

NRZ 형식과 RZ 형식에 따른 WDM 채널 왜곡의 보상 특성

The Compensation Characteristics of WDM Channel Distortion Dependence on NRZ Format and RZ Format

이 성 렬 · 조 성 언*

Seong-Real Lee · Sung-Eon Cho*

요 약

HNL-DSF(Highly Nonlinear Dispersion Shifted Fiber) 광 위상 공액기를 이용한 MSSI(Mid-Span Spectral Inversion) 기법이 적용된 320 Gbps WDM 시스템에서 전송 형식으로 각각 NRZ와 RZ를 사용하는 경우 채널 입력 전력, 광섬유 분산 계수, 전송 거리 변화에 따른 보상 특성을 분석해 보았다. 우선 광섬유의 분산 계수가 비교적 낮은 WDM 시스템에서는 파형 형식이 RZ인 경우가 NRZ인 경우보다 더욱 높은 전력의 신호에 대해서도 고품질 전송이 가능하다는 것을 알 수 있었다. 두 번째 광섬유로 입사되는 공액파의 전력이 낮은 채널들에 대한 보상 효과 감소가 광섬유의 분산 계수가 클수록, 그리고 NRZ 형식보다는 RZ 형식에서 더욱 두드러지게 나타나고, 그로 인해 전체 채널의 고품질 전송을 보장하는 광섬유의 분산 계수가 제한되어야 한다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 광섬유의 분산 계수가 작은 WDM 시스템에서는 RZ 형식이, 광섬유의 분산 계수가 큰 WDM 시스템에서는 NRZ 형식이 장거리 전송에 적합하다는 것을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we investigated the characteristics of compensation for distorted NRZ signal and RZ signal in 320 Gbps WDM system as a function of channel input power, fiber dispersion coefficient and transmission length, respectively. The considered WDM transmission system is based on mid-span spectral inversion(MSSI) compensation method having highly nonlinear dispersion shifted fiber(HNL-DSF) optical phase conjugator(OPC) in the mid-way of total transmission line. We confirmed that the signal input power range compensated by MSSI is broadened by using RZ as a signal format in WDM system with small fiber dispersion coefficient. The range of fiber dispersion coefficient compensating overall distorted WDM channels is limited, because degree of compensation for distorted channel with low conjugated-wave power becomes gradually degrade as fiber dispersion coefficient becomes gradually higher. It is showed that RZ format and NRZ format is suited for long-haul transmission in WDM system with small fiber dispersion coefficient and with large fiber dispersion coefficient, respectively.

Key words : NRZ, RZ, WDM Channel Distortion, Mid-Span Spectral Inversion(MSSI), Eye Opening Penalty(EOP)

I. 서 론

광섬유의 색 분산과 자기 위상 변조(SPM: Self Phase Modulation)에 기인하는 광 펄스의 왜곡을 보

상하는 여러 가지 기법 중 광 전송 링크 중간에 광 위상 공액기(OPC: Optical Phase Conjugator)를 사용하는 MSSI(Mid-Span Spectral Inversion) 기법은 매우 우수한 성능의 신호로 보상할 수 있다는 장점을 갖

(주)ATN 기술연구소(Advanced Traffic Network Co. Ltd.)

*순천대학교 정보통신공학부(School of Inform. and Telecomm., Suncheon National Univ.)

· 논문 번호 : 20030805-110

· 수정완료일자 : 2003년 9월 18일

고 있다^{[1],[2]}. 또한 MSSI에서 OPC 위치에 대한 비선형 효과의 비대칭성 때문에 기인하는 SPM에 의한 왜곡 보상에서의 한계는 OPC를 중심으로 한 첫 번째 전송 링크와 두 번째 전송 링크에서의 평균 전력을 같게 하는 경로 평균 강도 근사법(PAIA: Path-Averaged Intensity Approximation)을 적용함으로써 해결될 수 있다^{[3],[4]}.

