

## 광 NRZ 송신기의 전송 특성에 관한 연구

### A Study on Transmission Performance for Optical NRZ Transmitters

이동수\*

Dong-Soo Lee\*

**요약** 본 논문은 마크-젠더 변조기를 사용하여 광 신호를 생성하는 광 NRZ(nonreturn-to-zero) 송신기의 전송 특성을 이론적으로 분석하였다. 특히 단일 모드 광섬유를 통하여 분산 보상 방법 없이 1550nm 파장에서 25Gbps 광 NRZ 신호를 전송하고 그 성능을 chirp을 나타내는  $\alpha$ -계수와 마크-젠더 변조기의 구동 전압비(=구동 전압/스위칭 전압)의 영향을 고려하여 평가하였다. 분산을 개선하기 위하여 음의 값을 가진  $\alpha$ -계수를 사용하고 그 값들과 함께 구동 전압비의 크기를 적절히 조정하여 최적화된 상태에서 성능 개선을 시험하였다. 개선된 전송 성능은 비트 오류율(Bit Error Rate)과 광 아이 다이어그램으로 확인되었다.

**Abstract** This paper presents a theoretical study of transmission performance for an optical NRZ (nonreturn-to-zero) transmitter employed a Mach-Zehnder modulator. Especially, we have investigated the effects of the  $\alpha$ -parameters that represents the chirps and the driving voltage ratios(=driving voltage/switching voltage) of Mach-Zehnder modulators for transmitting 25Gbps optical NRZ signals at a wavelength of 1550nm without any dispersion compensation methods over single mode fiber. By optimizing the negative values of  $\alpha$ -parameters for the dispersion tolerance with the change of driving voltage ratios, it has been tested whether the transmission performance has improved. We have verified the improvement by the BERs and the optical eye diagrams.

**Key Words** : optical NRZ transmitter, Mach-Zehnder modulator,  $\alpha$ -parameter, driving voltage ratios, dispersion tolerance, BER, optical eye diagram

## 1. 서론

인터넷 데이터의 폭발적 수요 증가로 교통량에 대한 관심과 함께 고속의 광통신 시스템은 도심지와 액세스 망에서 발전이 계속되고 있다. 요즘에는 25Gbps의 광 신호에 기반을 둔 고속 광통신이 급속한 발전 양상을 보이고 있는데 100GB 이더넷(Ethernet)에 포함 된 100GBASE-LR4 와 100GBASE-ER4가 단일 모드 광섬

유(SMF: Single Mode Fiber)를 통한 4채널 25Gbps 광 신호 WDM(Wavelength Division Multiplexing)에 근간을 이루고 있다<sup>[1]</sup>. 그러나 단일 모드 광섬유를 통한 1550nm 파장대의 25Gbps 광 신호 전송은 GVD(Group Velocity Dispersion)에 의하여 심각한 신호 왜곡(distortion) 영향을 받는다. 이러한 색 분산(chromatic dispersion)의 신호 왜곡은 광섬유를 따라 진행되는 고속 광 신호의 성능 저하(degradation)를 초래하고 결국 광통신 시스템의

\*정회원, 김포대학교 항공전자제어과  
접수일자 2015년 8월 26일, 수정완료 2015년 9월 26일  
게재확정일자 2015년 10월 9일

