

# Self-Phase Modulation 현상과 Chirping이 10 Gbps 전송 특성에 미치는 영향

정회원 정 지 채\*, 김 성 기\*

## 10 Gbps Transmission Performance for Self-Phase Modulation and Chirping

Jichai Jeong\*, Sung Kee Kim\* *Regular Members*

### 요 약

Self-phase modulation (SPM)에 의해 발생한 chirp에 의해 향상된 전송 특성을 고려하여 송신단에서의  $\alpha$  계수를 재정의 하였다.  $\alpha$  계수는 stimulated Brillouin scattering(SBS)을 무시할 수 있는 12.5dBm의 광입력으로 인한 SPM 현상이 존재하는 경우 송신기 자체의  $\alpha$  계수에 비해 약 1 정도 줄어들었다. 이와 같이  $\alpha$  계수의 감소는 송신기에서  $\alpha$  계수가 positive던지 negative던지 간에 전송 특성을 향상시킬 수 있다. SPM에 의한 유효  $\alpha$  계수는 10 Gbps급 초고속 전송 시스템 설계에 중요한 계수가 될 수 있다.

### ABSTRACT

We have redefined the  $\alpha$ -parameter of the extended transmitters in the presence of self-phase modulation (SPM) induced chirp. The  $\alpha$ -parameter is effectively lowered to about 1, when the SPM effect with the launching power of 12.5dBm (maximum launching power to avoid stimulated Brillouin scattering(SBS)) is included, compared to the  $\alpha$ -parameter of the transmitter alone. The lowered  $\alpha$ -parameter has improved the transmission performance significantly regardless the transmitter is operated with positive or negative chirp. The SPM-induced effective  $\alpha$ -parameter can be used as a design parameter for the high speed (10 Gbps) transmission systems.

### I. 서 론

어븀 첨가된 광섬유 증폭기 (EDFA)의 도움으로 1.5  $\mu\text{m}$  파장에서 광섬유 손실을 극복하게 되었다<sup>(1)</sup>. 따라

서, 1.3  $\mu\text{m}$  파장에서 분산이 0이 되는 표준 단일 모드 광섬유를 사용하여 1.5  $\mu\text{m}$  파장의 신호를 전송하는 경우 group-velocity dispersion (GVD)가 장거리 전송에 주요 제한 요소가 되었다. 1.5  $\mu\text{m}$  파장 대역에서는 송신기의 chirp이 전송 특성을 크게 변화시키므로, 전송 특성을 향상시키기 위한 방법으로 low chirp이나 negative chirp을 위해 변조기를 사용한 송신기가 개

\* 고려대학교 전파공학과  
論文番號 : 98129-0319  
接受日字 : 1998年 3月 19日

발되고 있다<sup>(2,3,4)</sup>. 특히, 표준 단일 모드 광섬유를 통해 초고속 광전송 시스템에서 negative chirp은 전송 특성을 향상시키는데 도움을 준다. Negative chirp을 사용할 경우 펄스의 leading-edge에서는 파장이 길어지고(red-shift), falling-edge에서는 파장이 짧아진다(blue-shift). 1.55 μm 파장대역을 사용하는 경우 단파장(short wavelength)의 성분이 장파장(long wavelength)의 성분보다 전송 속도가 빠르므로, negative chirp은 광 펄스가 전송 될 때 펄스를 압축시키게 된다. 적절하게 negative chirp을 조정해 주게되면, 색 분산(chromatic dispersion)에 의한 펄스의 퍼짐 현상을 제거하여 원래의 신호 파형을 그대로 복원할 수 있다. 그러므로, 분산에 의해 제한된 전송 거리는 negative chirp을 사용함으로써 연장할 수 있다. 전송 거리를 연장하는 방법으로 self-phase modulation(SPM)과 같은 광섬유의 비선형 현상을 이용할 수 있다<sup>(5)</sup>.

