

## 소광비, 처핑, 및 자기위상변조가 2.5Gbit/s 직접변조한 DFB-LD의 전송성능에 미치는 영향

김근영<sup>†</sup> · 이용기

한국통신 가입자망연구소

Ⓣ 305-348 대전시 유성구 화암동 62-1

(2001년 3월 20일 받음, 2001년 5월 12일 수정본 받음)

직접변조한 2.5 Gbit/s 송신기에 있어서 DFB-LD에 인가되는 바이어스 전류에 따른 출력 광신호의 소광비와 처핑의 관계를 살펴보고, 이상분산 영역 전송실험을 통해 변조된 광신호가 8~10 dB의 소광비를 가질 경우(바이어스 전류가 발진임계전류의 1.5배에서 1.8배) 소광비와 처핑으로 인한 총 전송 페널티가 최소가 됨을 알 수 있었다. 또한, 240 km 이상분산 영역 전송실험을 통해 직접변조된 광신호의 소광비와 SPM의 상관관계도 분석하였다. SPM을 고려할 경우, 본 실험과 같은 구성에서 전송거리가 200 km 미만인 경우는 10.2 dB의 소광비에서, 200 km 이상인 경우는 8.4 dB의 소광비에서 가장 좋은 수신감도를 얻을 수 있었다.

분류코드 : OC.010, OC.020.

### I. 서 론

가입자 지역의 데이터 통신 용량의 증가로 기존 국간에서 병목현상을 피하기 위해 도입된 파장분할다중화(WDM) 기술이 도심(Metro) 지역에도 적용되고 있다.<sup>[1]</sup> 200 km 미만의 단거리 지역은 경제성을 고려할 때 장거리 전송에 사용되는 외부변조 방식보다는 저가로 구현이 가능한 직접변조 방식의 송신기가 주로 사용될 수 있다.

반도체 레이저를 직접변조한 송신기에서 소광비와 처핑, 소광비와 SPM은 서로 상관관계를 갖고 있으며 이는 주로 반도체 레이저에 인가되는 바이어스 전류에 의해서 결정된다. 특히, 소광비(Extinction Ratio: EX)와 처핑(Chirping)은 직접변조된 시스템의 전송거리를 제한하는 주된 요소이다. 현재까지 반도체 레이저를 직접변조할 경우 소광비와 처핑이 전송성능에 미치는 영향은 반도체 레이저의 율 방정식(rate equation)을 전산 시뮬레이션 하거나, 처핑으로 인한 변조된 광신호의 발진선폭 증대를 측정하는 것과 같은 간접적인 방법을 통해 주로 연구되었다.<sup>[2-4]</sup>

또한, 단거리 전송의 경우 광증폭기 사용을 배제하므로 최대한의 시스템 마진을 얻기 위해 송신기의 광출력이 높아야 되지만 이는 자기위상변조(Self Phase Modulation: SPM)와 같은 비선형 현상을 유발시킬 수 있다. 지금까지 소광비와 SPM의 관계에 대한 연구는 주로 광증폭기가 다단 연결된 외부변조 방식을 채택한 시스템에 한하여 Split Step Fourier 방법을 이용하여 Nonlinear Schrodinger 방정식을 전산 시뮬레이션<sup>[5]</sup> 하거나 해석적인 방법<sup>[6]</sup>을 통해 수신된 신호의 왜곡을 살펴봄으로써 이루어져 왔다.

본 논문에서는 직접변조된 2.5 Gbit/s 송신기의 반도체 레이저에 인가되는 바이어스 전류를 가변시키면서 소광비와 동적인 처핑을 실험적으로 측정하였고, 이상분산영역(abnormal dispersion region) 전송실험을 통해 소광비와 처핑으로 인한 전송 페널티가 최소가 되는 최적의 바이어스 전류 값이 존재함을 실험적으로 확인했다. 또한, 이상분산 영역 240 km 전송실험을 통해 소광비와 SPM의 상관관계도 고찰하였다.

### II. 소광비와 처핑 및 SPM의 이론적 해석

소광비는 논리적 “1”인 펄스의 평균 광출력에 대한 논리적 “0”인 펄스의 평균 광출력의 비로 정의된다. 채널속도가 2.5 Gbit/s인 경우 국제표준화기구(ITU-T)에서 규정하는 최대 허용소광비는 8.2 dB(6.61, 15%)이다.<sup>[7]</sup> 이는 광출력의 일부가 변조되지 않았음을 뜻하고, 이상적인 무한대의 소광비에 비해 수신기의 신호대 잡음비가 감소함을 의미하므로 수신감도 페널티에 해당된다. 소광비 저하로 인한 광전력 페널티는 식 (1)<sup>[8]</sup>과 같이 주어지므로 8.2 dB의 소광비를 갖는 송신기는 이상적인 무한대의 소광비를 갖는 송신기에 비해 1.3 dB의 소광비 페널티를 갖게 된다.

$$P_{(EX)}[dB] = 10 \log \frac{EX - 1}{EX + 1} \quad (1)$$

이 식에서  $P_{(EX)}[dB]$ 는 소광비로 인한 파워 페널티를 의미하며,  $EX[linear]$ 는 소광비를 나타낸다.

