

# 200 Gbps WDM 시스템에서 Mid-Span Spectral Inversion 기법을 이용한 채널 왜곡의 보상 특성

## Compensation Characteristics of Distorted Channels in 200 Gbps WDM Systems using Mid-Span Spectral Inversion Method

이 성 렬

Seong-Real Lee

### 요 약

광섬유의 색 분산과 비선형 효과에 의해 왜곡된 채널 신호를 보상하기 위한 방법으로 고비선형 분산 천이 광섬유의 광 위상 공액기를 이용한 경로 평균 강도 근사 MSSI(Mid-Span Spectral Inversion)를 채택한 채널 전송률 40 Gbps의 5-채널 WDM 시스템의 시뮬레이션을 통하여 채널 각각의 MSSI 보상 특성을 다양한 광섬유 분산 계수에 따라 분석해 보았다. 채널별 보상 특성의 분석은 1 dB 기준 눈 열림 패널티, 수신단에서의 비트 에러율 특성,  $10^{-9}$  BER에서의 채널 간 파워 패널티 등을 이용했다. 시스템 전송 길이, 광섬유의 분산 계수, 광 위상 공액기 펌프 광 파장, 광 위상 공액기에서의 WDM 신호 파장에 따른 공액파 변환 효율 등에 관계하여 광 위상 공액기를 중심으로 한 첫 번째 전송 링크에서의 신호 평균 전력과 두 번째 전송 링크에서의 공액파 평균 전력을 동일하게 만드는 펌프 광 전력을 적절히 선택하면 고비선형 분산 천이 광섬유가 MSSI 보상을 통한 광대역 WDM 시스템을 위한 광 위상 공액기에서의 비선형 매질로 매우 적합하다는 것을 확인할 수 있었다.

### Abstract

In this paper, the characteristics of compensation for WDM channel signal distortion due to both chromatic dispersion and Kerr effect in 1,000 km 200 Gbps( $5 \times 40$  Gbps) WDM systems was investigated. The WDM system has a path-averaged intensity approximation(PAIA) mid-span spectral inversion(MSSI) as a compensation method. This system has a highly nonlinear dispersion shifted fiber(HNL-DSF) optical phase conjugator(OPC) in the mid-way of transmission line. In order to evaluate the degree of compensation, 1 dB eye opening penalty(EOP), bit error rate(BER) characteristics and power penalty of  $10^{-9}$  BER are used. It is confirmed that HNL-DSF is an useful nonlinear medium in OPC for wideband WDM system with PAIA MSSI and that the optimal compensation for WDM channel distortion is achieved by the selection of pump light power of OPC, which equalize the conjugated light power into the second half fiber section with the input WDM signal light power depending on total transmission length, dispersion coefficient of fiber, OPC pump light wavelength, conversion efficiency of WDM channel in OPC.

Key words : Mid-Span Spectral Inversion(MSSI), Chromatic Dispersion, Self Phase Modulation(SPM), Highly Non-Linear Dispersion Shifted Fiber(HNL-DSF) Optical Phase Conjugator(OPC), Wideband WDM System

### I. 서 론

광섬유의 색 분산과 비선형 효과(Kerr effect)에 기인하는 광 펄스의 왜곡을 보상하는 여러 가지 기

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

· 논문 번호 : 20030304-040

· 수정완료일자 : 2003년 5월 28일

법 중 광 전송 링크 중간에 광 위상 공액기(OPC: Optical Phase Conjugator)를 사용하는 MSSI(Mid-Span Spectral Inversion) 기법은 비교적 높은 전력 신호를 보상할 수 있다는 장점을 갖고 있다<sup>[1],[2]</sup>. 또한 MSSI에서 OPC의 위치에 대한 비선형 효과의 비대칭성 때문에 기인하는 자기 위상 변조(SPM: Self Phase Modulation)에 의한 왜곡 보상에서의 한계는 OPC를 중심으로 한 첫 번째 전송 링크와 두 번째 전송 링크에서의 경로 평균 전력을 같게 하는 경로 평균 강도 근사법(PAIA: Path-Averaged Intensity Approximation)을 적용함으로써 해결될 수 있다<sup>[3],[4]</sup>.

PAIA MSSI 기법을 광대역 파장 분할 다중(WDM: Wavelength Division Multiplexing) 시스템에 적용하여 모든 WDM 채널의 고품질 전송을 구현하는데 있어 가장 중요한 요소로써 OPC에서 4-광파 혼합(FWM: Four Wave Mixing)에 의해 신호파를 공액파(conjugated wave)로 변환시키는 비선형 매질이 전송로의 EDFA(Erbium Doped Fiber Amplifier)의 대역에 준하는 광대역이어야 하고 전송 거리, 광섬유 분산 계수 등의 시스템 파라미터와 관련해 모든 채널에 대해 최상의 보상을 얻을 수 있는 OPC에서의 펌프 광 전력의 선택 등이 있다.

우선 OPC의 비선형 매질로 전통적인 분산 천이 광섬유(DSF: Dispersion Shifted Fiber) 대신에 고비선형 분산 천이 광섬유(HNL-DSF: Highly Nonlinear Dispersion Shifted Fiber)를 사용함으로써 광대역의 목적을 달성할 수 있고<sup>[5]</sup>, 이 HNL-DSF OPC를 이용한 PAIA MSSI를 채널 왜곡 보상 기법으로 채택한 WDM 시스템에서 HNL-DSF OPC를 중심으로 한 두 광 전송 링크에서의 신호파 경로 평균 전력과 공액파 경로 평균 전력이 같아지도록 펌프 광 전력을 선택하면 광대역 WDM 채널의 고품질 장거리 전송이 가능하다는 것을 앞선 연구를 통해 확인하였다<sup>[6]</sup>. 예를 들어 총 전송 거리 1,000 km의 채널 비트율이 40 Gbps인 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) 전체에 대해 1 dB 이내의 파워 페널티(power penalty)로 양호하게 보상 전송되는 것을 확인하였다. 또한 OPC의 펌프 광 파장이 HNL-DSF의 영 분

산 파장(ZDW: Zero Dispersion Wavelength)에 가까울수록 MSSI 보상을 통해 광대역 WDM 채널 신호들이 동일한 성능과 품질로 전송되는 것도 확인하였다.