PAIA MSSI에서 신호파를 공액파(conjugated wave)로 변환해 주는 OPC의 비선형 매질로 전통적인 분산 천이 광섬유(DSF: Dispersion Shifted Fiber) 대신에 HNL-DSF(Highly Nonlinear Dispersion Shifted Fiber)를 사용하고, 전송 거리, 광섬유 분산 계수 등의 시스템 파라미터와 관련해 OPC에서의 펌프 광 전력을 적절히 선택하면 고품질 광대역 WDM 전송이 가능하다^[5]. 즉 총 전송 거리 1,000 km의 채널 비트율이 40 Gbps인 NRZ 형식의 5-채널 WDM에서 HNL-DSF OPC의 펌프 광 파장에 관계없이 펌프 광 전력을 18.5 dBm으로 선택하면 최대 전력 7 dBm까지의 in-band 채널(OPC의 3-dB 대역폭 내에 포함되는 파장을 갖는 채널) 전체를 1 dB 이내의 파워 페널티(power penalty)로 양호하게 보상하는 것을 참고문헌 [5]에서 확인하였다.

본 논문에서는 HNL-DSF OPC를 이용한 MSSI 기법이 적용된 채널 비트율이 40 Gbps인 8-채널 WDM 시스템에서 변조 파형으로 각각 NRZ와 RZ를 사용하는 경우 채널 입력 침투 전력, 광섬유 분산 계수, 전송 거리 변화에 따른 보상 특성을 분석하고자 한다. 각 경우에 대한 광 펄스 왜곡의 보상 정도를 평가하기 위하여 수신 파형의 눈 열림 페널티(EOP: Eye Opening Penalty)를 단계 분할 푸리에(SSF: Split-Step Fourier) 수치 방법을 이용하여 구했다. 분석과

정을 간단히 하기 위하여 WDM 채널간의 상호 위상 변조(XPM: Cross Phase Modulation)는 무시하였고, 채널 간 FWM의 영향을 최소화하기 위하여 채널 간 파장 간격을 다르게 하는 방법^[6]을 사용하여 시뮬레이션 하였다.

II. PAIA MSSI 기법을 채택한 8×40 Gbps WDM 시스템 모델

그림 1은 비트율이 40 Gbps인 채널을 송신부에서 각각 다른 반송파 파장으로 강도 변조한 후 하나의 전송로로 전송시키는 8-채널 WDM 전송 시스템의 전체적인 구조를 나타낸 것이다. WDM 시스템의 j -번째 신호파의 포락선 A_j 는 아래 방정식을 따라 전파한다^[7].

$$\frac{\partial A_j}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2} A_j - \frac{i}{2} \beta_{2j} \frac{\partial^2 A_j}{\partial T^2} + \frac{1}{6} \beta_{3j} \frac{\partial^3 A_j}{\partial T^3} + i\gamma_j |A_j|^2 A_j + 2i\gamma_j |A_k|^2 A_j \quad (1)$$

여기서 α 는 광섬유의 손실 계수, λ_j 는 j 번째 채널 신호 파장, β_{2j} 는 광섬유의 색 분산 파라미터, β_{3j} 는 3차 색 분산 파라미터, γ_j 는 비선형 계수, $T = t - z/v_j$ 이다. 식 (1)의 좌변의 마지막 두 번째 항은 SPM을, 첫 번째 항은 k 번째 채널과의 XPM을 각각 초래한다. 광섬유의 분산 계수가 커질수록 XPM에 의한 채널 간섭이 감소하여 전체적인 관점에서의 보상 정도가 개선되는 것을 변조 파형 형식이 NRZ인 WDM 시스템의 시뮬레이션을 통해 확인하였다^[8]. 따라서 변조 파형 형식으로 RZ를 사용하는 WDM 시스템에서도 이와 같은 결과를 예측할 수 있기 때문에 본 논문에서는 분석 과정을 간단히 하기 위하여 XPM 영향을 무시하여 시뮬레이션 하였다.

