

## 분산과 SPM이 존재하는 2.5 Gbps, 8 채널 400 km 광 링크 시스템에서의 처핑 계수를 이용한 수신 감도 저하의 최소화

강용훈 · 박영일 · 김익상 · 채창준

한국통신 전송기술연구소

이 병 호

서울대학교 전기공학부

(1997년 1월 15일 받음)

광선로에 존재하는 분산의 영향은 외부 변조기에서 일어나는 Chirp현상과 비선형 현상인 SPM에 따라서 달라지게 된다. SPM의 영향은 신호 파워에 따라 달라지게 되고, 외부 변조기에서의 Chirp은 외부 변조기의 변조 조건에 따라 달라진다. 따라서 광통신 시스템에서는 분산과 SPM, 그리고 처핑 현상을 적절히 이용하여 수신 감도 저하를 최소화할 수 있게 된다. 주어진 광통신 시스템의 광신호 세기 분포 하에서 SPM과 외부 변조기 Chirp을 고려하여 신호 펄스폭의 변화를 Split Step Fourier 방법을 이용하여 수치 해석하였으며, 400 km 전송을 목표로 한 경우 수신 감도 저하를 최소화하는 최적의 Chirp 인자 값을 얻을 수 있었다. 또한 실제 전송 실험을 통하여 계산 결과와 비교하였다.

### I. 서 론

광선로에 존재하는 색분산 때문에 광신호 펄스에 존재하는 여러가지 주파수 성분들이 전파되는 속도는 조금씩 달라지게 된다. 이는 결국 수신단에서 신호 펄스폭의 확대로 나타나 수신 감도를 저하시키는 요인이 된다. 이러한 색분산의 영향은 비선형 현상의 하나인 SPM(Self Phase Modulation)과 외부 변조기의 Chirp의 존재에 따라서 다르게 나타나게 된다. 먼저 SPM의 경우 광세기에 비례하여 위상 천이가 일어나는데 광 펄스 신호의 앞쪽에서 적색 편이가 펄스의 뒤쪽에서는 청색 편이가 일어나게 된다.<sup>[1]</sup> SPM은 광펄스 상에 색분산으로 인해 생기는 위상 변조와 반대로 생기기 때문에 전파 초기에는 펄스 압축의 효과를 보이면서 나중에는 SPM이 없이 색분산만 존재하는 경우보다 훨씬 빨리 펄스 폭이 늘어나게 된다. 또한 광원의 직접 변조에서 생기는 Chirp의 심각한 영향 때문에 고속 전송에서는 외부 변조기를 사용하는데, 대표적인 변조기로는 Mach-Zehnder간섭계 형태의 LiNbO<sub>3</sub> 변조기가 있다. 그러나 이러한 외부 변조기에서도 약간의 Chirp현상이 일어나는데 이는 변조기의 양쪽 경로에 가해주는 전압의 차이 때문에 생기게 된다. 본 논문에서는 광전송에서 펄스 폭의 변화에 영향을 미치는 처핑, 분산 그리고 SPM의 작용을 고찰하여, 수치해석과 400 km 전송 실험 결과를 바탕으로 분산이 존재하는 주어진 광선로 시스템에서 SPM과 외부 변조기 Chirp을 이용하여 수신 감도 저하를 최소화하였다.

### II. 외부 변조기의 처핑 특성과 SPM

기존의 저속의 통신에서는 레이저의 전류를 직접 변조하여 광신호를 만들어 왔으나, 주파수 처핑(chirping) 현상 때문에

광원의 선폭이 커지게 되어 고속의 광통신에 적용되기에는 많은 문제점을 가지고 있다. 그러나 외부 변조기를 사용하면, 레이저 광원은 일정한 파워를 출력하게 하고 외부에서 빛을 스위칭함으로써 광 신호를 발생시키기 때문에 처핑 현상을 상당히 줄일 수 있다. 이러한 이유 때문에 고속 광통신 시스템에는 외부 변조기가 적용되고 있다. 외부 변조기에는 Mach-Zehnder간섭계 형태의 LiNbO<sub>3</sub> 변조기<sup>[2]</sup>가 많이 쓰이고 있으며, 전계 흡수형 구조의 변조기 등 다양한 형태의 변조기가 연구되고 있다. 하지만, 외부 변조기에서도 레이저 다이오드를 직접 변조하는 경우 보다는 작지만 처핑 현상이 존재한다. 간섭계의 한쪽 팔(arm)에만 변조신호를 가할 수 있도록 만들어진 변조기에서는 처핑을 조절할 수 없기 때문에 발생하는 처핑이 시스템의 성능에 그대로 영향을 미친다. 두 팔로 구성된 변조기의 양쪽 빔에 가해주는 전압을 각각  $V_1$ ,  $V_2$ 라 하면 다음 식으로 처핑 계수를 정의할 수 있다.