본 논문에서는 앞선 연구의 결과를 바탕으로 설계된 총 전송 거리 1,000 km의 채널 비트율 40 Gbps의 5-채널 강도 변조 직접 검파(IM/DD: Intensity Modulation / Direct Detection) WDM 시스템의 시뮬레이션을 통하여 OPC의 펌프 광 파장이 각각 1549.5 nm와 1548.3 nm이고, 펌프 광 전력이 각각 18.2 nm, 18.5 dBm, 18.7 dBm인 경우 in-band 채널 각각의 MSSI 보상 특성을 다양한 광섬유 분산 계수를 고려하여 분석해 보았다. PAIA MSSI 기법을 통한 채널별 보상 특성 분석은 1 dB 눈 열림 페널티(EOP: Eye Opening Penalty)를 기준으로 하였고, 비트 에러율(BER: Bit Error Rate) 특성 확인과  $10^{-9}$  BER에서의 채널간 파워 페널티 도출을 통해 HNL-DSF OPC를 갖는 경로 평균 강도 근사 MSSI 기법이 광대역 WDM 시스템에 적용될 수 있는 가능성을 확인해 보았다.

참고문헌 [6]에서와 같이 분석 과정을 간단히 하기 위하여 WDM 채널 간의 상호 위상 변조(XPM: Cross Phase Modulation)는 무시하였고, 채널 간 FWM의 영향을 최소화하기 위하여 채널 간 파장 간격을 다르게 하는 방법<sup>[7]</sup>을 사용하여 시뮬레이션 하였다.

## II. 경로 평균 강도 근사 MSSI 기법을 채택한 200 Gbps WDM 시스템 모델

그림 1은 비트율이 40 Gbps인 채널을 송신부에서 각각 다른 반송파 파장으로 강도 변조 후 하나의 전송로로 전송시키는 MSSI 보상 기법을 채택한 5-채널 WDM 전송 시스템의 전체적인 구조를 나타낸 것이다. 그림 1에서 OPC는 광 송신단부터 OPC까지의 첫 번째 전송 링크를 전파해 온 색 분산과 비선형 효과의 영향을 받아 왜곡된 광 신호파를 위상 공액파로 변환시킨다. 이렇게 변환된 공액파를 나머지 전송 링크의 반을 통해 수신시키면 광 신호의 왜곡을 보상할 수 있다.

WDM 시스템의  $j$ 번째 신호파의 포락선  $A_j$  아래 방정식을 따라 전파한다<sup>[8]</sup>.

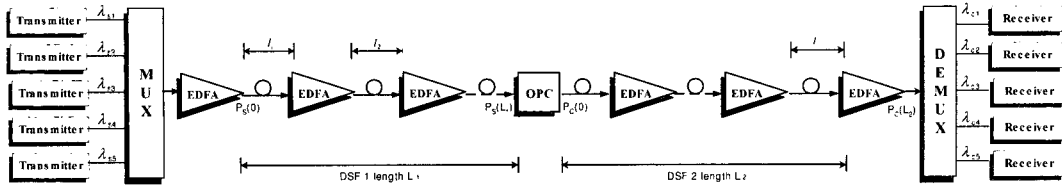


그림 1. 5×40 Gbps WDM 시스템 시뮬레이션 모델  
Fig. 1. 5×40 Gbps WDM system simulation model.

표 1. 시뮬레이션 파라미터  
Table 1. Simulation parameters.

파라미터		기호 및 파라미터 값
송신부	비트율	$R_b=200$ Gbps(=5×40 Gbps)
	파형	NRZ super-Gaussian (m=2)
	비트 패턴	PRBS $2^7$ (128 bits)
	주파수 칩(Chirp)	0
광섬유	형태	conventional DSF
	손실 계수	$\alpha_1=\alpha_2=0.2$ dB/km
	전체 전송 길이	1,000 km ( $L_1=L_2=500$ km)
	분산 계수	0.1 ps/nm/km, 0.4 ps/nm/km, 1.6 ps/nm/km, 3.2 ps/nm/km
	비선형 굴절 계수	$n_2=2.36 \times 10^{-26}$ km <sup>2</sup> /W
	유효 코어 직경	$A_{eff}=50 \mu m^2$
	EDFA의 개수	20
EDFA 간격	$l=50$ km	
수신부	형태	PIN-PD with EDFA pre-amp
	EDFA 잡음 지수	5 dB
	광학적 대역폭	1 nm
	수신 대역폭	$0.65 \times R_b$

표 2. 불균일하게 분할한 WDM 신호 채널 파장과 공액파 파장

Table 2. WDM signal channel wavelengths and conjugated signal wavelengths determined by unequal channel spacing.

채널 번호	신호 파장	공액파 파장	
		$\lambda_p=1549.5$ nm	$\lambda_p=1548.3$ nm
채널 1	1550.0 nm	1549.0 nm	1546.6 nm
채널 2	1551.6 nm	1547.4 nm	1545.0 nm
채널 3	1553.0 nm	1546.0 nm	1543.6 nm
채널 4	1554.8 nm	1544.2 nm	1541.9 nm
채널 5	1555.8 nm	1543.3 nm	1540.9 nm

Split-Step Fourier) 방법<sup>[8]</sup>을 이용하여 수치적으로 분석하였다. 또한 본 논문에서 FWM 효과에 의한 채널 간 누화(crosstalk)를 억제하기 위하여 F. Forghieri 등에 의해 제안된 WDM 채널 간 파장 간격을 불균일하게 분할하는 방법<sup>[7]</sup>을 채택했다. 본 논문에서 사용한 OPC의 다양한 펌프 광 파장에 대한 WDM 채널 신호 파장과 공액파 파장을 표 2에 각각 나타냈다.