표준 광섬유에서 SPM에 의한 파장은 펄스의 leading-edge에서 길어지는 방향으로, falling-edge에서는 짧아지는 방향으로 변하게 된다. SPM에 의한 파장의 변화는 negative chirp에 의한 파장 변화와 동일한 방향이므로, SPM은 분산에 의해 제한된 전송 거리를 늘릴 수 있으며, 10 Gbps 전송 시스템에 대한 분산을 보상하기 위한 방법으로 사용될 수 있다. SPM 뿐만 아니라 chirping도 초고속 광전송 시스템을 설계하는데 고려될 수 있다. 본 논문에서는 SBS의 현상을 무시할 수 있는 최대의 12.5dBm의 광출력을 이용하여 최대의 SPM 현상이 존재할 때, 송신기의 유효 α 계수의 효과에 대해 고찰하였다. 여기서 유효 α 계수는 SPM에 의해 발생된 chirp 계수와 송신기 자체의 chirp 계수의 합성으로 정의하였다.

## II. 실험과 시뮬레이션 결과

이번 실험에 사용된 전송 시스템에서 BER 특성을 측정하기 위한 구성도는 그림 1에 나타내었다. 10 Gbps Ti:LiNbO<sub>3</sub> 변조기는 2<sup>23</sup>-1 길이의 전기적인 PRBS NRZ 데이터를 가지고 구동하였다. 송신기의 chirp은 변조기의 두 전극에 가해준 전압을 조정해줌으로써 변화시켰고, 송신기로부터 나오는 출력 파형의 소광비(extinction ratio)는 측정하는 동안 12 dB 이상을 유지하였다. SPM 현상과 chirping의 효과를 보기 위해서 송신기의 출력은 EDFA를 사용하여 증폭시켜 주었으며,

가변 광 감쇠기(variable optical attenuator)를 사용하여 12.5 dBm의 전력을 가지도록 조정하였다(만약 chirping의 효과를 관찰하려면 0 dBm의 전력으로 유지). SPM 효과를 최대한으로 보기 위해서 SBS에 의해서 전송 특성이 영향을 받지 않는 최대의 광 출력인 12.5 dBm을 사용하였다. 광 출력이 작은 곳에서도 SPM이 발생하지만 최대의 SPM 효과를 보기 위해서 광 출력을 최대로 고정하여 실험하였다. 재생기(regenerator)에 도달한 신호로부터 평균 수신 전력과 전송 거리를 변화시켜가면서 BER을 측정하였다. 재생기에서 decision 회로의 문턱 전압(threshold voltage)은 각 전송거리마다 10<sup>-9</sup> BER에서 최대의 수신감도를 가지도록 조정해 주었다. BER 측정 후에 각 전송거리마다 광 모노크로메타(optical monochromator)와 디지털 스코프를 사용해서 time resolved chirp을 측정하였다<sup>(7)</sup>. Chirp을 측정하기 위해서 송신기는 2<sup>7</sup>-1 길이의 PRBS NRZ 데이터를 사용하여 변조하였으며, α 계수는  $\alpha = -(4\pi c \delta \lambda / \lambda^2) \{ (1/S)(dS/dt) \}$ 를 이용하여 계산하였다. 여기서 λ는 파장이고 c는 빛의 속도, 그리고 S는 순간 광 전력(instantaneous optical power)을 의미한다.

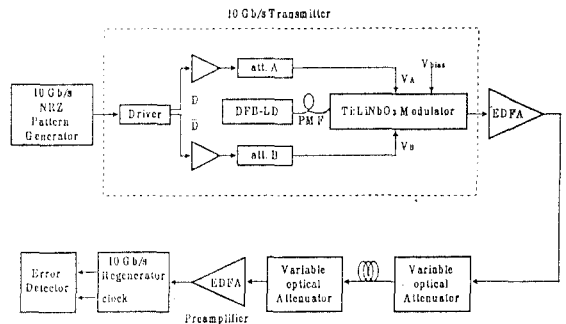


그림 1. BER 특성을 측정하기 위한 구성도. Chirp의 값은 송신기의 두 전극에 걸여주는 전압을 조정해 줌으로써 변화시켜 줄 수 있다. (att.= electrical attenuator, PMF= polarization maintaining fiber, DFB-LD= packaged DFB laser with built-in isolator, EDFA= Er-doped fiber amplifier.)