$$\alpha = \frac{V_2 + V_1}{V_2 - V_1} \quad (1)$$

처핑 계수는 이론상으로는 음의 무한대에서 양의 무한대까지 가능하지만 실제로는 -1에서 1까지의 값을 갖는다. 처핑 계수에 따라서 한 펄스에서의 시간에 따른 파장의 분포가 다음 식에서 보는 것 같이 바뀌게 된다.<sup>[3]</sup>

$$\delta\lambda(t) = -\alpha \frac{\lambda^2}{4\pi c l} \frac{dI}{dt} \quad (2)$$

여기서  $I$ 는 광파워를 나타낸다. 처핑 계수가 양일 때는 레이저의 발진 파장을 중심으로 파장이 짧은 성분이 시간적으로 펄스의 앞부분에 오게 되고 파장이 약간 긴 성분이 뒤쪽에 오게 되어 분산을 가중시키는 효과를 가져온다. 또한 그 부호

가 음일 때는 반대로 분산을 보상해주는 효과를 가져오게 되어 광 신호의 펄스 폭이 분산에 의해 확대되는 것을 어느 정도 막을 수 있게 된다. 그러나 전송 거리가 일정 거리를 넘어서면 펄스 폭이 급격히 증가하게 된다. 그러므로 주어진 시스템에서 적절한 처핑 계수를 결정함으로써 시스템의 수신 감도 열화를 최소화할 필요가 있다. 앞에서 언급한 처핑에 의해서도 펄스의 파장 분포가 바뀌게 되지만, SPM도 비슷한 효과를 가져온다. SPM은 광 파워에 따라 광섬유의 굴절률이 변화하게 되어 펄스에 위상 변화를 초래하게 되어 결과적으로 펄스의 앞부분에 파장이 긴 성분이 생기게 되고 뒷부분에 파장이 짧은 성분이 생기게 된다. 그래서 1.5 μm 파장을 쓰는 영역 ( $\beta_2 < 0$ )에서는 전송 거리에 따라 펄스 폭이 줄어들게 된다. 그러나 펄스 폭이 최소가 되는 전송 거리 이상으로 전송되면 펄스 폭이 급격히 넓어지게 되어 SPM 현상이 없는 경우보다 더 악화되기도 한다. 그러므로 분산에 의한 수신 감도 저하를 최소화하기 위해서는 정해진 전송 거리와 신호 파워 분포 하에서 처핑과 SPM이 동시에 고려되어야 한다.<sup>[4]</sup>

### III. 광 전송 시스템

WDM 2.5 Gbps, 8 채널 400 km 전송 실험의 구성도가 그림 1에 나타나 있다.

WDM 8 채널의 광원이 다중화기에 의해 다중화되어 LiNbO<sub>3</sub> 변조기에서 2<sup>23</sup>-1 PRBS로 변조된다. 광원으로는 선폭이 10~100 MHz 정도의 DFB LD를 사용하였다. 각 채널 사이에서 일어나는 상호 작용을 없애기 위해 단일 모드 광섬유 10 km를

전송한 다음에 파워 증폭기를 사용하여 광 신호의 파워를 증폭하였다. 위 그림에는 본 실험에서 사용한 광섬유 증폭기 다 음에서의 5번 채널의 파워가 표시되어 있다. 이 파워에 비례 하여 비선형 현상이 나타나게 된다. 광 선로에서의 비선형 현상과 분산이 거리에 따라서 어느 정도 영향을 미치는 지는 분산 거리  $L_D$ 와 비선형 거리  $L_{NL}$ 의 비로 정의되는 계수  $N$ 에 의해 정해진다.

$$N^2 = \frac{L_D}{L_{NL}} = \frac{T_0^2 / |\beta_2|}{z_a / [\gamma P_{peak} z_{eff}(z_a)]} \quad (3)$$