Received: 26 August, 2015 / Revised: 26 September, 2015 /

Accepted: 9 October, 2015

\*Corresponding Author: dslee@kimpo.ac.kr

Dept. of Avionics, Kimpo University, Korea

데이터율과 전송 거리를 제한한다. 그러므로 색 분산을 보상하여 제한 요소를 극복하는 방법이 꾸준히 연구 되고 있는데 그 중 한 방법은 광 듀오바이너리 송신기와 같은 분산 내성이 큰 광 송신기를 사용하는 것이다<sup>[2]</sup>. 그러나 광 듀오바이너리 송신기에서는 추가적인 전기 부품인 프리코더(precoder)와 저역 통과 필터(Low Pass Filter) 등이 필요하고 높은 구동 전압 운용에 필요한 전력 증폭기 등을 사용해야하므로 비용 증가와 복잡성이 요구된다. 또 다른 방법으로는 광 NRZ 송신기를 사용하여 chirp을 이용하는 방법이다. 특히 negative chirp이 색 분산으로 야기된 신호 왜곡을 보상해 줄 수 있기 때문이다. 즉 적절한 negative chirp을 이용하면 색 분산에 의해 발생한 펄스 퍼짐 현상을 제거하여 원래의 신호 파형을 복원함으로써 원거리 전송을 할 수 있기 때문이다. 이러한 chirp과 연관되어 분산에 영향을 주는 요소가  $\alpha$ -계수( $\alpha$ -parameter)이다<sup>[3]</sup>.  $\alpha$ -계수는 아래의 식처럼 표현할 수 있는데  $\psi$ 는 위상 변화,  $s$ 는 순간 광 출력 강도,  $t$ 는 시간,  $\lambda$ 는 파장 그리고  $c$ 는 광속을 의미한다.

$$\alpha = \frac{2 \frac{d\psi}{dt}}{\frac{1}{s} \frac{ds}{dt}} = \frac{4\pi(-\frac{c}{\lambda^2} \delta\lambda)}{\frac{1}{s} \frac{ds}{dt}} \quad (1)$$

색 분산 측면에서 야기된 분산 내성을 개선할 수 있는 또 다른 요소로는 구동 전압비(driving voltage ratios)가 있다. 마크-젠더 변조기의 구동 전압비는 스위칭 전압( $V_{\pi}$ )와 구동 전압( $V_A$ ,  $V_B$ )과의 비로 정의할 수 있는데 전송 성능에 영향을 주는 중요한 요소로 구동 전압비를 조정함으로써 분산 내성을 증대시켜 전송 거리를 증가시키는 연구가 꾸준히 진행되고 있다<sup>[4]</sup>.

본 논문에서는 색 분산에 영향을 주는  $\alpha$ -계수와 마크-젠더 변조기의 구동 전압비를 함께 고려하여 분석함으로써 색 분산의 문제점을 개선하려고 시도하였다. 즉 두 변수 간의 최적화된 상태를 제시하여 25Gbps 광 NRZ 송신기로 전송한 광 신호가 낮은 비트 오류율로 광섬유 내를 진행 하도록 분산 내성을 증대시키는 방법을 모색하였다. 2장에서는 광 NRZ 송신기와 모의실험을 위한 전송 시스템을 구성하였다. 3장에서는  $\alpha$ -계수와 구동 전압비가 전송 성능에 미치는 영향을 비트 오류율(BER)과 광아이 다이어그램(optical eye diagram)으로 분석하였다. 마지막 4장에는 결론을 기술하였다.

## II. 광 NRZ 송신기와 시스템 구성

### 1. 광 NRZ 송신기

광 통신 시스템에서 가장 많이 사용되고 있는 송신기가 그림 1과 같은 NRZ 변조 방식의 송신기이다. 이 방식은 추가 소자 없이 NRZ 데이터를 직접 마크-젠더 변조기에 주입하는 방식으로 데이터 속도가 10Gbps 이상으로 증가하면 색 분산으로 인해 단일 모드 광섬유에서 전송 거리 제한이 크지만 분산 내성이 강한 광 듀오바이너리 방식과 비교하여 전체 시스템이 복잡하지 않고 비용이 저렴하다는 장점이 있다<sup>[5]</sup>.