수신부는 역다중화 장치에서 필터링되어 입력되는 채널 신호를 EDFA를 통해 증폭한 후 PIN 다이오드로 광 신호 전력을 전류로 변환하고 펄스 정형 필터(pulse shaping filter), 클럭 재생기(clock recovery), 판별 회로(decision circuit)를 거쳐 '0'과 '1'의 전기적 신호를 검출하는 직접 검파 방식의 수신기로 모델링하였다.

전송되는 데이터 용량이 커질수록 한 비트의 주기는 짧아지게 되어, 이 때 발생하는 신호간의 간섭(ISI: Intersymbol Interference)은 BER 특성을 평가하기 위해서 반드시 포함되어야 한다. 본 논문에서는 이를 위하여 R. J. Nuyts에 의해 제안된 눈 감김

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

여기서  $\alpha$ 는 광섬유의 손실 계수,  $\lambda_j$ 는  $j$ 번째 채널 신호 파장,  $\beta_{2j}$ 는 광섬유의 색 분산 파라미터,  $\beta_{3j}$ 는 3차 색 분산 파라미터,  $\gamma_j$ 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. 본 논문에서는 시뮬레이션 과정을 간략화시키기 위하여 식 (1)의 우변의 마지막 항을 무시하고 표 1의 파라미터를 적용하여 단계 분할 푸리에 (SSF:

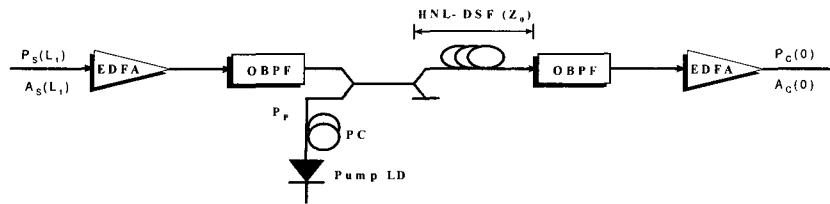


그림 2. HNL-DSF를 이용한 OPC 구조

Fig. 2. Optical phase conjugator using highly nonlinear dispersion shifted fiber.

정도(eye closure factor)를 이용했다<sup>[9]</sup>. 참고문헌 [9]에 의하면 눈 감김 정도를 이용해 아래 식을 통해 BER을 계산할 수 있다.

$$BER = \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left[ \sqrt{2} \left( \frac{(1 - c_{ISI}^+) I_{s,av}}{\sigma^+} \right) \right] + \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left[ \sqrt{2} \left( \frac{(\tau - c_{ISI}^-) I_{s,av}}{\sigma^-} \right) \right] \quad (2)$$

여기서  $c_{ISI}^+$ 와  $c_{ISI}^-$ 는 각각 '1' 신호와 '0' 신호에 대한 눈 감김 정도이고,  $\sigma^+$ 와  $\sigma^-$ 는 각각 '1' 신호와 '0' 신호에 대한 잡음의 표준 편차이다. 그리고  $\tau$ 는 수신기 판별 회로에서의 판별 문턱치(decision threshold level)이다.

식 (2)를 통한 BER 계산에 필요한 수신기에서의 광 신호 대 잡음비(OSNR: Optical Signal to Noise Ratio)와 각 수신 잡음은 참고문헌 [10]에 유도한 식들을 사용했다.

### III. HNL-DSF를 이용한 광 위상 공액기

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 평탄한 FWM 생성 효율이 기대된다. 만일 HNL-DSF의 이용으로 넓은 대역에 걸치는 각기 다른 파장의 신호들이 같거나 거의 비슷한 변환 효율(conversion efficiency)의 공역파로 변

표 3. HNL-DSF OPC 파라미터

Table 3. HNL-DSF OPC parameters

파라미터	기호	파라미터 값
HNL-DSF 손실	$\alpha_0$	0.61 dB/km
HNL-DSF 비선형 계수	$\gamma_0$	20.4 W <sup>-1</sup> km <sup>-1</sup>
펌프 광 전력	$P_p$	18.2 dBm, 18.5 dBm, 18.7 dBm
HNL-DSF 길이	$z_0$	0.75 km
HNL-DSF 영 분산 파장	$\lambda_0$	1550 nm
펌프 광 파장	$\lambda_p$	1549.5 nm, 1548.3 nm
HNL-DSF 분산 기울기	$dD/d\lambda$	0.032 ps/nm <sup>2</sup> /km

환된다면 WDM 시스템에 HNL-DSF OPC가 적용될 수 있을 것이다.

그림 2는 HNL-DSF를 이용한 OPC의 구조를 나타낸 것이다. 또한 표 3은 본 논문에서 사용한 HNL-DSF OPC 파라미터 값들을 나타낸 것이다. OPC의 비선형 매질에서 생성된 FWM 광의 전력과 입력 신호 전력의 비를 변환 효율로 정의한다. 참고문헌 [6]에서 표 3에 요약된 파라미터를 사용하여 변환 효율을 계산하였다<sup>[6]</sup>. 계산 결과 최대 변환 효율 값은 0.18 dB이고, HNL-DSF OPC의 3-dB 대역폭은 펌프 광 파장이 1549.5 nm인 경우 34 nm (1532.5~1566.5 nm), 1548.3 nm인 경우 18 nm (1539.5~1557.5 nm)로 얻어졌다.