그림 2에서는 α 계수가 -1.82에서 +1.26인 경우에 대해 10<sup>-9</sup> BER에서 수신 감도를 보여준다. 다섯 개의 실선은 SPM 효과 없이 전송 거리에 따른 수신감도의 변화를 보여 준다. 실선으로 표시된 각 라인은 위쪽에서부터 각각 +1.26, +0.24, -0.314, -0.69, 그

리고  $-1.82$ 의  $\alpha$  계수를 가진다. 이 경우 광섬유에 들어가는 광 전력은  $0$  dBm으로 유지해 주었다. Negative  $\alpha$  계수를 사용하는 경우, 전송 거리에 따라 수신 감도가 크게 감소하지 않는데, 이는 분산에 의한 펄스의 퍼짐 현상을 transient chirp이 보상해 주기 때문이다. 그림 2에서 보여주듯이, negative  $\alpha$  계수의 크기가 증가함에 따라 수신 감도의 향상을 볼 수 있지만,  $12$  dB의 소광비를 유지하기 위해서는  $\alpha$  계수를  $-1.82$  이하로 만들 수 없었다. 기대할 수 있듯이 positive  $\alpha$  계수를 사용한 경우 신호를 전송함에 따라 빠르게 수신 감도가 감소함을 알 수 있는데, 이는 분산과 positive chirp 둘 다 펄스의 퍼짐을 촉진하기 때문이다.  $\alpha$  계수가  $+1.26$ 인 경우  $40$  km 전송 후 수신 감도의 감소는  $3$  dB였다.

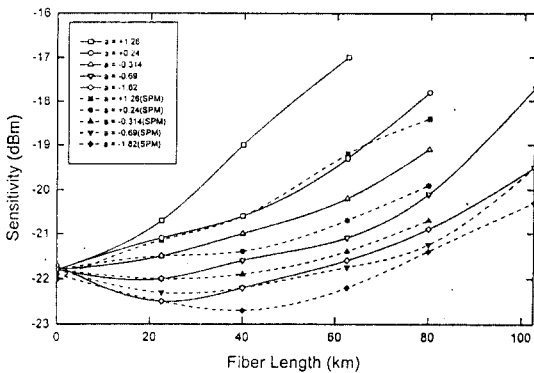


그림 2. SPM 현상이 존재하는 경우(점선)와 존재하지 않는 경우(실선), 5가지의  $\alpha$  계수에 대해서 전송 거리에 따라 측정된 수신 감도의 변화.

광섬유의 입력 광 전력을  $+12.5$  dBm까지 증가시킨 경우, positive  $\alpha$  계수를 사용하던지 negative  $\alpha$  계수를 사용하던지 간에 SPM 현상에 의한 수신 감도의 향상을 볼 수 있다. 이와 같이 SPM 현상이 존재하는 경우,  $\alpha$  계수에 의해 발생한 chirp과 SPM에 의해 발생한 chirp의 효과를 유효  $\alpha$  계수로 정의함으로써 하나로 결합시킬 수 있다. 예를 들면, 송신기에서  $\alpha$  계수가  $+1.26$ 인 펄스가 SPM 현상에 의해  $+0.24$ 가 된다. 이 경우  $60$  km 전송 후에  $2.5$  dB의 수신 감도의 향상을 볼 수 있다.  $-1.82$ 의 negative  $\alpha$  계수를 사용한 경우에도  $60$  km 전송 후 수신 감도가  $0.5$  dB 향상된다. SPM에 의해 송신기에서의  $\alpha$  계수가 어느 정

도 향상되는지에 대해서 표 1에 정리하였다. 표준 광섬유에서 SPM에 의해 LiNbO<sub>3</sub> 변조기를 사용하는 송신기에서의  $\alpha$  계수는 약  $1$  정도 감소시킬 수 있다.

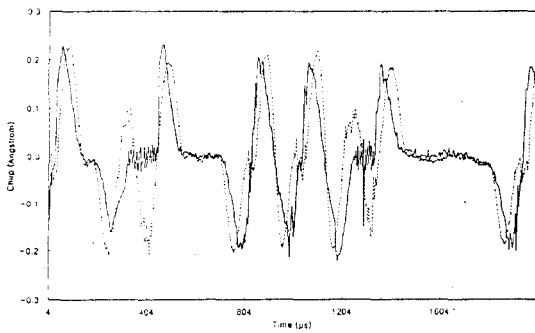
표 1. SPM에 의해 향상된 수신 감도로부터 예측한 유효  $\alpha$  계수. 송신단에서  $\alpha$  계수는  $12.5$ dBm의 출력에 의한 SPM에 의한 수신 감도의 향상으로 약  $1$  정도 감소된다.