처핑은 광신호의 세기를 On-Off 즉, 강도 변조할 경우 광펄스에 나타나는 주파수 이동을 말한다. 변조된 광펄스에 처핑이 생기면 광펄스가 갖는 주파수 성분이 증가되므로 펄스의 스펙트럼 폭이 처핑이 없는 펄스보다 넓어지게 된다. 직접변

<sup>†</sup>E-mail: gykim@kt.co.kr

조된 반도체 레이저의 처핑은 식 (2)와 같이 펄스에 유기되는 주파수 변이로 나타낼 수 있다.<sup>[29]</sup> 첫 번째 항은 광출력의 시간에 따른 변화에서 기인하는 transient 처핑으로 바이어스 전류가 발진임계전류 이하 또는 근처에서 동작할 경우 주로 생긴다. transient 처핑 성분은 레이저 완화공진 동안 발생하며, 펄스의 leading edge에 높은 주파수 성분(단파장)이 tailing edge에 낮은 주파수 성분(장파장) 옴도록 처핑이 일어난다. 두 번째 항은 광출력의 세기에 비례하는 adiabatic 처핑으로 완화공진주파수(변조전류를 인가한 경우, 레이저 공진기 내의 전자 밀도와 광자밀도가 일정한 위상관계로서 상호작용을 하기 때문에 특정 변조주파수에서 공진을 일으키는 현상)의 허수부에 직접적으로 비례하며 레이저가 발진임계전류보다 충분히 크게 바이어스 된 경우에 주로 생긴다.

$$\Delta\nu = -\frac{\alpha}{4\pi} \left( \frac{d}{dt} \log P(t) + \varepsilon GP(t) \right) \quad (2)$$

여기서,  $\Delta\nu$ 는 frequency variation[Hz],  $\alpha$ 는 linewidth enhancement factor,  $P(t)$ 는 optical power density,  $\varepsilon$ 은 nonlinear gain coefficient [ $m^3$ ],  $G$ 는 threshold mode gain이다.

그림 1(a)는 25°C에서 18 mA의 발진임계전류를 갖는 반도체 레이저에 바이어스 전류 20 mA, 변조신호인 PRBS(패턴 길이: 2<sup>23</sup>-1) 신호의 진폭을 40mAp-p로 인가한 경우 측정된 스펙트럼이다. 변조되기 전의 스펙트럼 폭에 비해 -20 dB 선폭이 단파장쪽으로 약 0.2 nm 넓어진 것을 확인할 수 있다. 그림 1-(b)는 10 mA의 발진임계전류를 갖는 레이저에 바이어스 전류 35 mA, 변조전류 30 mAp-p를 인가한 경우 0.1 nm의 분해능을 갖는 OSA로 측정된 adiabatic 처핑으로 펄스 "ON", "OFF"와 관련된 두 피크가 보여진다.

식 (3)은 광펄스의 군속도와 광섬유 분산과의 상관관계를 나타내는 수식으로 광섬유의 이상분산영역( $D>0$ )을 1550 nm의 중심파장을 갖는 광신호가 진행할 경우 높은 주파수 성분이 낮은 주파수 성분에 비해 더 빨리 진행하고(식 3에서,  $D>0$ ,  $\beta_2<0$ ,  $(dv_g/d\omega)>0$ ), 정상분산영역에서는 반대의 현상이 일어날 수 있음을 보여주고 있다. 따라서, 반도체 레이저를 직접변조할 경우 transient 처핑 성분으로 인해 이상분산영역에서는 광신호의 펄스폭이 처핑이 없는 경우에 비해 더 빨리 넓어진다. 전송한 펄스폭이 넓어지면 최종 수신단에서 인접 비트간에 intersymbol interference(ISI)가 일어나 예러가 생긴다.

$$\beta^2 = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} D, \beta^2 = \frac{d}{d\omega} \left( \frac{1}{v_g} \right) = \frac{1}{v_g^2} \frac{dv_g}{d\omega} \quad (3)$$

여기서,  $\beta_2$ 는 군속도 분산,  $\lambda$ 는 파장[nm],  $C$ 는 광속도[m/sec],  $\omega$ 는 광신호의 주파수[Hz],  $D$ 는 광섬유의 색분산[ps/nm/km],  $v_g$ 는 군속도[m/sec]이다.

직접변조방식에서는 레이저에 인가되는 고속 변조신호에 의해 광전력이 변조되므로 최대한의 소광비를 얻기 위해 반도체 레이저 바이어스 전류를 발진임계전류 근처에서 동작시켜야 한다. 이러한 경우 변조된 광펄스의 위치가 시간축에서 흔들리는 타이밍 지터(timing jitter)외에 레이저 활성영역의 반송자 밀도가 바뀌게 되고 이로 인한 굴절률의 변화가 야기되어 출

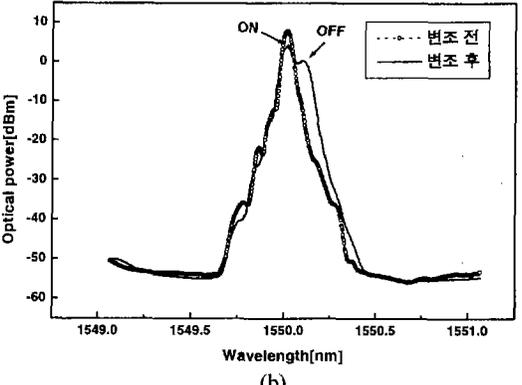
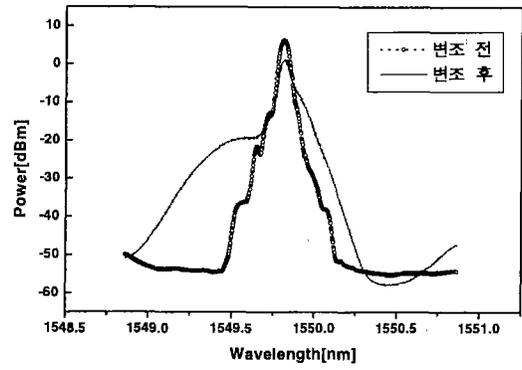


그림 1. 2.5Gbit/s로 직접변조된 DFB-LD의 스펙트럼 특성 (a) 바이어스 전류 = 20 mA, 변조신호 = 40 mAp-p (b) 바이어스 전류 = 35 mA, 변조신호 = 30 mAp-p.

