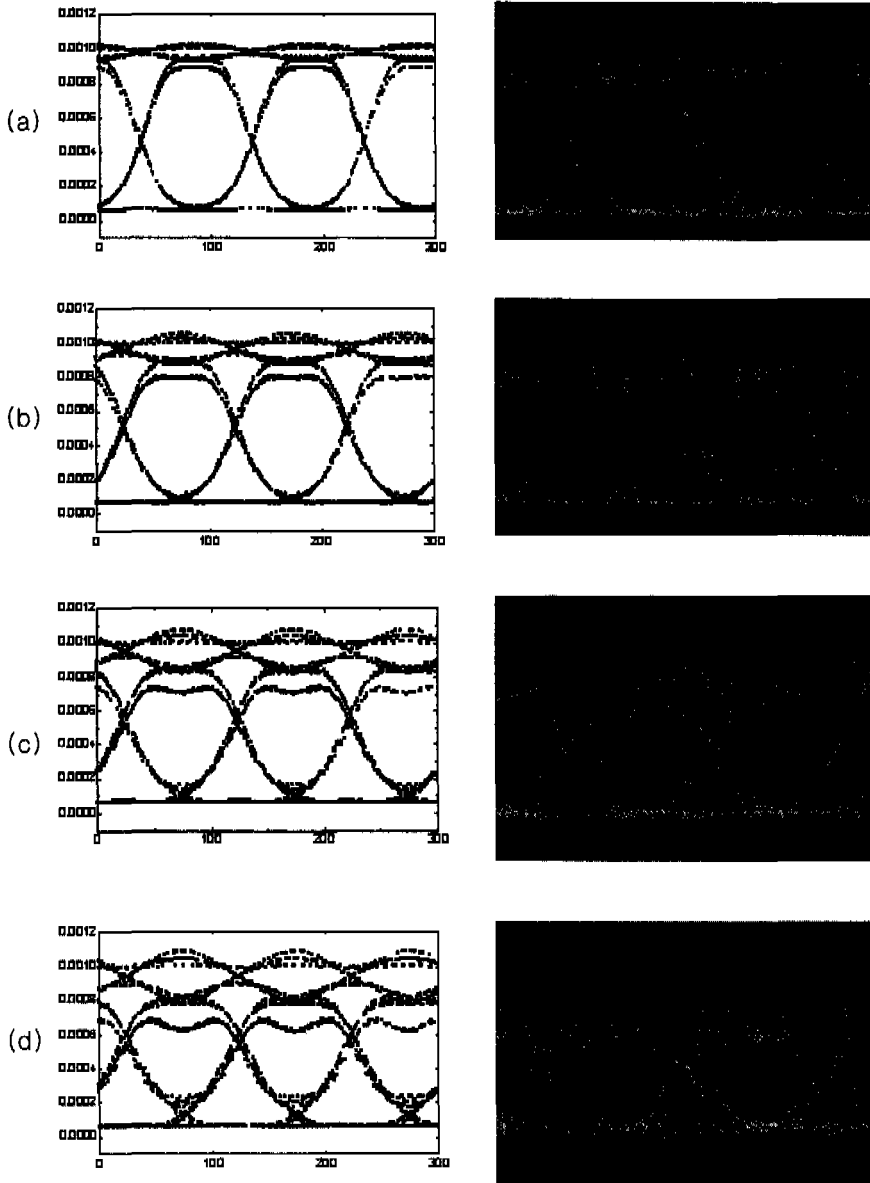
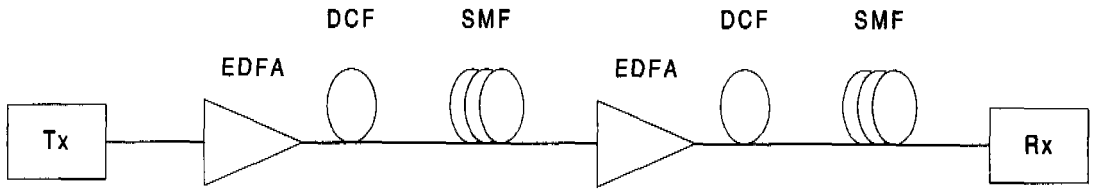


그림 8. SMF/DCF 링크의 다단 전송시 eye pattern 변화 (Br=10Gbps, C=0.0, m=1.6, PN=7stage), 좌측: 시뮬레이션 결과, 우측: 실험결과  
 (a) SMF 160km, (b) SMF 320km, (c) SMF 480km, (d) SMF 640km

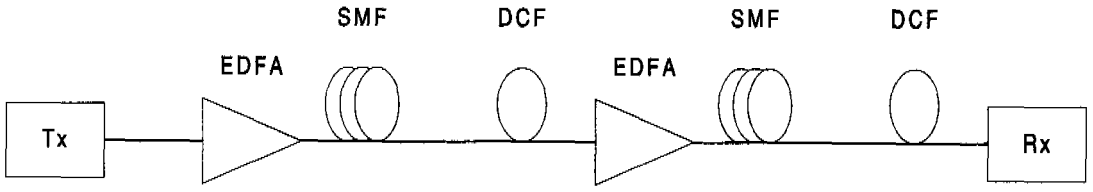
그림 9는 분산보상 방식 중 pre-compensation과 post-compensation 방식<sup>[4,5]</sup>의 구성도를 보이고 있다. 그림 10은 두 가지 방식의 분산보상 방식을 적용하여 SMF 200km 를 2 span 전송한 후의 eye pattern이다. 그림 10의 (a), (b)는 실험한 결과이고, (c), (d)는 시뮬레이션 결과이다. 그림에서 보듯이 시뮬레이션 결과가 실험치와 유사한 결과를 얻고 있음을 볼 수 있다