$\alpha = \frac{2 \frac{d\phi}{dt}}{\frac{1 ds}{s dt}}$	$\alpha_{effective}$ with SPM	$\Delta \alpha$ due to SPM
1.26	0.24	-1.02
0.24	-0.5	-0.74
-0.314	-1.24	-0.9
-0.69	-1.82	-1.1
-1.82	< -1.82	-

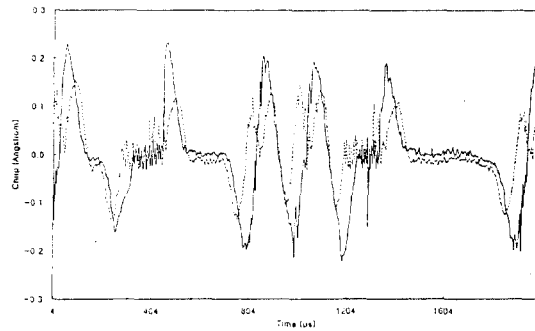
$\alpha$  계수가 작은 값을 가지거나 negative 값을 가지는 경우, 수신 감도의 향상을 이해하기 위해서 '011001110101001111'의 패턴을 가지는 펄스를 표준 광섬유를 통해 전송한 후 chirping을 측정하였다. 그림 3에서는  $\alpha$  계수가  $-1.82$ 인 경우  $0$  km와  $22$  km 전송 후 SPM 현상이 있는 경우와 없는 경우에 대해 측정된 transient chirping을 보여주고 있다. 여기서 광섬유의 길이를  $22$  km로 선택한 이유는 전송 거리에 크게 의존하는 SPM 현상은 짧은 전송 거리에서 크게 일어나기 때문이다. 그림 3(a)에서 실선과 점선은 각각 SPM 현상이 존재하는 경우  $0$  km와  $22$  km 전송 후에 측정된 transient chirping이다. 이 그림에서 볼 수 있듯이, SPM 현상이 존재하는 경우  $22$  km 전송 후에도  $0$  km에서 측정된 negative transient chirping이 그대로 유지되고 있다. 표준 단일 모드 광섬유를 통해 광 신호를 전송 할 때 transient chirping이 positive 값을 가지던지 negative 값을 가지던지 간에 분산에 의해 발생한 스펙트럼 퍼짐(spectral broadening) 현상은 전송 후의 출력 신호의 chirping을 positive chirping의 방향으로 변화시키게 된다<sup>(8)</sup>. SPM 현상이 없는 경우, 송신단에서의 negative transient chirping은  $22$  km 전송 후 그 크기가 감소되었음을 그림 3(b)에서 보여준다. 이와 같이 전송 거리가 증가함에 따라 negative chirp의 크기가 줄어들어 펄스 압축(compression)을 작게 만드는 경우, SPM 현상이 존재해서 색분산

현상을 제거해 줄 경우에 비해 수신 감도가 크게 향상되지는 않았다. GVD에 의한 영향과 SPM에 의한 영향이 어느 정도의 거리까지 영향을 미치는지 알아보기 위해  $T_0/\beta_2$ 로 정의된 분산 거리와  $1/\gamma P_0$ 로 정의된 비선형 거리를 계산해 보았다. 여기서  $T_0$ 는 펄스폭이며,  $\beta_2$ 는 1차 GVD이다.  $\gamma$ 는 비선형 계수이고,  $P_0$ 는 펄스의 최대 전력을 의미한다. 이 경우 분산 거리는 622 km인데 반해 비선형 거리는 28 km로 상당히 짧음을 알 수 있다. 따라서, 12.5 dBm의 출력을 사용하면 SPM 현상이 30km 정도까지 GVD 현상에 비해 크게 일어남을 알 수 있다.