$T_0$ : 가우시안 펄스 폭

$\beta_2$ : 분산 상수

$z_a$ : 광 증폭기 간격

$\gamma$ : 비선형 계수

$P_{peak}$ : 신호 펄스의 최대 파워

$z_{eff}$ : 광 증폭기 간격의 손실을 고려한 실제적 전파 거리

계수  $N^2$ 의 값이 1보다 작다는 것은 분산 거리가 비선형 거리보다 작아서 그만큼 분산의 영향이 더 크다는 것을 나타내며 1보다 큰 경우는 비선형 현상의 영향을 무시할 수 없다는 것을 나타낸다. 그림 2에는 본 실험 상황에서의 광 신호 파워에 따른 비선형 지수의 그래프와 각 상수들의 수치가 나타나 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 본 실험의 상황에서는 비선형 현상에 의한 SPM이 강하게 일어나므로 분산에 의한 수신 감도 저하를 고려할 때는 필히 SPM을 고려하여야 함을 알 수 있다.

### IV. Split-Step Fourier 방법을 이용한 수치 해석과 전송 실험 결과

광섬유를 통한 전송의 수치 해석을 위한 Split Step Fourier 방법(Method)을 사용하여 광 링크 시스템에서 분산, chirp 그리고 각 채널의 광세기에 따른 SPM에 의한 펄스 폭의 변화가 수신감도에 미치는 영향<sup>[5]</sup>을 수치 해석 하였다. 본 수치해석에서는 하나의 채널만 고려 하였으며 XPM, FWM은 고려 하지 않았다. 펄스는 Super Gaussian를 가정하였으며 실험에 나타난 수치를 바탕으로 차수를 정하였다. 실험에 쓰인 상수 값들은 다음 표 1과 같다. 앞의 실험 시스템에서의 거리에 따른 펄스 폭 확대비 그래프가 그림 3에 나타나 있다.

비선형 현상을 고려하지 않고 분산만 고려하는 경우에는 400 km 전송 후에 0.1 dB 이상의 수신 감도 저하가 있음을 알 수 있다. 그러나 SPM이 존재하게 되면 400 km 전송에서도 거의 수신 감도 저하가 거의 없음을 알 수 있다. 여기에 처핑 계수가 -1인 경우는 오히려 펄스 폭 축소에 의해서 수신 감도가

표 1. 수치해석에 사용된 파라미터 값

Nonlinear Refractive Index $n_2$	3.2e-16 [cm <sup>2</sup> /W]
Effective Area $A_{eff}$	78.54e-12 [m <sup>2</sup> ]
Dispersion $\beta_2 (= -\frac{1}{v_g^2} \frac{dv_g}{dw})$	-20 [ps <sup>2</sup> /km]
Attenuation $\alpha$	0.046 [km <sup>-1</sup> ]