표 2의 각 채널 파장을 참고문헌 [6]의 결과를 토대로 확인해 보면 OPC 펌프 광 파장이 각각 1549.5

표 4. OPC의 최대 변환 효율과 채널 변환 효율의 차이 값

Table 4. The difference of maximum conversion efficiency and channel conversion efficiency.

$\lambda_p$	채널 1	채널 2	채널 3	채널 4	채널 5
1549.5 nm	0 dB	0 dB	0 dB	0.03 dB	0.05 dB
1548.3 nm	0 dB	0.05 dB	0.2 dB	0.6 dB	1.1 dB

nm, 1548.3 nm인 경우 모든 WDM 채널은 OPC의 3-dB 대역폭 내에 포함되는 채널(in-band 채널이라 하자)이 된다. 하지만 표 4와 같이 WDM 각각의 채널은 신호 파장이 다르기 때문에 OPC 펌프 광 파장에 대해 각각 다른 변환 효율을 갖는다.

#### IV. 시뮬레이션 결과 및 검토

채널 왜곡 보상을 위해 HNL-DSF OPC를 이용한 MSSSI 기법을 채택한 1,000 km의 채널 비트율 40 Gbps의 5-채널 WDM 시스템에서의 채널 보상 정도를 시뮬레이션을 통해 확인·분석하는 과정은 다음과 같다.

먼저 앞선 연구의 결과, 즉 전송 거리 1,000 km의 WDM 시스템의 모든 채널에 대해 최상의 보상을 얻을 수 있는 OPC 펌프 전력인 18.5 dBm에서 WDM 광 전송 링크의 분산 계수 값을 각각 0.1, 0.4, 1.6, 3.2 ps/nm/km 등으로, 그리고 OPC의 펌프 파장을 1549.5 nm와 1548.3 nm로 설정한 경우에 대해 입력

전력 변화에 따른 채널별 눈 열림 패널티를 확인·분석하였다.

그런 후 비교적 높은 분산 계수인 1.6 ps/nm/km와 3.2 ps/nm/km의 광섬유로 구성된 각각의 시스템에서 OPC를 통한 전력 변환비(Power Conversion Ratio: 그림 1에서  $P_s(0)/P_c(0)$ 로 정의)가 18.5 dBm보다 낮게 나타나는 18.2 dBm과 높게 나타나는 18.7 dBm의 펌프 전력<sup>[6]</sup>, 그리고 각각의 경우 펌프 파장을 1549.5 nm와 1548.3 nm로 달리 설정했을 때의 입력 전력 변화에 따른 채널별 눈 열림 패널티를 확인하고 이들 결과를 상호 분석, 또는 OPC 펌프 전력이 18.5 dBm인 경우의 결과와도 비교·분석하였다.

마지막으로 HNL-DSF OPC를 이용한 MSSSI 기법이 장거리 대용량 WDM 시스템의 전체 채널 왜곡 보상 기법으로 유용한 지를 채널별 수신 감도의 관점에서 살펴보기 위하여 OPC의 펌프 전력이 18.2 dBm인 경우 다양한 펌프 파장에서의 수신 신호 전력 변화에 따른 BER 특성을 도출·분석해 보았다. 그림 4는 HNL-DSF OPC에 파장이 1549.5 nm,

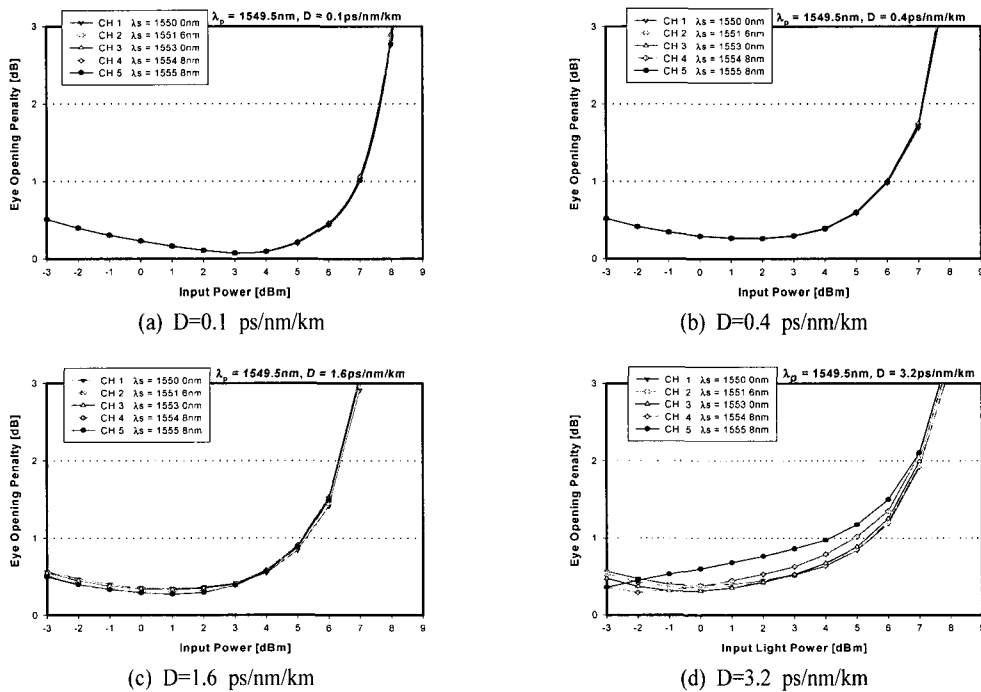


그림 3. 펌프 파장이 1549.5 nm, 펌프 전력이 18.5 dBm인 경우 다양한 광섬유 분산 계수에서 입력 신호 전력 변화에 따른 눈 열림 패널티

Fig. 3. Eye opening penalty as a function of the input signal light power for the various fiber dispersion coefficients in the case of 1549.5 nm pump wavelength and 18.5 dBm pump power in OPC.