력된 광신호에 transient 처핑이 주도적으로 유발된다. 반면, 바이어스 전류를 발진임계전류 보다 충분히 크게 인가하면 전송 성능에 악영향을 미치는 transient 처핑은 줄어들지만 소광비가 낮아지므로 수신된 광신호의 신호대 잡음비의 저하로 수신 감도가 떨어진다. 따라서, 소광비와 처핑 사이에는 trade-off가 존재한다. 소광비와 처핑은 레이저에 인가되는 구동전류에 의해 결정되므로 소광비와 처핑으로 인한 전송 패널티가 최소가 되는 최적의 레이저 동작 조건이 존재함을 알 수 있다.

그림 2에 반도체 레이저 직접변조시 발생하는 transient 처핑과 SPM에 의해 펄스에 유기되는 처핑의 특성을 비교하였다. 직접변조시 나타나는 transient 처핑에 대해서는 이미 언급하였다. SPM에 의해 야기되는 처핑은 반도체 레이저 직접변조시 나타나는 transient 처핑과 반대로 펄스 leading edge에 낮은 주파수 성분(장파장)이, tailing edge에 높은 주파수 성분(단파장)이 유기된다. 잘 알려진 바와 같이 이러한 펄스는 이상분산영역을 통과하면 처음에는 펄스가 압축되어 펄스폭이 감소하지만 처핑이 최소가 되는 점을 지나면 다시 펄스폭이 증가한다.

### III. 소광비와 처핑의 상관관계

직접변조된 반도체 레이저에 있어 바이어스 전류의 변화에

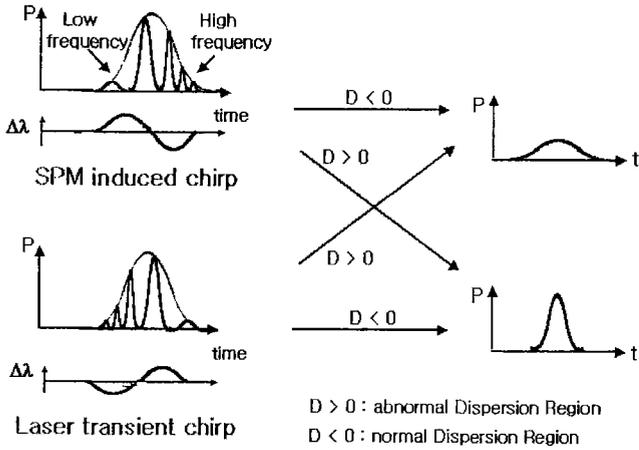


그림 2. Transient 처핑 및 SPM에 의해 유기되는 처핑 특성 비교.

다른 소광비 및 처핑의 변화와 소광비 및 처핑으로 야기되는 전송 패널티를 측정하기 위한 실험 구성도를 그림 3에 나타내었다. 2.5G 송신기는 DFB-LD, 레이저 구동회로(LD Driver), 자동온도제어부(ATC), 자동광출력제어부(APC)로 구성되어 있으며 펄스 발생기(PPG)로부터 출력신호 레벨이 800 mVpp인 2.5G의 전기적 신호를 입력받아 변조된 광신호를 출력시킨다. 사용한 DFB-LD의 특성은 다음과 같다. 발진임계전류는 25°C에서 18 mA 이고 Network analyzer로 측정한 변조 대역폭은 30 mA 바이어스 전류를 인가한 경우 3 GHz이다. 광섬유 마하젠더 간섭계와 RF 스펙트럼분석기를 사용한 self-homodyne detection 방법<sup>[10]</sup>으로 측정한 선폭은 10.3 MHz(@30 mA 바이어스 전류)이며 2.5 Gbit/s 전송속도에서 14% 소광비를 갖도록 변조될 경우  $10^{-10}$  BER(@2 dB 파워 패널티)에서 1800 ps의 분산값을 갖는다. 바이어스 전류는 레이저 구동회로의 바이어스 전압을 제어하여 조정되며 변조신호의 진폭은 40 mAp-p로 고정시켰다. 자동온도제어부와 자동광출력제어부는 각각 온도

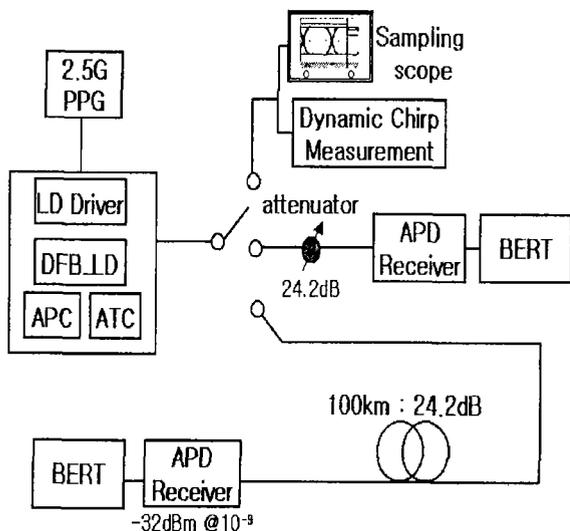


그림 3. 실험 구성도.