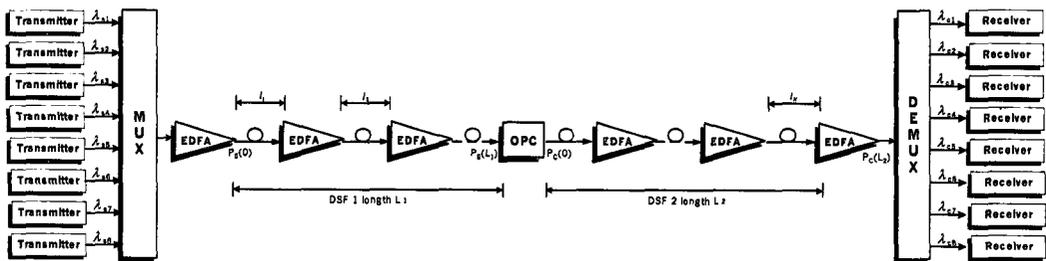


그림 1. 모의 실험 시스템 모델
Fig. 1. Simulation model.

송신부에서의 각 레이저 다이오드는 서로 독립적인 40 Gbps 128(=2⁷) PRBS(pseudo random bit sequence)에 의해 강도 변조되는 것으로 가정하였다. 이때 외부 광 변조기로부터 발생하는 출력 전계 강도는 아래 식으로 표현되는 2차 가우시안 펄스로 모델링하였다.

$$A(0, t) = \sqrt{P_0} \exp \left[-\frac{(1+iC)}{2} \left(\frac{t}{t_0} \right)^{2m} \right] \quad (2)$$

여기서 P_0 는 입력 광 전력, m 은 광 펄스의 차수, t_0 는 반치폭이다^[7]. 듀티 사이클 1의 NRZ 펄스의 반치폭은 $1/1.825 \times$ 비트율(R_b), 듀티 사이클 0.5의 RZ 펄스의 반치폭은 $0.5/1.825 \times R_b$ 로 설정하였다. 또한 C 는 주파수 첨(frequency chirp) 파라미터로 본 논문에서는 0으로 설정하였다.

수신부는 역다중화 장치에서 필터링되어 입력되는 채널 신호를 5 dB 잡음 지수의 EDFA를 통해 증폭한 후 PIN 다이오드로 광 신호 전력을 전류로 변환하고 1 nm의 대역폭으로 펄스를 정형 하는 버터워스 필터(Butterworth filter), 클럭 재생기(clock recovery), 판별 회로(decision circuit)를 거쳐 '0'과 '1'의 전기적 신호를 검출하는 $0.65 \times R_b$ 의 수신 대역폭을 갖는 직접 검파 방식의 수신기로 모델링 하였다^[9].

그림 1의 WDM 시스템에서 광대역 채널 보상을 위해서는 OPC가 시스템 전체 대역폭에 걸쳐 평탄한 변환 특성을 가져야 한다. 전통적인 DSF 대신에 적은 분산 기울기(dispersion slope)를 갖는 HNL-DSF를 사용함으로써 넓은 대역에 걸치는 각기 다른 파장의 신호들이 같거나 거의 비슷한 변환 효율(conversion efficiency)의 공역파로 변환되고, 그 결과 고품질 광대역 WDM 시스템 구현이 가능하다는 것을 참고문헌 [5]를 통해 확인하였다.

그림 2는 HNL-DSF를 이용한 OPC의 구조를 나타

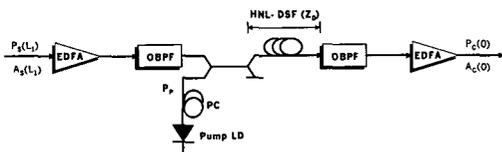


그림 2. HNL-DSF를 이용한 광 위상 공역기 구조
Fig. 2. Optical phase conjugator using highly-nonlinear dispersion shifted fiber.

낸 것이다. 또한 표 1에 본 논문에서 사용한 HNL-DSF OPC 파라미터 값들을 나타냈다. OPC의 비선형 매질에서 생성된 FWM 광의 전력과 입력 신호 전력의 비는 변환 효율로 정의된다^[10]. 표 1의 파라미터를 사용하여 계산한 결과 최대 변환 효율 값은 0.18 dB이고, HNL-DSF OPC의 3-dB 대역폭은 34 nm (1532.5~1566.5 nm)로 얻어졌다^[5].