전력이 18.5 dBm인 펌프 광을 사용한 경우 다양한 광섬유 분산 계수에서 입력 신호와 전력 변화에 따른 눈 열림 패널티 특성을 나타낸 것이다. 우선 비교적 적은 분산 계수( $D=0.1\sim 1.6$  ps/nm/km)의 광 전송 링크를 전파하는 WDM 채널들은 MSSSI 기법을 통해 동일하거나 매우 비슷한 품질로 보상되는 것을 알 수 있다. 그러나 광섬유의 분산 계수가 증가할수록 광 펄스가 점차 빨리 퍼지게 되므로 광 신호 순시 강도와 그로 인한 광 신호의 SPM에 의한 위상 변화가 광 펄스가 전파하면서 겪게 되는 위상 변화를 상쇄시킬 수 없을 정도로 줄어들어 진폭 변조로 전환되는 양이 증가되기 때문에 1 dB EOP 품질을 유지할 수 있는 채널의 최대 송신 전력이 점차 감소하는 것을 알 수 있다.

또한 광섬유의 분산 계수가 상대적으로 큰 WDM 시스템에서는 채널별 보상 정도에 차이가 생겨서 ( $D=3.2$  ps/nm/km에서 1 dB EOP 기준 채널 간 파워 패널티가 1.2 dB 정도이다) 광섬유의 ZDW에서 먼

파장을 갖는 채널일수록 보상 효과가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이는 광 펄스의 내부 위상 변화를 상쇄시킬 수 있는 광 펄스의 SPM에 의한 위상 변화량이 큰 분산 계수의 광섬유에서 더욱 감소되었고, 더욱이 다른 채널에 비해 OPC에서의 변환 효율이 낮은 채널 4와 채널 5의 DSF2로 입사하는 공액파 전력이 상대적으로 크게 감소되었기 때문이다.

그림 5는 HNL-DSF OPC에 파장이 1548.3 nm, 전력이 18.5 dBm인 펌프 광을 사용한 경우 다양한 광섬유 분산 계수에서 입력 신호와 전력 변화에 따른 눈 열림 패널티 특성을 나타낸 것이다. 광섬유의 분산 계수가 증가할수록 채널 간 전체 파워 패널티가 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 광섬유의 분산 계수에 상관없이 OPC에서의 변환 효율을 동일하거나 비슷하게 갖는 채널 1, 채널 2, 채널 3은 거의 비슷한 품질로 보상된다.

그림 6은 HNL-DSF OPC의 파장이 1549.5 nm로 고정되어 있는 반면에 펌프 전력을 18.2 dBm과

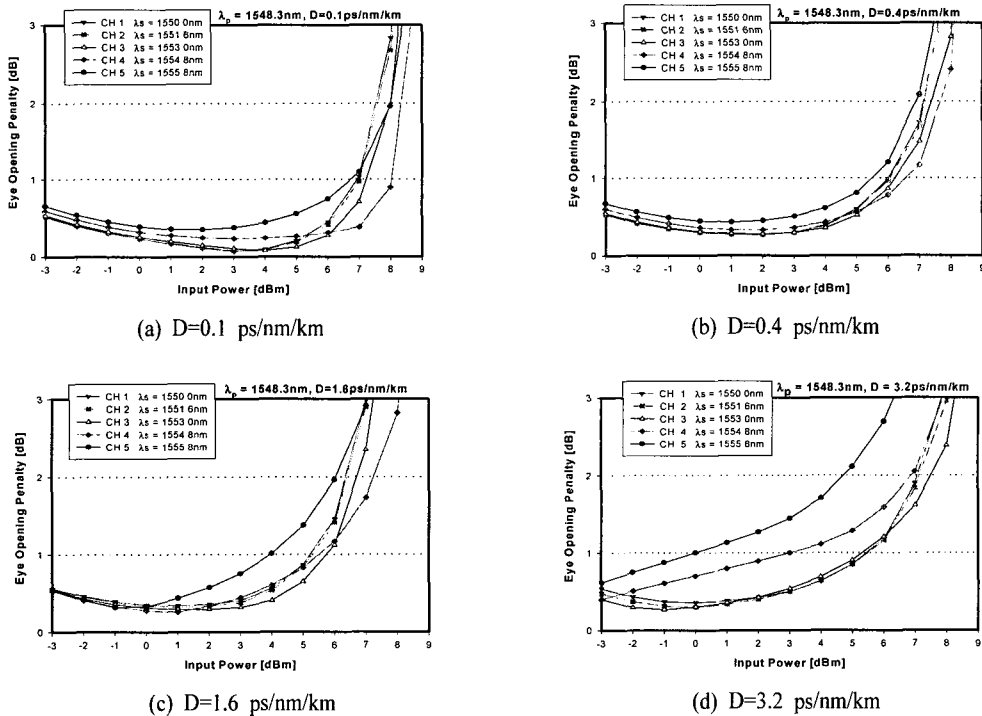


그림 4. 펌프 파장이 1548.3 nm, 펌프 전력이 18.5 dBm인 경우 다양한 광섬유 분산 계수에서 입력 신호 전력 변화에 따른 눈 열림 패널티

Fig. 4. Eye opening penalty as a function of the input signal light power for the various fiber dispersion coefficients in the case of 1548.3 nm pump wavelength and 18.5 dBm pump power in OPC.