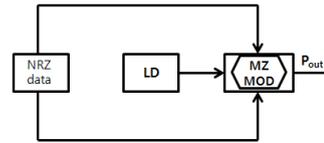


그림 1. 광 NRZ 송신기  
Fig. 1. Schematic diagram of the optical NRZ transmitter

### 2. 전송 시스템의 구성

광 NRZ 신호의 전송 모의실험을 위하여 그림 2처럼 광 링크(optical link)를 구성하였다. 광 신호는 1550nm 파장을, 광섬유는 단일 모드 광섬유를 사용하여 전송하였다. 외부 변조기는 LiNbO<sub>3</sub> 마크-젠더 변조기를 사용하여 25Gbps에서 변조하였다. 마크-젠더 변조기는 일반적으로  $V_{\pi}/2$ 의 바이어스 전압을 가지고 push-pull 방식으로 동작 하는 데 스위칭 전압은 일반적인 상용 변조기에서 사용하는 4V를 사용하였다. 그리고 Gain-flattened EDFA(Erbium Doped Fiber Amplifier)를 사용하여 광섬유 입사 전력(launching power)을 조절하였다. 단일 모드 광섬유 내에서 펄스 전송은 Split-step Fourier method(SSFM)에 의해서 비선형 Schrödinger 방정식을 풀이 한 것을 모델로 하였다<sup>[6]</sup>. 단일 모드 광섬유의 색 분산 계수는 17ps/nm/km, 분산 기울기는 0.033 ps/nm<sup>2</sup>/km이었다. 전송 성능의 측정은 17.5GHz 대역폭을 가진 4차 베셀 톱슨 필터와 함께 p-i-n 수신기를 사용하여 10<sup>-9</sup> BER에서 수신 감도(receiver sensitivity)를 측정 평가하였다.

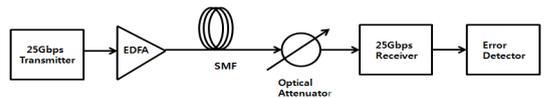


그림 2. 광 NRZ 신호 전송을 위한 광 링크 구성도  
Fig. 2. A link configuration of the optical NRZ system

색 분산의 비선형 현상은 배제하였고  $\alpha$ -계수가 negative chirp이 되도록 하고 구동 전압비는 이러한  $\alpha$ -계수에 대하여 크기를 변화 시키가면서 전체적인 영향을 관찰하였다.

### III. 모의실험 및 결과

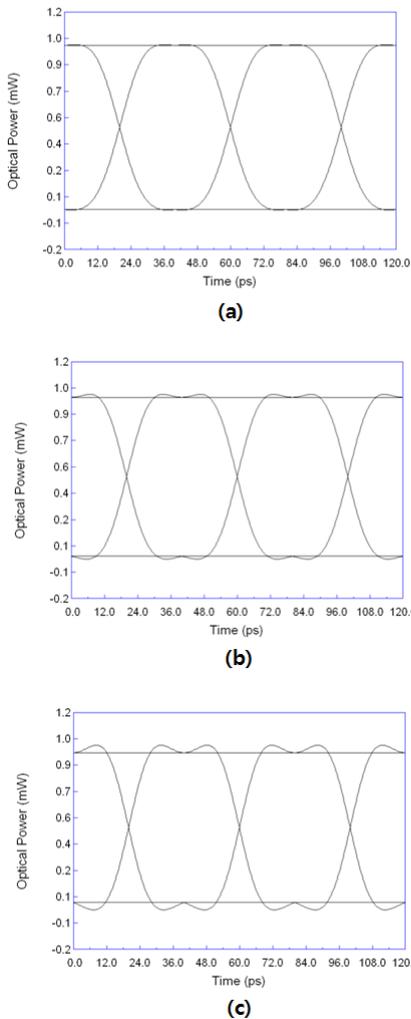


그림 3. back-to-back에서  $\alpha$ -계수가  $-0.314$ 일 때 구동 전압비에 따른 광 아이 다이어그램 (a)50% (b)55% (c)60%

Fig. 3. Calculated optical eye-diagrams at back-to-back and the  $\alpha$ -parameter =  $-0.314$  with the driving voltage ratio (a)50% (b)55% (c)60%

그림 3은 back-to-back에서  $\alpha$ -계수 값이  $-0.314$ 일 때 구동 전압비에 따른 광 아이 다이어그램을 나타낸다. 그림에서 구동 전압비가 증가 할수록 눈의 상승과 하강 시간(rising and falling times)이 감소하는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 음의 값을 가진  $\alpha$ -계수는 시간 영역에서 펄스 압축 효과를 가져 오는 데 그림에서처럼 구동 전압비의 증가로 짧아진 상승과 하강 시간은 더 넓은 광 스펙트럼 분포를 갖게 하여 비교적 커진 분산에 의한 펄스 퍼짐과  $\alpha$ -계수의 chirp으로 인한 펄스 압축과의 상쇄를 어렵게 하기 때문에 분산 내성을 악화시켜서 시스템의 성능 저하를 초래한다.