변화에 따른 발진파장을 안정화시키고 평균 광출력을 일정하게 유지시키는데 사용된다. 실험에 사용된 광섬유는 단일모드 광섬유로 1550 nm에서 약 17 ps/nm/km의 분산값을 가지며 0.24 dB/km의 평균손실을 갖는다.

소광비 측정은 20 GHz의 대역폭을 갖는 광검출기와 샘플링 스킵프를 사용하여 측정한다. 소광비 측정시 광검출기의 압전류에 의한 오프셋을 보정한 후 2048개의 샘플링 데이터를 평균하여 측정한다. 펄스에 유기되는 순간적인 주파수 변화인 동적 처핑(dynamic chirping)측정은 frequency discriminator를 사용하여 펄스 세기(pulse intensity)와 주파수를 분리하는 방법을 이용하였다.<sup>[11]</sup> Frequency discriminator로 편광유지광섬유(Polarization Maintaining Fiber)로 구성된 150 GHz의 FSR(Free Spectral Range)을 갖는 광섬유 마하젠더 간섭계가 사용되었다. 편광유지광섬유는 PZT에 감겨있고 PZT에 인가되는 전압을 가변시켜 간섭계의 경로차를 조절하였다. 처핑 측정기는 20 MHz에서 65 GHz까지의 처핑을 측정할 수 있다.

그림 4(a)는 실험에 사용된 DFB 레이저에 인가되는 바이어스 전류가 23 mA일 때 2<sup>7</sup>-1 PRBS 패턴에 대해 측정된 동적 처핑으로 펄스 leading edge에 높은 주파수 성분이 생기는 10.6 GHz의 transient 처핑이 유기되는 것을 볼 수 있다. 펄스 trailing edge에 비해 펄스 leading edge에 상대적으로 큰 처핑이 유기되는데 이는 펄스가 "ON"될 경우 완화공진에 의해 펄스 앞쪽의 굴절을 변화가 펄스 뒤쪽에 비해 크기 때문이다. II 절에서 언급한 바와 같이 펄스 leading edge에 높은 주파수 성분이 유기되는 transient 처핑은 펄스의 중심부에 비해 광섬유의 이상분산영역에서 더 빨리 진행하므로 단일모드 광섬유 360 km 진행한 후 그림 4(b)와 같이 펄스폭이 증가하여 인접한 비트간에 ISI를 유발한다.

그림 4(c)는 동일한 DFB-LD에 대해 바이어스 전류를 30 mA 인가한 경우 측정된 처핑으로 adiabatic 성분이 주도적으로 나타남을 볼 수 있다. Transient 처핑이 펄스의 leading edge와 falling edge에 나타난 것과 달리 adiabatic 처핑은 펄스 중심부의 전 영역에 걸쳐 균일하게 나타난다. Adiabatic 처핑으로 인해 논리적 "1" 비트 펄스는 원래 펄스가 갖는 주파수 보다 높은 주파수를 갖게 되고 논리적 "0" 비트는 원래 펄스가 갖는 주파수보다 낮은 주파수를 갖게 된다. 1550 nm의 파장을 갖는 광신호가 이상분산영역을 진행하면 높은 주파수 성분은 빨리 진행하고 낮은 주파수 성분은 늦게 진행되므로 "0" 비트가 "1" 비트를 선행할 경우 "self-steepening" 효과가 발생한다.<sup>[12]</sup> Adiabatic 처핑 성분이 주도적일 경우 "self-steepening" 효과로 인해 펄스가 비대칭적 모양을 갖게되고 수신기의 필터를 통과하면서 시간 지연이 발생하여 그림 4(d)와 같이 아이 다이어그램에 bulge와 double line이 나타난다.<sup>[13]</sup>

DFB-LD를 발진임계전류 근처에서 구동할 경우 주도적으로 나타나는 transient 처핑 성분은 바이어스 전류를 증가시키에 따라 adiabatic 처핑 성분에 의해 점진적으로 가려진다. 이러한 경우, 전송성능은 전송되는 채널에 대한 광섬유 분산영역의 분산부호 보다는 분산의 절대값에 의해 결정된다.