200 Gbps WDM 시스템에서 Mid-Span Spectral Inversion 기법을 이용한 채널 왜곡의 보상 특성

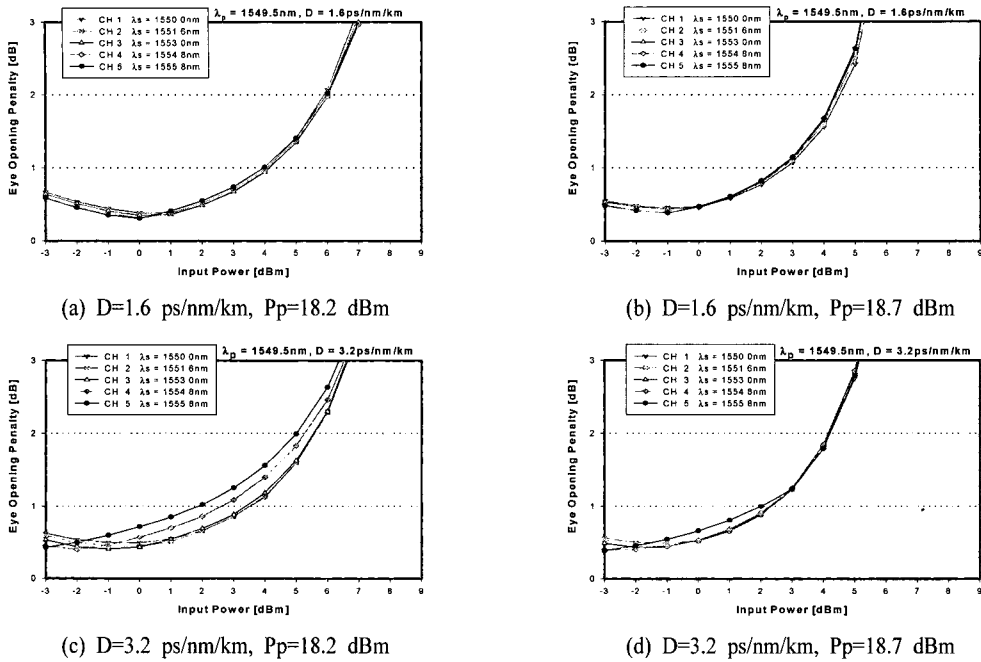


그림 5. 펌프 파장이 1549.5 nm이고 펌프 전력과 광섬유의 분산 계수에 변화를 준 경우에서 입력 신호 전력 변화에 따른 눈 열림 패널티

Fig. 5. Eye opening penalty as a function of the input signal light power for the various fiber dispersion coefficients and pump power in the case of 1549.5 nm pump wavelength in OPC.

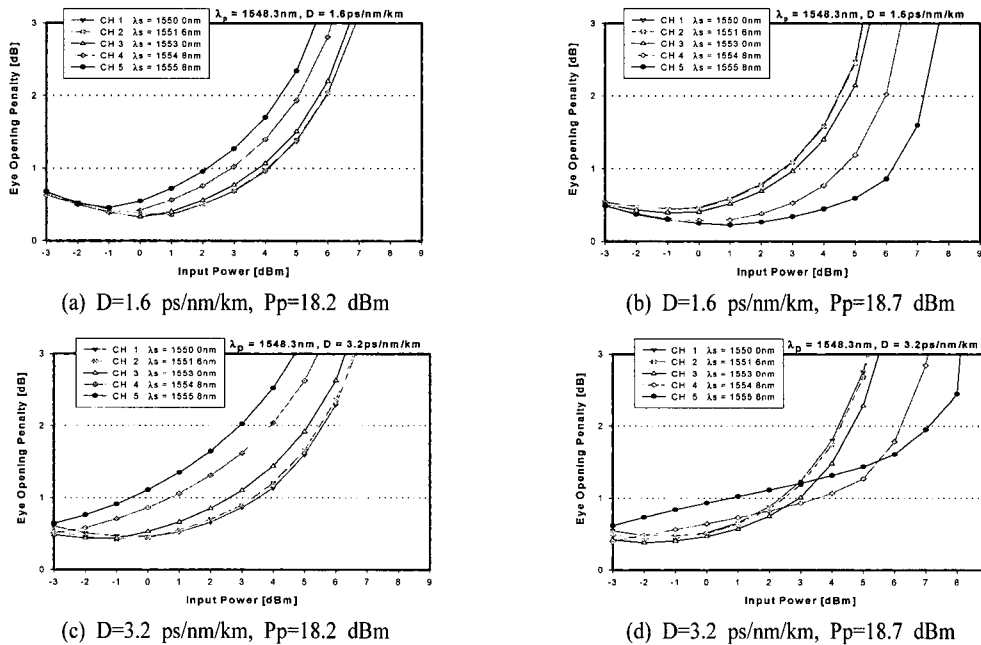


그림 6. 펌프 파장이 1548.3 nm이고 펌프 전력과 광섬유의 분산 계수에 변화를 준 경우에서 신호 전력 변화에 따른 눈 열림 패널티

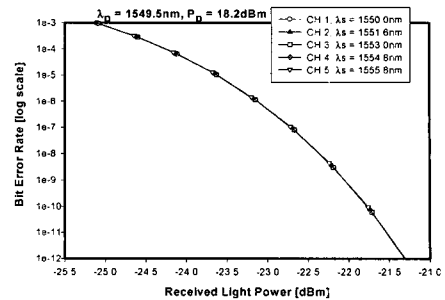
Fig. 6. Eye opening penalty as a function of the input signal light power for the various fiber dispersion coefficients and pump power in the case of 1548.3 nm pump wavelength in OPC.

18.7 dBm의 두 가지 경우 각각에서의 1.6 ps/nm/km 와 3.2 ps/nm/km의 광섬유 분산 계수를 갖는 MSSI WDM 시스템에서의 입력 신호와 전력 변화에 따른 눈 열림 패널티를 나타낸 것이다. 우선 OPC의 펌프 전력이 18.5 dBm에서의 WDM 채널 보상 정도를 나타낸 그림 4(c)와 비교해보면,  $D=1.6$  ps/nm/km의 WDM 시스템에서 펌프 전력이 18.2 dBm인 경우와 18.7 dBm인 경우 1 dB EOP가 되는 송신 전력이 각각 약 1 dBm, 2 dBm 정도 감소하는 것을 알 수 있다.