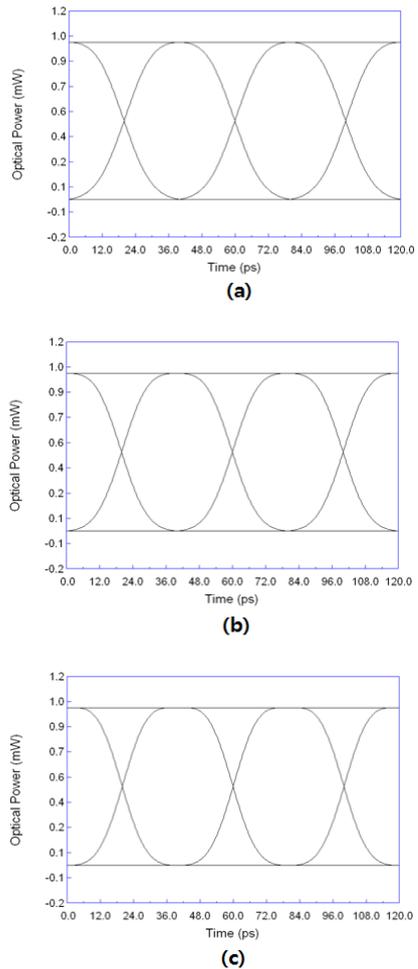


그림 4. back-to-back에서  $\alpha$ -계수가  $-0.69$ 일 때 구동 전압비에 따른 광 아이 다이어그램 (a)50% (b)55% (c)60%

Fig. 4. Calculated optical eye-diagrams at back-to-back and the  $\alpha$ -parameter =  $-0.69$  with the driving voltage ratio (a)50% (b)55% (c)60%

그림 4는  $\alpha$ -계수가 -0.69일 때 back-to-back에서 구동 전압비에 따른 광 아이 다이어그램을 나타낸다.  $\alpha$ -계수가 -0.314의 경우처럼 구동 전압비의 증가에 따라 눈의 상승과 하강 시간이 감소하는 모습을 보였으나 상대적으로 감소 정도가 크지 않았다. 즉  $\alpha$ -계수 음의 값 증가가 전송 거리 향상에 도움을 줄 수 있다. 왜냐하면 긴 상승과 하강 시간은 좁은 스펙트럼 분포로 비교적 작은 분산을 갖게 되어  $\alpha$ -계수에 의한 펄스 압축과 상쇄를 할 수 있기 때문이다.

표 1.  $\alpha$ -계수와 구동 전압비의 변화에 따른 수신감도  
Table 1. BER by the various values of the  $\alpha$ -parameters and the driving voltage ratios

$\alpha$ -계수	구동전압비	BER(back-to-back)
-0.314	40%	-18.818
	45%	-19.046
	50%	-19.161
	55%	-19.168
	60%	-19.031
-0.69	45%	-18.557
	50%	-18.814
	55%	-19.006
	60%	-19.129
	65%	-19.174
-1.82	70%	-19.154
	60%	-18.774
	65%	-18.945
	70%	-19.073
	75%	-19.148
	80%	-19.176
	85%	-19.16

표 1에서는  $\alpha$ -계수<sup>[3]</sup>에 대하여 back-to-back 상태에서 BER을 보여주고 있다.  $\alpha$ -계수가 음의 큰 값을 가질 수록 구동 전압비도 다소 커져야 BER이 양호해 짐을 알 수 있었다. 그러나 적절한 값의 구동 전압비보다 큰 구동 전압비를 사용하면 오히려 BER이 나빠지는 결과를 보였다.