그림 5에 직접변조한 DFB-LD의 바이어스 전류를 발진임계 전류(18 mA)의 1.1배(20 mA)부터 발진임계전류의 2.2배

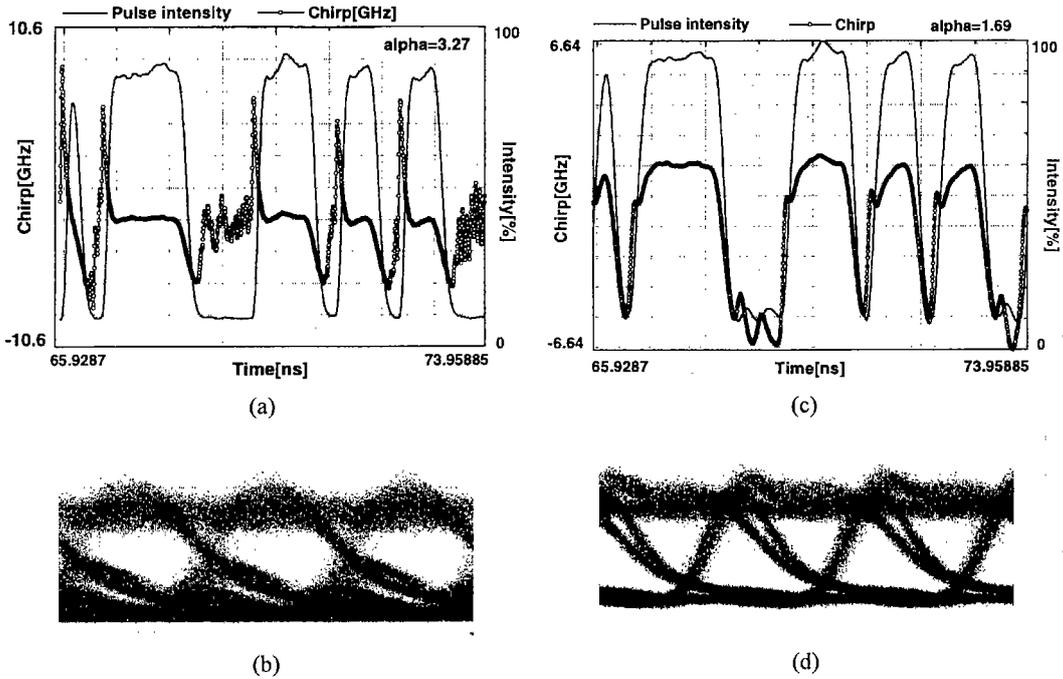


그림 4. 동적인 처핑과 360 km 전송 후 eye 다이어그램 (a),(b) Transient chirp (c),(d) Adiabatic chirp.

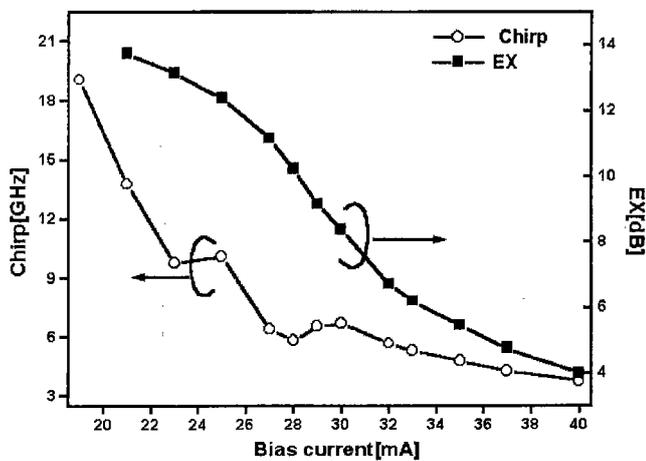


그림 5. 소광비와 처핑의 바이어스 전류 의존성.

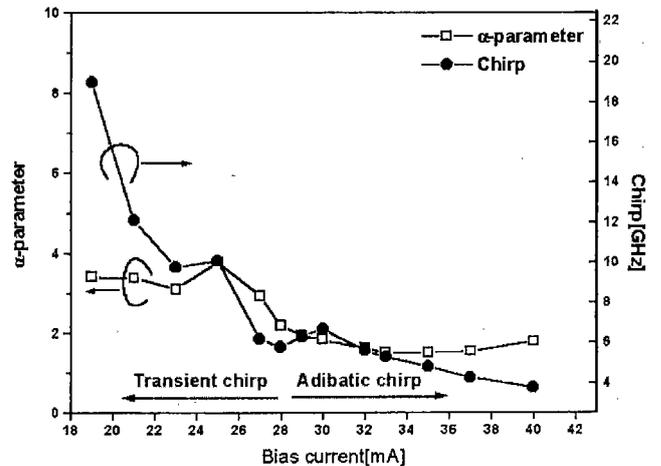


그림 6. 처핑과 선폭증대인자 측정결과.

(40 mA) 까지 변화시키면서 측정한 소광비와 처핑의 바이어스 전류 의존성을 나타내었다. 펄스에 유기되는 처핑의 양은 반도체 레이저 활성영역의 반송자밀도 변화에 의한 굴절률의 변화 정도에 의존하므로 바이어스 전류가 발진임계전류의 1.1배에 대해서는 17 GHz 정도의 처핑이 펄스에 유기되지만 발진 임계전류의 1.4배 이상의 바이어스 전류에 대해서는 7 GHz 이하의 처핑이 펄스에 유기됨을 볼 수 있다. 즉, 바이어스 전류가 증가함에 따라 전송성능에 악영향을 미치는 transient 처핑 성분이 줄어들음을 알 수 있다. 반면 바이어스 전류가 증가할 경우 논리적 "0" 비트에 해당하는 펄스의 광출력이 커지므로 소광비가 감소한다는 것을 알 수 있다. 바이어스 전류 증가에 따른 소광비 감소는 수신기의 신호대 잡음비 감소를 가져와

수신감도 저하를 야기 시킨다. 한편, 바이어스 전류 증가에 따른 처핑 감소는 이상분산영역 전송시 광섬유의 색분산에 의한 펄스폭 증가를 둔화시켜 패널티를 감소시키므로 원하는 전송 성능을 갖기 위한 최적의 바이어스 전류값이 존재함을 알 수 있다.