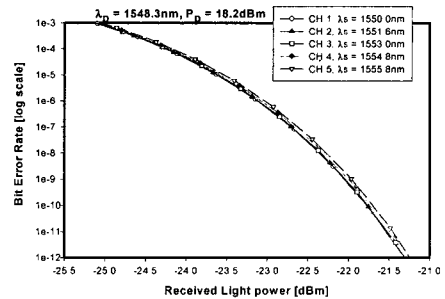
그리고  $D=3.2$  ps/nm/km의 시스템에서도 OPC의 펌프 전력 변화에 따라 비슷한 결과가 나타남을 알 수 있다. 그러나 OPC 펌프 전력이 각각 18.2 dBm, 18.5 dBm인 경우의 WDM 채널 전체 파워 패널티가 1.5 dB인 반면, OPC 펌프 전력이 18.7 dBm인 경우에는 파워 패널티가 0.3 dB 정도로 전체 WDM 채널에서 MSSI 기법을 통한 보상이 균등하게 얻어 지는 것을 확인할 수 있다.

그림 7은 HNL-DSF OPC의 펌프 파장을 1549.5 nm에서 1548.3 nm로 변화를 주고 나머지 파라미터를 그림 6의 경우와 동일하게 한 MSSI WDM 시스템에서의 입력 신호와 전력 변화에 따른 눈 열림 패널티를 나타낸 것이다. 우선, 그림 6과는 달리 1 dB EOP 파워 패널티는 OPC 펌프 전력과 전송 링크의 분산 계수 값에 따라 2~4 dB까지 비교적 크게 나타난다. 이는 HNL-DSF OPC의 펌프 파장이 ZDW에서 더욱 떨어진 파장을 사용하므로써 채널마다의 변환 효율이 표 4에서와 같이 차이가 나기 때문이다. 즉 OPC에서 생성된 각 채널의 공액파 전력의 크기가 자기 다른 변환 효율에 의해 달라지게 되고, 결국 DSF2에서 SPM에 의한 위상 변동의 크기가 채널마다 달라지기 때문이다.

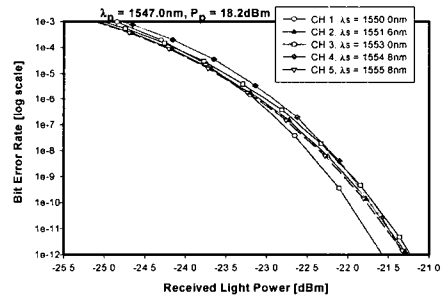
여기서 한가지 주목해야 할 결과는 광섬유 분산 계수가 1.6 ps/nm/km인 경우에서 OPC의 펌프 전력이 18.2 dBm이면 OPC에서의 변환 효율이 낮은 채널일수록 보상 품질이 떨어지지만 OPC의 펌프 전력이 18.7 dBm인 경우에는 보상 품질이 더욱 좋아진다는 것이다. 그러나 광섬유 분산 계수가 3.2 ps/nm/km, OPC의 펌프 전력이 18.7 dBm인 경우에서 낮은 효율로 변환되는 채널 4와 채널 5의 보상 품질은 다른 채널에 비해 저하된다. 달리 말해서



(a)  $\lambda_p=1549.5$  nm



(b)  $\lambda_p=1548.3$  nm



(c)  $\lambda_p=1547.0$  nm

그림 7. 펌프 광 전력이 18.2 dBm인 경우 다양한 펌프 광 파장에서 비트 에러율 특성

Fig. 7. Bit error rate characteristics dependence on the variation of received power for the various OPC pump wavelengths.

OPC의 펌프 전력이 18.2 dBm에서 18.7 dBm으로 증가됨에 따라 OPC의 변환 효율이 높은 채널들의 보상 정도는 상대적으로 감소하는 반면에 OPC의 변환 효율이 낮은, 즉 다른 채널에 비해 공액파 전력이 낮은 채널들의 보상 정도는 개선된다.

이것은 OPC의 펌프 전력이 OPC를 중심으로 한 첫 번째 전송 링크에서의 신호 평균 전력보다 두 번째 전송 링크에서의 공액파 평균 전력을 크게 만드



는 값 이상으로 증가하면 OPC에서의 변환 효율이 높은 WDM 채널들, 즉 채널 1, 채널 2, 채널 3은 공액파 변화 시 전력 증가분이 생기고 이 잉여 전력들이 두 번째 전송 링크를 전파하면서 겪게 되는 SPM의 근원이 되기 때문에 보상 효율이 저하되는 것이라고 할 수 있다. 반면에 공액파 변환 효율이 낮은 채널 신호들은 높은 펌프 전력과의 결합에 의해 첫 번째 전송 링크에서의 신호 평균 전력의 크기에 준하는 공액파로 증폭 변환되었기 때문에 상대적인 보상 효율이 개선되는 것이라고 할 수 있다.

이 결과는 그림 6(d)에서의 MSSI 기법을 통한 WDM 전체 채널 파워 페널티가 0.3 dB로 다른 경우에 비해 크게 개선되는 것의 이유이기도 하다.

그림 8은 OPC의 펌프 전력이 18.2 dBm인 경우 다양한 펌프 파장에서 MSSI 기법을 통해 보상된 수신 신호 전력 변화에 따른 BER 특성을 나타낸 것이다. 우선 앞선 눈 열림 페널티 특성에서의 결과와 마찬가지로  $10^{-9}$  BER 기준 WDM 채널 파워 페널티가 OPC의 펌프 파장이 1549.5 nm, 1548.3 nm, 1547 nm인 경우 각각 0 dB, 0.2 dB, 0.4 dB로 펌프 파장이 OPC의 ZDW에서 멀어질수록 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 최대 파워 페널티가 0.4 dB 정도로 얻어진다는 것은 HNL-DSF OPC를 이용한 MSSI 기법이 매우 낮은 송신 전력을 갖는 모든 in-band 채널의 보상에 매우 유용하다는 것을 의미하는 것이다.