본 논문에서 8-채널 WDM 신호 파장은 각각 1550.2 nm, 1551.2 nm, 1553.2 nm, 1554.4 nm, 1556.0 nm, 1557.8 nm, 1560.0 nm, 1561.4 nm로 설정하였다. 따라서 각각의 채널 신호가 HNL-DSF OPC를 통과함에 따라 변환되는 공역파 파장은 각각 1548.8 nm, 1547.8 nm, 1545.8 nm, 1544.6 nm, 1543.1 nm, 1541.3 nm, 1537.8 nm가 되어 모두 HNL-DSF OPC의 3-dB 대역폭 안에 포함된다.

표 1. 광섬유와 HNL-DSF를 이용한 OPC의 시뮬레이션 파라미터

Table 1. Simulation parameters of fiber and OPC using HNL-DSF.

파라미터	기호 및 값	
광섬유	형태	conventional DSF
	손실	$\alpha_1 = \alpha_2 = 0.2$ dB/km
	전체 전송 길이	variable ($L_1 = L_2$)
	분산 계수	$D_1 = D_2 = 0.1, 0.4, 1.6$ ps/nm/km
	비선형 굴절 계수	$n_2 = 2.36 \times 10^{-26}$ km ² /W
	유효 코어 직경	$A_{eff} = 50 \mu m^2$
	EDFA의 개수	variable
	EDFA 간격 (광섬유 간격)	$l = 50$ km
광 위상 공역기	HNL-DSF 손실	$\alpha_o = 0.61$ dB/km
	HNL-DSF 비선형 계수	$\gamma_o = 20.4$ W ⁻¹ km ⁻¹
	HNL-DSF 길이	$z_o = 0.75$ km
	HNL-DSF의 영 분산 파장	$\lambda_0 = 1550.0$ nm
	HNL-DSF 분산 기울기	$dD_o/d\lambda = 0.032$ ps/nm ² /km
	펌프 광 파장	$\lambda_p = 1549.5$ nm
펌프 광 전력	$P_p = 18.5$ dBm for NRZ $P_p = 18.6$ dBm for RZ	

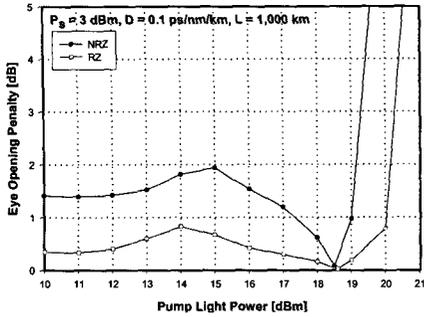


그림 3. OPC에서의 펌프 광 전력 변동에 따른 눈 열림 페널티

Fig. 3. Eye opening penalty dependence on pump light power in OPC.

III. 시뮬레이션 결과 및 검토

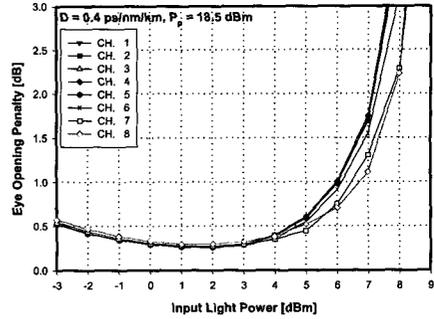
그림 3은 입력 전력이 3 dBm이고 파장이 1550.2 nm(채널 1의 파장)인 NRZ 형식의 변조 파형과 RZ 형식의 변조 파형이 각각 MSSI 기법이 적용된 분산 계수가 0.1 ps/nm/km인 1,000 km의 전송 링크를 전파한 후 수신된 파형의 눈 열림 페널티를 HNL-DSF OPC에서의 펌프 광 전력 변화에 따라 나타낸 것이다. 우선 변조 형식으로 RZ를 사용하면 1 dB EOP 이하의 수신 성능을 얻을 수 있는 HNL-DSF OPC의 펌프 광 전력의 범위가 NRZ 형식을 사용한 경우보다 더욱 증가되는 것을 알 수 있다. 그리고 NRZ 형식과 RZ 형식의 경우 각각 18.5 dBm과 18.6 dBm의 펌프 광 전력에서 최상의 보상이 얻어지는 것을 확인할 수 있다.