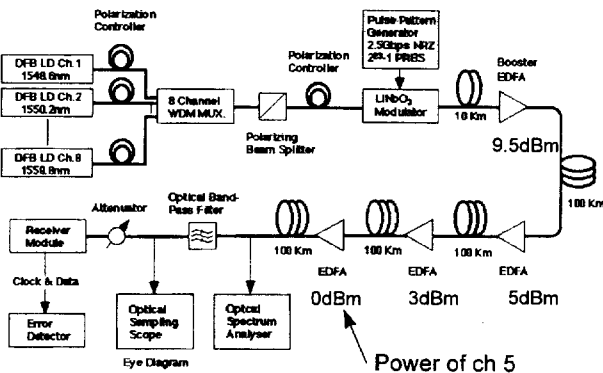


그림 1. WDM 2.5 Gbps, 8 채널 400 km 전송 실험 구성도

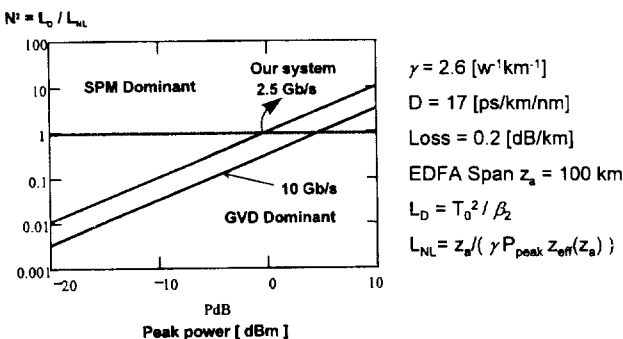


그림 2. 광 신호 파워에 따른 비선형 지수 곡선

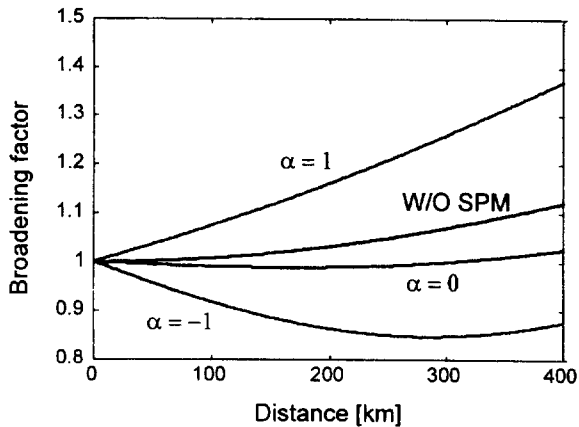


그림 3. SPM과 처핑을 고려한 펄스 폭 변화 곡선

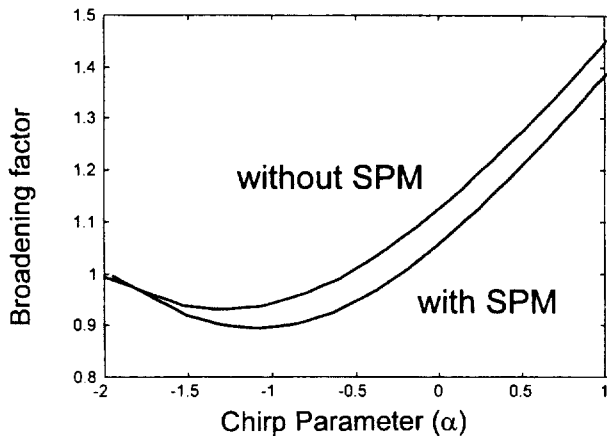


그림 4. SPM을 고려한 시스템에서의 최적 처핑 계수 곡선

향상됨을 알 수 있다. 그러나 처핑 계수의 부호가 양인 경우는 분산을 가중시키는 결과를 가져와서 펄스 폭이 급격히 늘어나 수신 감도 저하가 커지는 것을 볼 수 있다. 여기서 처핑 계수의 부호의 영향은 LiNbO<sub>3</sub> 외부 변조기의 입력 전압에 대한 출력 광파워 특성 곡선에서 직류 바이어스 전압을 양의 기울기 부분 혹은 음의 기울기 부분에 두느냐에 따라서 반대되는 현상이 일어난다. SPM이 존재하는 위의 전송 시스템에서 400 km 전송을 목표로 한 경우 수신 감도 저하를 최소화 하는 처핑 계수를 수치 계산으로 구한 그래프가 그림 4이다.

SPM이 없는 경우에는 수신 감도를 최적화 하는 처핑 계수는 -1.4 정도이다. 하지만 실제적인 LiNbO<sub>3</sub> 변조기에서는 처핑 계수가 -1보다 작거나 1보다 큰 값은 쓰이지 않는다. 그러나 SPM을 고려한 경우의 최적 처핑 계수의 값이, 그림 1에 나타난 것과 같은 파워 분포 하에서는 -1로 이동하는 것을 알 수 있다. 즉 본 실험 시스템에서처럼 충분한 파워로 인한 SPM 현상이 일어나는 경우에는 이를 이용하여 처핑 계수를 -1로 하는 것이 가장 좋은 결과를 얻을 수 있다.

### V. 전송 실험 결과

실험에서의 처핑 계수는 외부 변조기 양단에 인가하는 전압으로부터 계산하였다.<sup>[3]</sup> 그림 5와 6에는 각각 처핑 계수가 0,

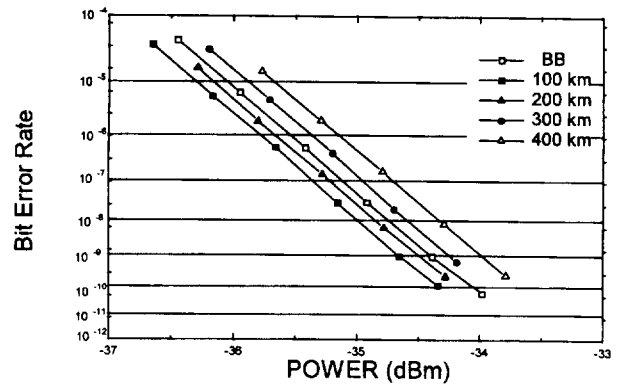


그림 5. 에러 오율 곡선 (처핑 계수 0)