### V. 결론

본 연구에서는 고속으로 변조되고, 고출력 광원을 사용할 경우 광섬유로 도파되어 가는 광 신호 펄스의 색분산 및 비선형 현상에 대한 이론적 분석과 SSFM방법을 이용한 시뮬레이션 프로그램을 만들었다. 또한 단일채널 광링크에 전송속도가 10Gb/s인



(a) Pre-compensation scheme



(b) Post-compensation scheme

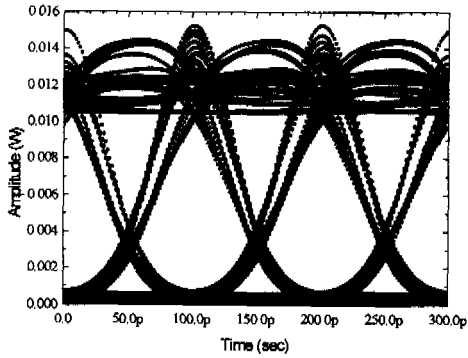
그림 9. 색분산 보상 구성도



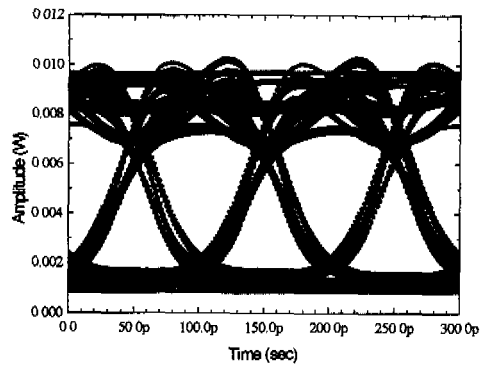
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 10. Pre-compensation과 Post-compensation 시 2x100km 전송후 eye pattern 변화 (Br=10Gbps, C=0.0, m=1.6, PN=7stage), (a), (b) : 실험 결과, (c), (d) : 시뮬레이션 결과

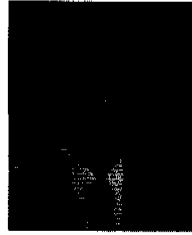


때 광섬유의 특성, 거리 및 광섬유의 종류, GVD, 광섬유에 입사되는 광세기 등을 고려한 링크 시뮬레이션을 통하여 eye-pattern의 변화를 살펴 보았다. 기존의 광섬유를 사용하는 경우 광원의 첩이 양일 때보다 음일 때가 수신 감도가 나빠짐(eye pattern의 찌그러짐이 커짐)을 볼 수 있었고, 첩이 없을 때 비정상(abnormalous dispersion: 양의 색분산)영역보다 정상분산(normalous dispersion: 음의 영역)영역에서 eye pattern의 닫힘이 커지고 있었는데 이것은 정상 분산영역에서 SPM의 영향이 더 크기 때문으로 여겨진다. 한편 기존의 광섬유를 사용할 경우 색분산 제한 요인을 없애기 위하여 DCF(Dispersion Compensation Fiber)를 사용한 다단 광링크를 시뮬레이션한 결과와 측정 결과가 잘 일치하였다. 뿐만 아니라 색분산 보상방법 중 pre-compensation과 post-compensation방식에 대한 시뮬레이션 값과 실험한 결과가 매우 유사하였다. 따라서 이 연구에서 사용한 GVD, 비선형현상에 대한 시뮬레이션과 광링크 시뮬레이션 방법을 고속의 광전송시스템의 설계에 적용할 수 있음을 알 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- [1] G.P. Agrawal, Nonlinear Fiber optics, Academic Press, INC., 1995.
- [2] R.A. Fisher and W. Bischel, "The role of linear dispersion in plane-wave self-phase modulation", Appl. Phys. Lett., 23(12), 661, 1973.
- [3] M. Lax, J.H. Batteh, G.P. Agrawal, "Channeling of intense electromagnetic beams", J. Appl. Phys., 52(1), 109, 1981.
- [4] C.C. Chang and A.M. Weiner, "Fiber Transmission for sub-500fs pulses using a dispersion-compensating fiber", IEEE J. Quantum Elrctron., 33(9), 1455, 1997.
- [5] R. Ludwig, W.Pieper, H.G. Weber, D. Breur, K.Peterman, F. Kuppers, and A. Mattheus, "Unrepeated 40Gb/s RZ single channel transmission over 150km of standard single mode fiber at 1.55  $\mu\text{m}$ ", Electro. Lett., 33(1), 76, 1997

전 영 윤(Young-Yun Chun)



1980년 : 전남대학교 물리학과 졸업(학사)  
 1983년 : 전남대학교 대학원 물리학과 졸업(석사)  
 1996년 : 전남대학교 대학원 물리학과 졸업(박사)

1983년 3월~ 1998년 12월 : 한국전자통신연구원 광통신연구실 책임연구원  
 1995년 1월~1999년 3월 : 정보통신연구진흥원 책임연구원  
 1999년 4월~현재 : 원광보건대학 정보통신과