표 2는 각 채널 파장에 따른 HNL-DSF OPC의 변환 효율 차이에 기인하는 각 채널별 공액파 전력 대 입력 신호 전력비로 정의한 전력 변환비(power conversion ratio, $R_p = P_c(0)/P_s(0)$)를 펌프 광 전력의 크기가 NRZ 형식인 경우 18.5 dBm, RZ 형식인 경우 18.6 dBm에서 변조 형식별로 구한 값이다. 앞서 언급했듯이 모든 채널의 파장이 HNL-DSF OPC의 3-dB

표 2. WDM 채널별 전력 변환비

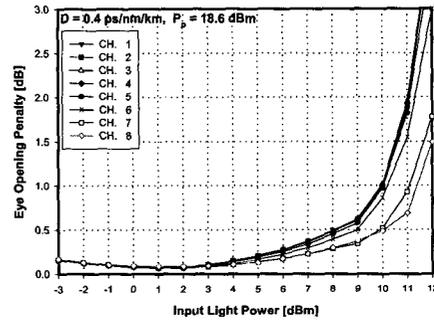
Table 2. Power conversion ratio of each WDM channels.

CH. no.	CH. 1	CH. 2	CH. 3	CH. 4	CH. 5	CH. 6	CH. 7	CH. 8
Format								
NRZ	0.946	0.946	0.944	0.942	0.933	0.914	0.866	0.817
RZ	0.977	0.977	0.975	0.973	0.964	0.945	0.894	0.844



(a) NRZ 형식

(a) NRZ format



(b) RZ 형식

(b) RZ format

그림 4. 광섬유의 분산 계수가 0.4 ps/nm/km인 경우 입력 전력 변화에 따른 눈 열림 페널티

Fig. 4. Eye opening penalty as a function of the input signal light power for $D = 0.4$ ps/nm/km.

대역폭 내에 포함되지만 채널의 파장이 커질수록 HNL-DSF OPC의 변환 효율이 감소하여 OPC에 의해 생성되는 공액파 전력의 크기가 감소하는 것을 알 수 있다.

그림 4는 HNL-DSF OPC의 펌프 광 전력이 그림 3의 결과에 따라 NRZ 형식인 경우 18.5 dBm으로, RZ 형식인 경우 18.6 dBm으로 설정된 광섬유 분산 계수가 0.4 ps/nm/km인 8-채널 WDM 시스템에서 입력 신호 전력 변화에 따른 눈 열림 페널티를 변조 형

식별로 나타낸 것이다. 우선 변조 파형으로 RZ를 사용하면 NRZ를 사용한 경우보다 1 dB EOP를 얻을 수 있는 채널의 최대 입력 전력의 크기를 약 4~4.6 dB 정도 개선시킬 수 있는 것을 알 수 있다. 그러나 1 dB EOP가 되는 채널간 파워 페널티가 RZ 형식에서 1.4 dB인 반면 NRZ 형식에서는 0.8 dB로 NRZ 전송을 하는 경우 신호 파장 변화에 따른 채널간 보상의 변동을 줄일 수 있는 것을 알 수 있다.