식 (2)에서 알 수 있듯이 처핑과 광출력을 알면 광출력의 변화에 대해 펄스에 유기되는 처핑의 비로 정의되는 선폭증대인자(linewidth enhancement factor:  $\alpha$ )를 구할 수 있다. 그림 6은 바이어스 전류에 대한 처핑과 선폭증대인자를 측정한 결과이다. 선폭증대인자는 시간의 함수이므로 펄스 세기가 1/2 일 때 측정된 값으로 정한다. Transient 처핑이 주도적일 경우 (대략적으로 바이어스 전류가 28 mA 보다 적게 인가된 경우)

선폭증대인자는 약 3~4 정도의 값을 갖지만, Adibatic 처핑이 주도적일 경우(바이어스 전류가 28 mA 보다 큰 경우) 선폭증대인자는 약 1~2의 더 작은 값을 가짐을 알 수 있다. 선폭증대인자 값이 적다는 것은 변조시 펄스에 유기되는 처핑이 적음을 의미하므로 전송시 처핑에 의한 영향을 줄이려면 선폭증대인자가 작은 값을 갖는 adibatic 처핑 영역에서 레이저를 동작시킬 필요가 있음을 알 수 있다.

소광비와 처핑에 의해서 야기되는 전송 패널티를 비교하기 위해 다음과 같은 실험을 수행하였다. 먼저 Back-to-Back (0 km)에서 바이어스 전류를 변화시키면서 비트 에러율(Bit Error Rate: BER)을 측정하여 소광비에 의한 패널티를 측정한다. 처핑과 광섬유의 색분산으로 인한 패널티는 바이어스 전류를 가변시키면서 100 km 단일모드 광섬유를 전송한 후 BER을 측정하여 계산한다. 이와 같이 측정된 처핑 패널티에는 바이어스 전류 가변에 따른 소광비 패널티가 포함되어 있으므로 실험에 사용된 100 km 단일모드 광섬유 스플의 총 손실(24.2 dB)과 같은 손실을 광가변 감쇠기를 사용하여 감쇄를 준 후 바이어스 전류를 변화시키면서 측정된 패널티를 100 km 스플을 전송한 후 측정된 패널티에서 제외하면 순수하게 처핑으로 발생되는 패널티를 얻을 수 있다.

2.5G 수신기는 광전치증폭기, 3 dB 대역폭이 0.5 nm인 광대역통과필터(OBFP), APD 수신기로 이루어져 있다. 송신기의 출력 광세기는 바이어스 전류가 30 mA일 때 0 dBm이며 바이어스 전류가 18 mA에서 40 mA로 가변될 경우 -5.5 dBm에서 2.5 dBm까지 변한다. 전송 패널티는 송신기와 수신기만을 결합하여 측정된 BER 곡선(Back-To-Back: BTB)과 100 km 스플을 통과한 후 측정된 BER 곡선을 비교해  $10^{-10}$  BER를 얻는데 필요한 수신된 광세기 차로 정의한다.

그림 7에 바이어스 전류를 가변시키면서 측정된 소광비 저하로 인한 패널티와 처핑과 광섬유 색분산의 상호작용으로 인한 패널티 및 이들 두 패널티를 합수적으로 합한 총 전송 패널티를 나타내었다. 이 결과를 참고논문<sup>[4]</sup>에서 전산시뮬레이션을 통해 얻은 결과와 비교하면 실험적으로 측정된 결과와 전산시뮬레이션을 통해 얻은 결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

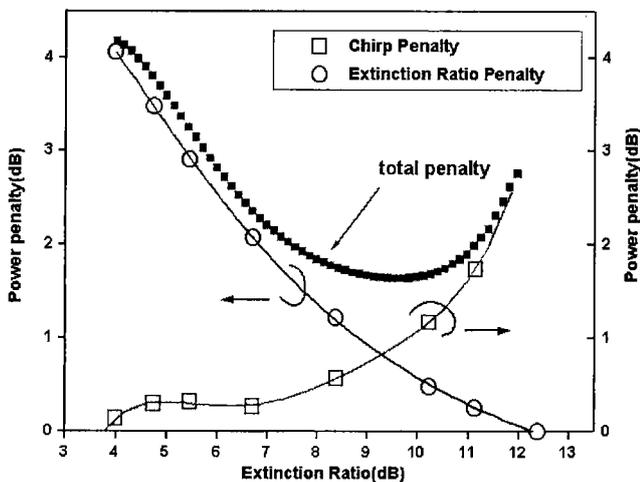


그림 7. 소광비 패널티와 처핑 패널티.

소광비가 증가할 경우는(바이어스 전류가 감소하는 경우) 식 (1)에서 알 수 있듯이 소광비로 인한 패널티는 감소되지만 변조된 펄스에 transient 처핑 성분이 주도적으로 발생하여 처핑 패널티가 증가한다. 반면, 소광비가 감소할 경우(바이어스 전류가 증가하는 경우) 소광비로 인한 패널티는 증가하지만 처핑으로 인한 패널티는 감소함을 알 수 있다. 따라서, 소광비와 처핑으로 인한 총 전송 패널티가 최소로 되는 최적의 바이어스 전류값이 존재함을 알 수 있다. 실험 결과로부터 2.5 Gbit/s 직접변조된 송신기는 8~10 dB의 소광비를 가질 경우(바이어스 전류가 발진문턱전류의 1.5배에서 1.8배) 소광비와 처핑을 인한 총 전송 패널티가 최소가 되어 최적의 전송성능을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이와 같은 소광비 값은 국제표준화기구(ITU-T)에서 권고하는 2.5 Gbit/s 전송속도에 대한 소광비 기준에 잘 부합하는 결과이다.