SPM 현상과 chirping이 존재하는 경우 표준 단일 모드 광섬유를 통해 광 펄스의 전송은 split-step Fourier



(a)



(b)

그림 3. SPM 현상이 존재하는 경우(a)와 존재하지 않는 경우(b), 0 km (실선)과 22 km(점선)을 전송하였을 때 측정된 transient chirping. Negative chirp를 사용한 경우 SPM은 전송 초기의 chirp를 어느 정도 유지시켜주므로 전송 특성을 향상시킬 수 있다.

방법으로 계산 할 수 있다<sup>(8)</sup>. 이 시뮬레이션에 사용된 계수는 다음과 같다.  $2^7-1$ 개의 비트 패턴, 12 dB의 소광비,  $-1.82$ 부터  $+1.26$ 까지의  $\alpha$  계수, 0.266 dB/km의 광섬유 손실, 17 ps/nm/km의 분산,  $90 \mu\text{m}^2$ 의 effective core area,  $2.36 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W}$ 의 비선형 계수를 사용하였다. 전송 후의 광 신호는 amplified spontaneous emission (ASE) noise를 줄이기 위해서 micron optic사의 광 필터(사용 파장: 1.55  $\mu\text{m}$ , 대역폭: 42 GHz, finesse: 100~200)를 통과한 후 PIN 광 다이오드로 수신하였다. 수신한 신호는 측정한 전기적인 필터(electrical filter; 10.34 GHz 대역폭, 10 GHz까지 20° 위상 변화)를 통과한 후, Nuyts 등이 제안한 잡음 모델<sup>(9)</sup>을 사용하여 BER 특성을 계산하였다. 그림 4에서는  $\alpha$  계수가  $-1.82$ 인 경우 SPM 현상이 있는 경우(점선)와 없는 경우(실선)에 대해서 10 Gbps로 전송 할 경우 계산한 BER 특성을 보여주고 있다. 이 그림으로부터 SPM 현상은 분산에 의한 power penalty를 약 0.2에서 0.6 dB정도 향상 시켜준다. 그림 5에서는 SPM 현상이 있는 경우와 없는 경우에 대해서 여러 가지  $\alpha$  계수를 사용하여 전송 거리에 따라  $10^9$  BER에서 수신 감도의 변화를 계산한 결과를 보여 준다. 그림 5에서 계산한 결과는 0 km에서의 수신 감도의 값을 제외하고는 측정된 결과(그림 2)와 비슷함을 알 수 있다. 또한 실험 결과에서 보여준 것처럼 시뮬레이션에서도 SPM에 의해 똑같은  $\alpha$  계수의 향상을 보여 주었다.

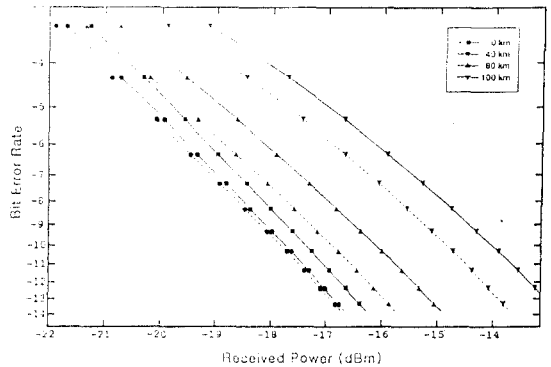


그림 4. SPM 현상이 존재하는 경우(점선)와 존재하지 않는 경우(실선),  $\alpha$  계수가  $-1.82$ 인 경우 0 km, 40 km, 80 km, 100 km 전송 후 계산한 BER 특성

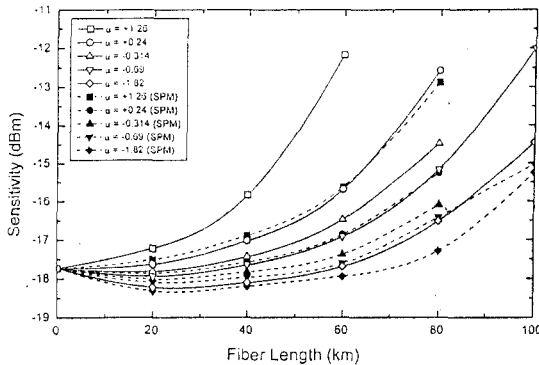


그림 5. SPM 현상이 존재하는 경우(점선)와 존재하지 않는 경우(실선)에 대해, 5 가지  $\alpha$  계수를 사용하여 전송 거리에 따라  $10^{-9}$  BER에서 수신 감도의 변화를 계산한 결과