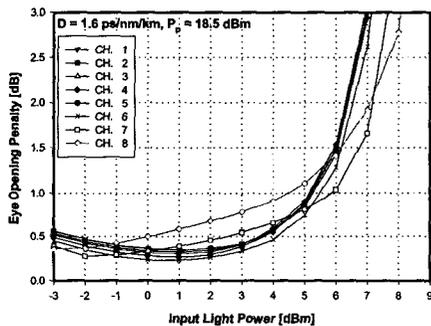
그림 5는 광섬유 분산 계수가 1.6 ps/nm/km인 8-채널 WDM 시스템에서 입력 신호 전력 변화에 따른 눈 열림 페널티를 변조 형식별로 나타낸 것이다. 우선 NRZ 형식, RZ 형식 모두 전력 변환비가 0.9 이하인 채널 7과 채널 8을 제외한 나머지 6개 채널들의 보상을 거의 비슷하게 얻을 수 있고, 그림 4의 결과에서처럼 1 dB EOP를 얻을 수 있는 채널 1부터 채널

6까지의 입력 전력 범위는 변조 형식으로 RZ를 사용한 경우에서 넓어지고, 1 dB EOP 기준 채널 간 파워 페널티는 NRZ 형식을 사용한 경우에서 줄어드는 것을 알 수 있다.

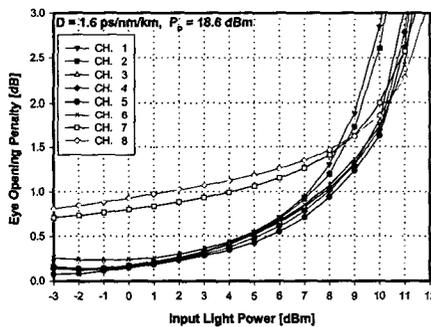
또한 정도의 차이는 있지만 NRZ 형식, RZ 형식 모두 다른 채널에 비해 전력 변환비가 낮은 채널 7과 채널 8은 입력 신호 전력이 낮은 경우 HNL-DSF OPC를 통한 보상의 영향을 적게 받는 것을 알 수 있다. 이는 분산 계수가 비교적 큰 광섬유를 전파하는 광 펄스 포락선의 빠른 퍼짐에 의한 감소된 광 펄스 순시 강도와 그로 인한 감소된 SPM을 통한 위상 변화가 광 펄스가 전파되면서 겪는 본연의 위상 변화를 적게 상쇄시킴에 따라 위상 변조가 진폭 변조로 전환되는 양이 증가되어 보상된 채널 신호에 부가되기 때문이다. 이러한 현상은 평균 순시 강도가 낮은 RZ 변조 형식의 파형에서, 특히 입력 신호 전력을 적게 갖는 경우 더욱 심하게 나타나게 된다.

그림 6은 전력 변환비가 가장 높은 채널 1과 가장 낮은 채널 8의 눈 열림 페널티를 광섬유 분산 계수 값에 따라 나타낸 것이다. 먼저 전력 변환비가 높은 채널, 즉 신호 파장이 HNL-DSF OPC의 펌프 파장에 매우 가까운 채널은 변조 형식에 상관없이 광섬유의 분산 계수 값에 큰 영향을 받지 않고 전송되는 것을 알 수 있다.

반면 전력 변환비가 낮은 채널(채널 8)은 그림 5에서 언급한 현상에 의해 광섬유의 분산 계수가 증가될수록 MSSI에 의한 보상의 영향을 적게 받는 것을 알 수 있다. 이는 WDM 시스템으로 전송하는 채널 용량이 커질수록 모든 채널의 고품질 전송을 보



(a) NRZ 형식
(a) NRZ format



(b) RZ 형식
(b) RZ format

그림 5. 광섬유의 분산 계수가 1.6 ps/nm/km인 경우 입력 전력 변화에 따른 눈 열림 페널티
Fig. 5. Eye opening penalty as a function of the input signal light power for $D = 1.6$ ps/nm/km.

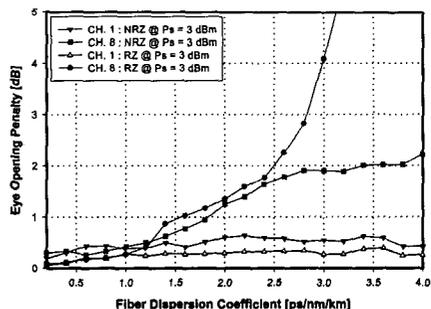


그림 6. 광섬유 분산 계수 변화에 따른 눈 열림 페널티
Fig. 6. Eye opening penalty as a function of fiber dispersion coefficient.