#### IV. 소광비와 SPM의 상관관계

반도체 레이저 직접변조시 변조된 광신호의 소광비와 광섬유의 비선형 현상인 SPM 사이의 상관관계를 알아보기 위해 동일한 송신기를 사용하여 실험을 수행했다. 실험에 사용된 단일모드 광섬유의 총 길이는 240 km이다. 광전력 증폭기 및 80 km 마다 위치한 광선로 증폭기의 출력광세기는 SPM을 유발시킬 수 있도록 12.5 dBm으로 설정되었다. 높은 광신호대 잡음비를 얻기 위해 광증폭기 다음 단계 ASE 제거 필터를 사용하였으며, 전치증폭기를 사용하여 BER 측정시 발생하는 손실을 보상하였다.

전송거리 증가에 따른 펄스폭 증대는 펄스에 유기된 총 처핑(송신기의 처핑( $\Delta\omega_S(t)$ ) + SPM으로 펄스에 유기되는 처핑( $\Delta\omega_{SPM}(z,t)$ ), 여기서 z: 전송거리,  $\Delta\omega_{SPM}$ 는 입력광세기에 비례하고 입력광세기는 전송거리에 따라 지수함수적으로 줄어들므로  $\Delta\omega_{SPM}$ 는 전송거리의 함수이다.)과 광섬유의 색분산과의 상호작용으로 일어난다. 송신기의 처핑은 소광비가 12.4 dB 일 때는 transient 처핑이 주도적이고 6.7 dB 쪽으로 소광비가 낮아질 경우 adibatic 처핑이 주도적으로 나타난다. SPM으로 인해 펄스에 유기되는 처핑은 II절에서 언급한 바와 같이 transient 처핑과는 반대의 특성을 갖는다. 따라서 SPM을 고려할 경우는 총 처핑의 크기와 부호가 이상분산 영역 전송시 펄스 퍼짐 또는 펄스 압축을 결정한다. 즉, 전송거리 증가에 따라 수신감도 저하 또는 향상을 결정한다.

그림 8에 소광비가 각각 6.7, 8.4, 10.2, 12.4 dB인 경우에 대해 40 km 간격으로  $10^{-10}$  BER에서 측정된 수신감도를 나타내었다. 먼저, Back-to-Back(0 km)의 경우를 살펴보면, 식 (1)에서 알 수 있듯이 소광비에 의한 수신감도는 소광비가 클수록 수신감도가 낮아짐을 알 수 있다. 이상분산 영역을 전송할 경우, 변조된 광신호가 12.4 dB의 소광비를 가질 경우 SPM효과가 나타나더라도 큰 transient 처핑으로 인해 40 km이상 전송하면 수신감도가 급격히 저하된다. 소광비가 10.2 dB인 경우, 80 km 까지는 송신기의 처핑이 SPM으로 인해 펄스에 유기되는 처핑보다 주도적이어서 이상분산 영역에서 펄스폭 증가가 나타나 수신감도가 저하된다. 그러나, 80 km~120 km 구간

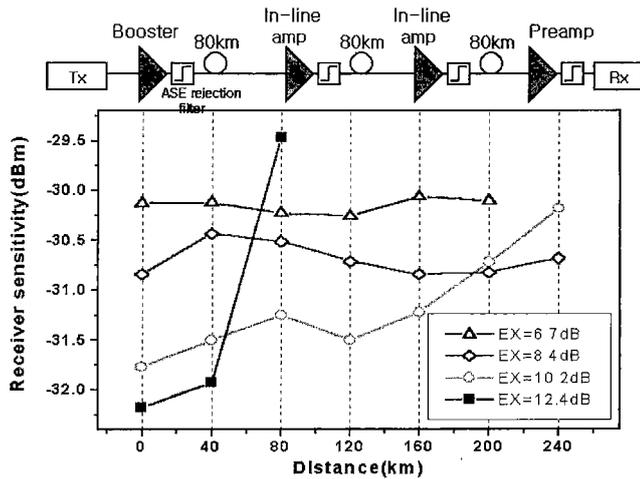


그림 8. SPM을 고려한 경우 소광비에 따른 수신감도 측정결과.

은 SPM 효과가 주도적이어서 펄스폭 압축이 일어나 수신감도가 향상되지만 120 km 이후 부터는 SPM에 의한 처핑이 송신기 처핑과 같은 방향으로 일어나 색분산으로 인한 펄스폭이 급격히 증가하여 수신감도가 빠르게 저하됨을 알 수 있다. 8.4 dB의 소광비를 가질 경우, 송신기의 transient 처핑이 10.2 dB 소광비에 비해 적고(상대적으로 adiabatic 처핑이 증가) 총 처핑 중에서 SPM으로 인한 처핑이 주도적으로 나타나 펄스가 압축되는 효과가 짧은 거리(40 km 이후)부터 나타나고, 또한 이상분산영역 전송을 통한 펄스 압축효과가 지속되는 거리도 200 km까지 증가함을 알 수 있다. 200 km 이후 부터는 SPM에 의한 처핑이 송신기의 처핑과 같은 방향을 갖게되어 펄스폭이 증가로 인한 수신감도 저하를 약간씩 볼 수 있다. 소광비가 6.7 dB인 경우, 전체적으로 소광비 저하로 인한 수신감도는 다른 소광비에 비해 나쁘지만 전송성능에 악영향을 미치는 transient 처핑이 거의 없어 SPM으로 인한 펄스 압축이 빠르게 나타나고 또 오랫동안 지속되어 수신감도가 전송거리 증가에 따라 나빠지지 않고 대략적으로 일정한 값을 가짐을 알 수 있다. 따라서, 2.5 Gbit/s로 직접변조된 송신기를 사용하는 본 실험과 같은 구성조건에서 SPM을 고려한 경우 거리가 200 km 미만의 단거리 지역은 10.2 dB의 소광비를 갖는 경우가 전송성능이 더 우수하지만 200 km 이상을 전송하고자 할 경우는 8.4 dB의 소광비를 갖도록 레이저 동작조건을 설정하는 것이 수신감도 측면에서 더 유리함을 알 수 있다.