### III. 결 론

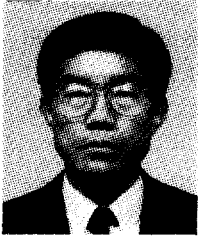
실험에 의한 BER 특성과 시뮬레이션에 의한 BER 특성을 통해 수신기에서의 수신 감도를 고려하여 SPM 현상에 의한 유효  $\alpha$  계수를 얻었다. 최대의 SPM 현상이 존재할 경우 송신단에서의  $\alpha$  계수는 유효  $\alpha$  계수로 다시 정의할 수 있다. SPM에 기인한 유효  $\alpha$  계수는 기존의  $\alpha$  계수가 positive값을 가지던지 negative 값을 가지던지 간에 약 1 정도 작은 값을 가진다. 이와 같이 SPM에 의한 유효  $\alpha$  계수는 초고속 전송 시스템에서 전송거리를 최적화하기 위한 계수로 사용될 수 있다.

### 참 고 문 헌

1. F. Koyama and K. Iga, "Frequency chirping in external modulators," J. of Lightwave Technol., Vol. 6, No. 1, pp. 87-92, 1988.
2. A. H. Gnauck et al., "Dispersion penalty reduction using an optical modulator with adjusting chirp," IEEE Photonics Technol. Lett., Vol. 3, No. 10, pp. 916-918, 1991.
3. M. Suzuki et al., "InGaAsP electroabsorption modulator for high-bit-rate EDFA system," IEEE Photonics Technol. Lett., Vol. 4, No. 1, pp. 586-588, 1992.
4. A. Aoki et al., "High speed (10Gb/s) and low-

drive voltage (1V peak to peak) InGaAs/InGaAsP MQW electroabsorption-modulator integrated DFB laser with semi-insulating buried heterostructure," Electron. Lett., Vol. 28, No. 12, pp. 1157-1158, 1992.

5. M. Stern et al., "Self-phase modulation and dispersion in high data rate fiber-optic transmission systems," J. of Lightwave Technol., Vol. 8, No. 7, pp. 1009-1016, 1990.
6. N. Suzuki et al., "Simultaneous compensation of laser chirp, Kerr effect, and dispersion in 10Gb/s long-haul transmission system," J. of Lightwave Technol., Vol. 11, No. 9, pp. 1486-1494, 1993.
7. J. Jeong et al., "A new method of accurately determining transient chirp parameter of high speed digital lightwave transmitters," Electron. Lett., Vol. 33, No. 7, pp. 605-606, 1997.
8. G. P. Agrawal, Nonlinear fiber optics, 2nd edition, Academic press, 1995.
9. R. J. Nuyts et al., "Effect of transmitter speed and receiver bandwidth on the eye margin performance of a 10Gb/s optical fiber transmission system," IEEE Photonics Technol. Lett., Vol. 9, No. 4, pp. 532-534, 1997.



정지채(Jechai Jeong) 정회원

1980년 2월 : 고려대학교 전자공학과 졸업(공학사)

1982년 2월 : 한국과학기술원 전자공학과 졸업(공학석사)

1988년 5월 : 미국 Carnegie Mellon University 전자공학과 졸업(공학박사)

1982년 3월 ~ 1985년 8월 : 한국과학기술연구소(KIST) 연구원

1988년 6월 ~ 1993년 8월 : AT&T Bell Labs. (Murray Hill) 연구원

1993년 9월 ~ 1995년 2월 : 포항공대 전자전기공학과 조교수

1995년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 전파공학과 부교수

1996년 9월 ~ 현재 : IEEE Senior member

※ 주관심분야 : 광전송, 광전 부품

e-mail : Jcj@kuccnx.korea.ac.kr



김성기(Sung Kee Kim) 정회원

1996년 2월 : 고려대학교 전파공학과 졸업(공학사)

1998년 2월 : 고려대학교 대학원 전파공학과 졸업(공학석사)

1998년 2월 ~ 현재 : 고려대학교 대학원 전파공학과 박사과정 재학