장하는 광섬유 분산 계수가 제한되어야 한다는 것을 의미한다. 즉 본 논문의 결과를 바탕으로 본다면 MSSI를 통해 모든 8-채널의 1 dB EOP를 유지시킬 수 있는 광섬유의 분산 계수 값은 변조 형식으로 NRZ를 사용한 경우 1.8 ps/nm/km 이하, RZ를 사용한 경우 1.5 ps/nm/km 이하로 선택되어야 한다는 것을 의미한다.

그림 7(a)는 MSSI 기법이 적용되지 않은 경우, 그림 7(b)는 MSSI 기법이 적용된 경우에서 전송 거리에 따른 채널 8의 눈 열림 패널티이다. MSSI를 적용하지 않은 경우 1 dB EOP 기준으로 분산 계수가 0.1 ps/nm/km인 광섬유에서는 파형 형식에 따라 250~320 km까지 전송 가능하고, 분산 계수가 0.4 ps/nm/km인 광섬유에서는 수 십 km 정도 전송 가능하다. 반면 WDM 전송 링크에 MSSI가 적용되면 분산 계수가 1.6 ps/nm/km인 광섬유에서도 RZ 형식의 파형

을 최소 1,000 km까지 전송시킬 수 있다.

광섬유의 분산 계수가 작을수록 전송 거리를 신장시킬 수 있고, 광섬유의 분산 계수가 작은 WDM 시스템에서는 채널의 파형이 RZ 형식인 경우, 광섬유의 분산 계수가 큰 WDM 시스템에서는 NRZ 형식인 경우 전송 거리가 더욱 신장되는 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

지금까지 HNL-DSF OPC를 이용한 MSSI 기법이 적용된 WDM 시스템에서 변조 파형으로 각각 NRZ와 RZ를 사용하는 경우 채널 입력 전력, 광섬유 분산 계수, 전송 거리 변화에 따른 보상 특성을 분석해 보았다.

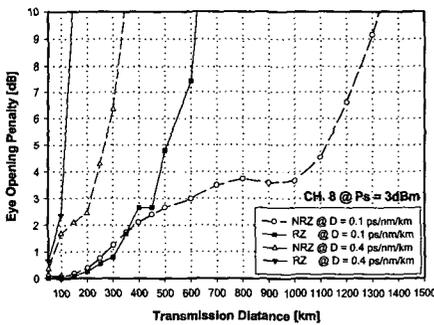
우선 광섬유의 분산 계수가 비교적 낮은 WDM 시스템에서 변조 파형으로 RZ를 사용하면 NRZ를 사용한 경우보다 더욱 큰 전력의 신호에 대해서도 고품질 전송이 가능하지만 광섬유의 분산 계수가 비교적 큰 WDM 전송 시스템에서 RZ 형식의 채널 파형을 보상하는 경우 OPC를 통해 변환된 공액파의 전력이 다른 채널에 비해 상대적으로 낮은 채널들은 보상 효과가 떨어지는 것을 알 수 있었다.

즉 WDM 채널들이 HNL-DSF OPC의 3-dB 대역폭 내에 속하는 파장을 갖는다고 하더라도 두 번째 광섬유로 입사되는 공액파의 전력이 낮은 채널들에 대한 보상 효과 감소가 광섬유의 분산 계수가 클수록, 그리고 NRZ 형식보다는 RZ 형식에서 더욱 두드러지게 나타나기 때문에 전체 채널의 고품질 전송을 보장하는 광섬유의 분산 계수가 제한되어야 한다는 것을 확인할 수 있었다.