### V. 결 론

2.5 Gbit/s 직접변조 방식을 채택한 송신기의 경우 전송거리를 최대로 증가시키기 위해서는 최대의 소광비와 최소의 처핑을 갖도록 반도체 레이저 동작조건을 설정할 필요 있다. 본 논문에서는 단거리 전송에 사용될 직접변조된 2.5 Gbit/s 송신기의 DFB-LD에 인가되는 바이어스 전류의 변화에 따른 소광비와 동적인 처핑 특성을 측정하였다. 바이어스 전류를 변화시키면서 Back-to-Back에서 측정된 소광비 패널티와 단일모드 광섬유 100 km를 전송한 후 처핑으로 인해 유발되는 패널티

를 측정된 결과 8~10 dB의 소광비(바이어스 전류가 발진입계 전류의 1.5배에서 1.8배)를 가질 경우 소광비와 처핑을 인한 총 전송 패널티가 최소가 됨을 확인했다. 또한 SPM을 유발시킬 수 있는 충분한 광세기(+12.5 dBm)를 갖는 직접변조된 광신호를 240 km 이상분산 영역 전송 실험을 통해 소광비와 SPM의 상관관계를 알아보았다. 본 실험과 같은 조건에서는 200 km 미만의 단거리 지역에서는 변조된 광신호의 소광비가 10.2 dB인 경우가 8.4 dB의 소광비를 갖는 경우보다 수신감도가 좋지만, 200 km 이상의 이상분산 영역을 전송할 경우는 8.4 dB의 소광비를 갖도록 레이저 동작조건을 설정하는 것이 수신감도 측면에서 더 유리함을 알 수 있었다.

### 참고문헌

- [1] T. Thakur, "Deploying metro DWDM systems," in *National Fiber Optic Engineers Conference 2000*, Denver, USA, pp. 198-203, 2000.
- [2] B. W. Hakki, "Evaluation of transmission characteristics of chirped DFB lasers in dispersive optical fiber," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 10, no. 7, pp. 964-970, 1992.
- [3] S. Mohrdiek, H. Burkhard, F. Steinhagen, H. Hillmer, R. Losch, W. Schlapp, and R. Gobel, "10-Gb/s standard fiber transmission using directly modulated 1.55- $\mu$ m quantum-well DFB lasers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 7, no. 11, pp. 1357-1359, 1995.
- [4] P. J. Corvini and T. L. Koch, "Computer Simulation of High-bit-rate optical fiber transmission using single-frequency lasers," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 5, no. 11, pp. 1591-1595, 1987.
- [5] Z. Li, Y. He, B. F. Jorgensen, and R. J. Pedesen, "Extinction ratio effect for high-speed optical fiber transmissions," in *International Conference on Communication Technology*, Beijing, Chian, 1998.
- [6] N. Kikuchi and S. Sasaki, "Analytical evaluation technique of self-phase-modulation effect on the performance of cascaded optical amplifier systems," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 13, no. 5, pp. 868-878, 1995.
- [7] ITU-T Recommendation G.692, "Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers," 1998.
- [8] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems* (Wiley-Interscience Publication, 1992), pp. 170-171.
- [9] N. Suzuki and T. Ozeki, "Simultaneous compensation of laser chirp, Kerr effect, and dispersion in 10 Gbi/s long-haul transmission systems," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 11, no. 9, pp. 1486-1494, 1993.
- [10] D. M. Baney and W. V. Sorin, "Linewidth and power spectral measurements of single-frequency lasers," *Hewlett-Packard Journal*, February, pp. 92-96, 1990.
- [11] R. A. Saunders, J. P. King, and I. Hardcastle, "Wideband chirp measurement technique for high bit rate sources," *IEEE Electron. Lett.*, vol. 30, no. 16, pp. 1336-1338, 1994.
- [12] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics* (Academic Press, New York, 1995), pp. 113-120.

## The effect of extinction ratio, chirp and SPM on transmission performance of directly modulated 2.5 Gbit/s transmitter

Geun Young Kim<sup>†</sup> and Yong-Gi Lee

*Access Network Laboratory, Korea Telecom, Taejeon 305-348, KOREA*

<sup>†</sup>*E-mail: gykim@kt.co.kr*

(Received March 20, 2001 ; Revised manuscript received May 12, 2001)

We experimentally investigated the dependence of extinction ratio and chirp on bias current which was injected into DFB-LD in a directly modulated 2.5 Gbit/s transmitter. Through the abnormal dispersion transmission, we found that transmission power penalty is minimized at 8~10 dB extinction ratio (bias current at 1.5~1.8 fold above threshold current). Also, we discussed the relation between extinction ratio and self phase modulation (SPM) through the 240 km abnormal dispersion transmission. When SPM takes effect, we obtained the best receiver sensitivity for specific system configuration at 10.4 dB and 8.4 dB extinction ratio, below and above 200km transmission distance, respectively.

*Classification codes* : OC.010, OC.020.