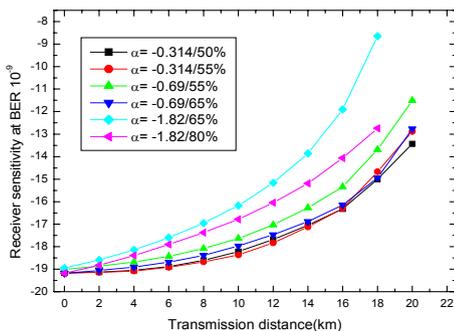


그림 5. 비트 오류율  $10^{-9}$ 에서  $\alpha$ -계수와 구동 전압비의 최적화 상태에서 전송 거리에 따른 수신 감도

Fig. 5. Receiver sensitivities as a function of a transmission distance with the optimization of the  $\alpha$ -parameters and the driving voltage ratios at the BER of  $10^{-9}$

그림 5에서는  $\alpha$ -계수와 이에 부합되는 적절한 구동 전압비에 대하여 전송 거리에 따른 수신 감도를 나타낸다. 그림에서 음의 값이 상대적으로 큰  $\alpha$ -계수를 사용한 경우 수신 감도가 비례적으로 양호해 지지 않았다. 이는  $\alpha$ -계수가 의미하는 negative chirp이 전송 거리가 증가함에 따라 그 크기가 줄어들어 펄스 압축의 효과를 작게 하기 때문이기도 하지만 구동 전압비에 의한 영향으로 사료된다.

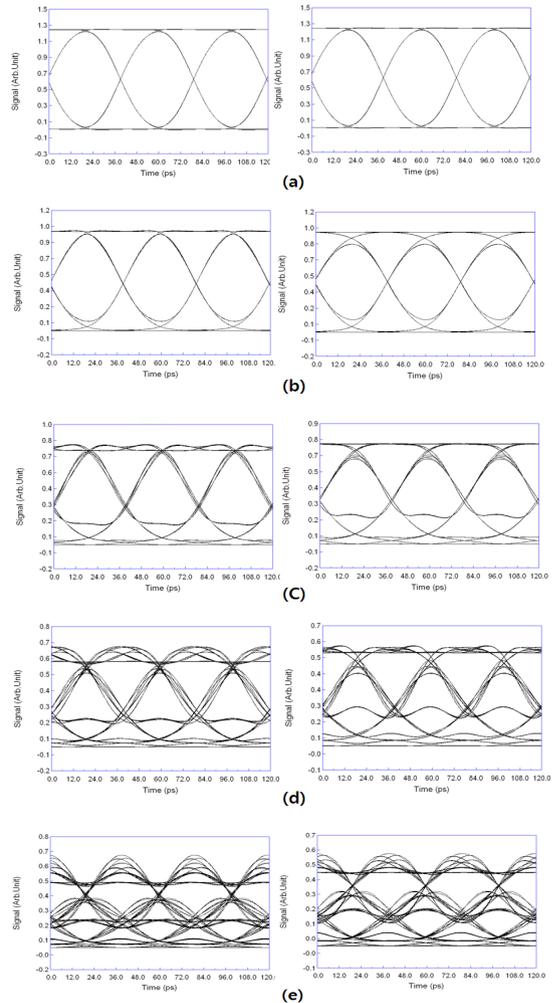


그림 6.  $\alpha$ -계수가 -0.69이고 구동 전압비가 65%일 때와  $\alpha$ -계수가 -1.82이고 구동 전압비가 80%일 때 전송 거리에 따른 광 아이 다이어그램 (a)5km (b)10km (c)15km (d)20km

Fig. 6. Calculated optical eye-diagrams with the  $\alpha$ -parameter = -0.69, the driving voltage ratio 65% and the  $\alpha$ -parameter = -1.82, the driving voltage ratio 80% at (a)5km (b)10km (c)15km (d)20km

그림 6에서는  $\alpha$ -계수와 적절한 구동 전압비로 최적화 된 상태에서 거리에 따른 광 아이 다이어그램을 나타낸다. 두 경우 모두 전송 거리가 증가함에 따라 눈의 0 레벨과 1 레벨(mark level)에 동시에 영향을 주어 눈 열림을 작게 하였으나  $\alpha$ -계수와 구동 전압비가 큰 경우 (-1.82/80%)에는  $\alpha$ -계수와 구동 전압비가 작은 경우 (-0.69/65%)보다 1 레벨(mark level)의 감소가 더 심했다.