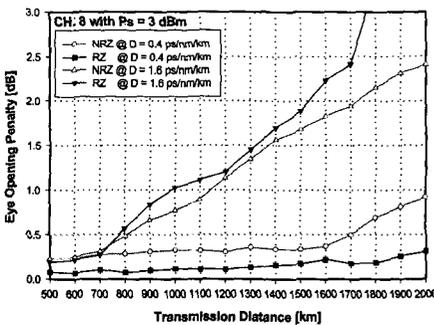
광섬유 분산 계수와 변조 파형 형식의 이러한 관계는 결국 WDM 채널의 고품질 전송을 보장하는 전송 거리도 제한하는데, 광섬유의 분산 계수가 작은 WDM 시스템에서는 RZ 형식을, 분산 계수가 큰 WDM 시스템에서는 NRZ 형식을 사용하여 전송 거리를 신장시킬 수 있다는 것도 알 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] A. Yariv, D. Fekete and D. M. Pepper, "Compensation for channel dispersion by nonlinear optical phase conjugation", *Opt. Lett.*, vol. 4, pp. 52-54, 1979.



(a) OPC가 적용되지 않은 경우의 채널 8
(a) Channel 8(without OPC)



(b) 입력 전력이 3 dBm인 경우의 채널 8
(b) Channel 8 with Ps=3 dBm

그림 7. 전송 거리에 따른 눈 열림 패널티
Fig. 7. Eye opening penalty as a function of transmission length.

- [2] S. Watanabe, T. Naito and T. Chikama, "Compensation of chromatic dispersion in a single mode fiber by optical phase conjugation", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 5, no. 1, pp. 92-95, 1993.
- [3] S. Watanabe, M. Shirasaki, "Exact compensation for both chromatic dispersion and Kerr effect in a transmission fiber using optical phase conjugation", *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-14, no. 3, pp. 243-248, 1996.
- [4] K. Kikuchi, C. Lorattanasene, "Compensation for pulse waveform distortion in ultra-long distance optical communication systems by using midway optical phase conjugator", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 6, pp. 1499-1501, 1994.
- [5] Seong-Real Lee, Y. J. Lee and Y. H. Lee, "Investigation of pump light power of wideband optical phase conjugator using highly nonlinear dispersion shifted fiber in WDM systems with mid-span spectral inversion", submitted to *J. Lightwave Technol.*
- [6] F. Forghieri, R. W. Tkach and A. R. Chraplyvy, "WDM systems with unequally spaced channels", *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-13, no. 5, pp. 889-897, 1995.
- [7] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, 1989.
- [8] 이성렬, 권순녀, 이윤현, "광 펄스 왜곡의 보상을 위해 Mid-Span Spectral Inversion 기법을 채택한 120 Gbps WDM 시스템에서 채널 간 상호 위상 변조 현상의 영향", 한국전자파학회 논문지, 14(7), pp. 741-749, 2003년.
- [9] 이성렬, 김남성, 방효창, "Mid-Span Spectral Inversion 기법을 채택한 장거리 광 전송 시스템에서의 비트 에러율 평가", 한국항행학회 논문지, 6(3), pp. 223-230, 2002년.
- [10] K. Inoue, "Four-wave mixing in an optical fiber in the zero-dispersion wavelength region", *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-10, no. 11, pp. 1553-1561, 1992.

이 성 렬



1990년 2월: 한국항공대학교 항공통신정보공학과 (공학사)

1992년 8월: 한국항공대학교 대학원 항공통신정보공학과 (공학석사)

1992년 8월~1994년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 조교

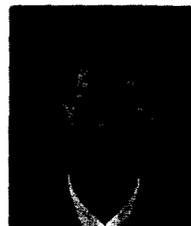
1996년 1월~2002년 8월: (주)세영통신 전파기술연구소 책임연구원

2002년 2월: 한국항공대학교 대학원 항공통신정보공학과 (공학박사)

2002년 6월~현재: (주)ATN 기술연구소 연구소장

[주 관심분야] 솔리톤 전송 시스템, 광 파장 분할 다중화, 광의 비선형 현상 분석

조 성 언



1989년 2월: 한국항공대학교 통신정보공학과 (공학사)

1991년 2월: 한국항공대학교 대학원 통신정보공학과 (공학석사)

1997년 2월: 한국항공대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)

1997년 3월~현재: 국립 순천대학교 정보통신공학부 부교수

[주 관심분야] Wireless 통신, 환경 전자공학, 광통신