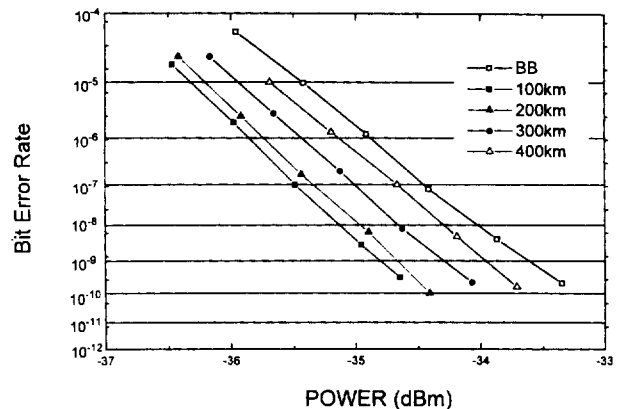


그림 6. 에러 오율 곡선 (처핑 계수 -1)

-1인 경우 테스트베드를 이용하여 측정한 채널 5번의 전송 거리에 대한 입력 파워 대 비트오율의 그래프가 나타나 있다. SPM만 존재하는 경우는 송신단에 비해서 400 km 전송 후에는 에러 오율 10<sup>-9</sup> 기준에서 0.5 dB 정도의 수신감도 저하를 보인 반면, 동일한 시스템에서 앞서의 수치 계산 결과에 따라 처핑 계수를 -1로 한 경우는 400 km 전송의 경우 모든 거리에서 송신단 보다 수신 감도가 향상된 것을 볼 수 있다. 이로써 400 km 전송에서는 처핑이 없는 경우에 비해 1 dB 정도의 수신 감도 향상을 얻을 수 있음을 알았다. 다만 그림 5, 6에서 송신단에서의 BER 곡선을 비교해 보면 처핑 계수가 -1인 경우가 수신감도가 저하된 것을 볼 수 있다. 이는 처핑 계수를 -1로 만들어 주는 실험 과정에서 외부 변조기에 인가해주는 RF 신호의 파워가 절반으로 감소되어 Extinction ratio가 저하되었기 때문이다. 펄스 폭 변화에 따른 수신감도의 변화는 각 경우에 대하여 송신단에 대한 상대적인 차이만 고려하면 된다.

### VI. 결 론

광선로에 존재하는 분산과 비선형 현상인 SPM을 이용하여 외부 변조기의 처핑 계수를 적절한 값으로 선택하는 경우 수신 감도 저하를 최소화 할 수 있다. 이를 Split-Step Fourier Method로 수치 해석 하였으며, 전송 실험을 통하여 이를 확

인하였다. 이와 같은 결과를 10 Gbps 전송에 응용하는 경우에는, 처핑에 의한 수신 감도 악화가 100 km 이내에서 일어나게 되고 분산 보상 기술이 쓰이기 때문에, 이러한 영향을 함께 고려하여야 한다.

### 참 고 문 헌

[1] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics* (Academic Press, San Diego, 1995) 89

[2] Lithium Niobate Intensity Modulator, Technical Note, AT&T Microelectronics, (1995).

[3] D. A. Fishman, "Design and performance of externally modulated 1.5- $\mu$ m laser transmitter in the presence of chromatic dispersion", *J. of Lightwave Tech.*, **11**, 624 (1993).

[4] 강용훈, 박영일, 김익상, 채창준, 이병호, 제 13회 광학 및 양자전자 학술발표회 논문집, 96 (1996).

[5] G. P. Agrawal, *Fiber Optic Communication System* (John Wiley & Sons, Inc., New York, 1992) 203

## Minimization of power penalty using chirp parameter for 2.5 Gbps, 8 channel, 400 km optical link system with dispersion and SPM

Yong Hoon Kang, Youngil Park, Iksang Kim and Chang Joon Chae  
*Transmission Technology Research Laboratory, Korea Telecom, Taejon 305-348, Korea*

ByoungHo Lee  
*School of Electrical Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea*

(Received : January 15, 1997)

The effect of dispersion in optical transmission system changes according to chirp and SPM. Chirp depends on the modulation condition of an external modulator. SPM is proportional to signal power. In this paper, we analyzed the pulse broadening due to SPM and chirp in the system with dispersion by using Split Step Fourier Method and calculated the optimum chirp parameter for 400 km transmission system. Experimental results are presented also.