전송 거리가 더 증가되면서(15km이상)  $\alpha$ -계수와 구동전압비가 큰 경우 급격한 0 레벨의 증가로  $\alpha$ -계수와 구동전압비가 작은 경우보다 더 빨리 눈이 작아졌다. 이러한 현상은 구동 전압비와 밀접한 관련이 있는 소광비(extinction ratio)에 의한 것이다. 0 비트와 1 비트의 광 전력 차이에 의해서 결정되는 소광비가 순간(instantaneous) chirp의 크기를 결정할 수 있기 때문이다<sup>[4]</sup>. 즉  $\alpha$ -계수와 구동 전압비가 작은 경우가 상대적으로 과도한 순간 chirp의 크기를 줄일 수 있기 때문에 전송거리가 증가하면서 더 양호한 결과를 나타냈다.

#### IV. 결 론

마크-젠더 변조기를 사용하여 25Gbps 광 NRZ 신호를 전송하는 송신기로 구성된 광전송 시스템의 성능을  $\alpha$ -계수와 구동 전압비의 관점에서 살펴보았다. 광 NRZ 전송 시스템의 경우 분산 내성을 증대시키기 위해서는 negative chirp을 사용하므로 음의 값을 가진  $\alpha$ -계수를 고려해야할 뿐만 아니라 동시에 구동 전압비를  $\alpha$ -계수에 부합되도록 해야 한다. 즉  $\alpha$ -계수의 음의 값 크기가 커지면 그에 따라 증가된 구동 전압비를 사용하여 최적화함으로써 수신 감도를 개선하여 분산 내성이 증대된 광 신호를 단일모드 광섬유를 통하여 보낼 수 있다.

#### References

[1] Beomsoo Shin, Jichai Jeong, Jaehoon Lee, "25-Gb/s optical NRZ transmission over 40km of single-mode fiber at 1550nm without dispersion

compensation," Optical Fiber Technology 20(2014) 461-466

[2] Yu Chang Lu, Chia Chien Wei, Jason Chen, Kai Ming Feng, Pao Chai Yeh, Tzu Yen Huang, Ching Cheng Chang, Cheng Tsao, Sien Chi, "Effects of filter bandwidth and driving voltage on optical duobinary transmission systems," Optical Fiber Technology 13(2007) 231-235

[3] Jichai Jeong and Y. K. Park, "Accurate determination of transient chirp parameter in high speed digital lightwave transmitters," Electronics Letters(1997) Vol.33 No.7 605-606

[4] Hyunwoo Yoo, Junhyop Song, Yonghoon Kim, Jichai Jeong, Jaehoon Lee, "Improved dispersion tolerance of Mach-Zehnder modulator by optimizing the modulator voltage and time delay," Optics Communications 283(2010) 1316-1319

[5] Debabrata Sikdar, Vinita Tiwari, V.K. Chaubey, "Investigation of RZ and NRZ pulse shape for optimum Duobinary transmission at 40 Gbp," Optik 124 (2013) pp. 1148-1151

[6] G. P. Agrawal, Fiber-Optic Communication Systems, Wiley, New York 2010.

#### 저자 소개

##### 이 동 수(정회원)



- 고려대학교 전자공학과 학사
  - Univ. of Minnesota 공학석사
  - 고려대학교 공학박사
  - 2000년 ~ 현재 : 김포대학교 항공전자 제어과 교수
- <주관심분야 : 유·무선통신, 광소자>

※ 이 논문은 2015학년도 김포대학교 연구지원비에 의하여 연구되었음.