## V. 결 론

지금까지 광섬유의 색 분산과 비선형 효과에 의해 왜곡된 채널 신호를 보상하기 위한 방법으로 다양한 펌프 광 파장과 전력을 갖는 HNL-DSF OPC를 이용한 PAIA MSSI를 채택한 총 전송 거리 1,000km의 채널 비트율 40 Gbps의 5-채널 IM/DD WDM 시스템의 시뮬레이션을 통하여 in-band 채널 각각의 MSSI 보상 특성을 다양한 광섬유 분산 계수를 고려하여 분석해 보았다.

먼저 OPC를 중심으로 한 첫 번째 전송 링크에서의 신호 평균 전력과 두 번째 전송 링크에서의 공액파 평균 전력을 동일하게 만드는 펌프 전력인 18.5 dBm의 OPC를 이용한 시스템에서 OPC 펌프 파장이 ZDW에 근접한 1549.5 nm인 경우 비교적 낮은 분산 계수의 광 전송 링크를 전파하는 WDM 채널들은

MSSI 기법을 통해 동일하거나 매우 비슷한 품질로 보상되는 것을 알 수 있었다. 또한 OPC 파장이 1548.3 nm인 경우 광섬유의 분산 계수가 증가할수록 채널 간 전체 파워 페널티가 증가하지만 OPC에서의 변환 효율을 동일하거나 비슷하게 갖는 채널들은 광섬유의 분산 계수에 상관없이 매우 동일한 품질로 보상되는 것을 확인할 수 있었다.

그리고 OPC의 펌프 전력을 OPC를 중심으로 한 첫 번째 전송 링크에서의 신호 평균 전력보다 두 번째 전송 링크에서의 공액파 평균 전력을 크게 만드는 값 이상으로 증가시키면 OPC에서의 변환 효율이 높은 WDM 채널들은 공액파 변화 시 생성된 전력 증가분과 그로 인한 SPM에 의한 잉여 신호 왜곡 때문에 보상 효율이 저하되는 반면에 공액파 변환 효율이 낮은 채널 신호들은 높은 펌프 전력과의 결합에 의해 첫 번째 전송 링크에서의 신호 평균 전력의 크기에 준하는 공액파로 증폭 변환되었기 때문에 보상 효율이 개선된다는 것을 확인할 수 있었다.

즉 시스템 전송 길이, 광섬유의 분산 계수, OPC 펌프 광 파장, OPC에서의 WDM 신호 파장에 따른 공액파 변환 효율 등에 관계하여 OPC를 중심으로 한 첫 번째 전송 링크에서의 신호 평균 전력과 두 번째 전송 링크에서의 공액파 평균 전력을 동일하게 만드는 펌프 광 전력을 적절히 선택하면 HNL-DSF가 MSSI 보상을 통한 광대역 WDM 시스템의 OPC에서의 광대역 비선형 매질로 매우 적합하다는 것을 확인할 수 있었다.

또한 다양한 OPC 펌프 파장에서 MSSI 기법을 통해 보상된 수신 신호 전력 변화에 따른 BER 특성에 대한 고찰 결과 OPC의 펌프 파장이 ZDW에서 멀어지더라도  $10^{-9}$  BER 기준 채널 간 파워 페널티가 1 dB 이내로 얻어질 수 있을 만큼 HNL-DSF OPC를 이용한 MSSI 기법이 모든 in-band 채널의 보상에 매우 유용하다는 것을 확인할 수 있었다.

앞으로의 연구에서는 본 논문에서 얻은 최적 파라미터를 바탕으로 한 WDM 시스템에서 XPM 뿐만 아니라 EDFA의 축적 자연 방출(ASE: Accumulated Spontaneous Emission) 잡음 등이 장거리 대용량 전송에 미치는 영향과 이의 개선을 위해 PAIA MSSI 기법을 채택한 경우의 보상 특성을 고찰해 보도록 하겠다.

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.

[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] S. Watanabe, S. Takada, G. Ishikawa, H. Ooi, J. G. Nielson and C. Sonne, "Simultaneous wave length conversion and optical phase conjugation of 200 Gb/s ( $5 \times 40$  Gb/s) WDM signal using a highly nonlinear fiber four-wave mixer", *IOOC/ ECOC '98, PD Paper TA3A*, pp. 1-4, 1997.

[6] 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.*, vol. LT-21, 2003.

[7] 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.

[8] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, pp. 34-44, 1989.

[9] R. J. Nuyts, L. D. Tzeng, O. Mizuhara and P. Gallion, "Effects of transmitter speed and receiver bandwidth on the eye margin performance of a 10-Gb/s optical fiber transmission system", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 9, no. 4, pp. 532-535, 1997.

[10] 이성렬, 김남성, 방효창, "Mid-Span Spectral Inversion 기법을 채택한 장거리 광 전송 시스템에서의 비트 에러율 평가", *한국항행학회논문지*, 6(3), pp. 223-230, 2002년.

이 성 렬



1990년 2월: 한국항공대학교 항공통신정보공학과 (공학사)  
 1992년 8월: 한국항공대학교 대학원 항공통신정보공학과 (공학석사)  
 1992년 8월~1994년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 조교  
 1996년 1월~2002년 5월: (주)세영

통신 전파기술연구소 책임연구원

2002년 2월: 한국항공대학교 대학원 항공통신정보공학과 (공학박사)

2002년 6월~현재: (주)에이티엔 기술연구소 연구소장  
 [주 관심분야] 솔리톤 전송 시스템, 광 파장 분할 다중화, 광의 비선형 현상 분석