

0.96 Tbps WDM 신호의 고성능 전송

Transmission of 0.96 Tbps WDM Signal with High Performance

이성렬¹

¹ 전남 목포시 목포해양대학교 해양전자통신공학부
E-mail: reallee@mmu.ac.kr

요 약

광 위상 공액기(OPC ; Optical Phase Conjugator)를 이용하여 WDM 채널들의 광 신호의 왜곡을 보상하는 MSSI (Mid-Span Spectral Inversion) 기술에서 OPC를 중심으로 한 광 전력과 색 분산 비대칭에 의한 한계를 OPC의 위치 변동과 그에 따른 광섬유 구간의 최적 분산 계수들의 적용만으로도 극복할 수 있다는 것을 살펴보았다.

Key Words : Optical Phase Conjugator, OPC position offset, dispersion offset, MSSI, WDM System

1. 서 론

20 Gbps 이상의 진폭 변조를 기초로 한 광 전송 시스템에서 전송 성능을 저하시키는 주요 원인들 중 하나는 색 분산 (chromatic dispersion)과 비선형성(nonlinearity)의 상호 작용에 의한 신호 왜곡이다[1], [2]. 이러한 한계를 극복하기 위하여 광이나 전기적인 부가 처리를 이용한 다양한 기술들이 제안되었다 [3]-[6]. 이 기술들 중 전체 전송로의 중간에 광 위상 공액기 (OPC ; optical phase conjugator)를 두어 전송되는 광 신호의 스펙트럼을 반전시켜 신호 왜곡을 보상하고자 하는 MSSI(mid-span spectral inversion) 기술은 색 분산에 의한 왜곡뿐만 아니라 비선형 효과에 의한 왜곡도 보상할 수 있다[7],[8]. 그러나 이 MSSI 기술은 전체 전송 거리 중간에 대하여 색 분산량과 광 전력이 대칭을 이루어야 효과적인 보상을 얻을 수 있는데 광섬유에 존재하는 손실 때문에 대칭을 만들기가 매우 어렵다.

MSSI 기술을 대용량 WDM 시스템에 적용하는데 있어 언급한 색 분산량과 광 전력의 대칭화 문제 외에 OPC에 입력되는 광 신호를 공액과 (phase conjugate)로 만들어 스펙트럼 반전을 하는데 있어 모든 WDM 파장에 대해 균일한 효율로 수행해야 한다. 즉 OPC의 변환 효율 (conversion efficiency : OPC로 입력된 신호 전력 대 OPC의 비선형 매질에서 4-광파 혼합 (FWM ; four-wave mixing)에 의해 변

환된 공액과 전력의 비) 특성이 광대역이어야 한다. 다행스럽게도 OPC의 비선형 매질로 분산 천이 광섬유 (DSF ; dispersion shifted fiber) 대신에 HNL-DSF (highly nonlinear-DSF)를 사용하면 변환 효율을 광대역에 걸쳐 균일하게 할 수 있다[9].

그러나 OPC의 비선형 매질로 HNL-DSF가 적용되더라도 실제 광 전송로의 본질적 특성에 기인하는 색 분산량과 광 전력의 비대칭은 여전히 해결해야 할 문제로 남는다. 더욱이 광대역 WDM 시스템 구현을 위해 이 문제를 특정한 한 파장이 아닌 모든 WDM 채널 파장들에 적용할 수 있도록 해결해야 한다.

WDM 전 대역에 대한 색 분산량과 광 전력의 대칭화를 대체할 수 있는 새로운 기술을 지난 연구를 통해 제안하였다[10]. 이 기술은 WDM 채널 중 파장이 가장 작은 채널과 가장 큰 채널을 동시에 최적으로 보상할 수 있는 OPC의 위치와 광섬유 구간의 분산 계수 값을 찾고 그 값들을 WDM 시스템에 적용하여 모든 WDM 채널들이 비슷한 정도로 보상되는지를 확인하여 이루어졌다. 선행 연구에서 가정된 WDM 시스템은 변조 방식이 NRZ인 40 Gbps의 비트율의 16 채널 전송시스템이었다.

본 논문에서는 선행 연구에서 제안한 방법이 NRZ가 아닌 RZ 전송에도 적용될 수 있는지, 그리고 채널 수를 확장하여 24 채널 방식 (총 전송률 = 0.96 Gbps)에도 적용될 수 있는지를 확인해 보고자 한다.

2. WDM 시스템 모델

수치적 분석은 식 (1)에 주어진 비선형 슈뢰딩거 방정식을 통해 이루어진다[11]. 즉 WDM의 j-번째 채널의 포락선 A_j 는 식 (1)에 따라 광섬유의 z 방향으로 진행해 간다. 식 (1)의 수치적 분석은 단계 분할 푸리에 (SSF ; split-step Fourier) 기법을 이용하여 이루어진다[11].

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

여기서 $j, k=1, 2, \dots, 24 (j \neq k)$, α 는 광섬유의 손실 계수, A_j 는 j-번째 채널의 신호 파장, β_{2j} 는 색 분산 파라미터, β_{3j} 는 3차 색 분산 파라미터, γ_j 는 비선형 계수, $T=t-z/v_g$ 이다. 식 (1) 우변의 마지막 두 항은 각각 비선형 효과 중 자기 위상 변조 (SPM ; self phase modulation)와 상호 위상 변조 (XPM ; cross phase modulation)를 유도한다. WDM 신호에 대한 XPM의 영향은 WDM 시스템의 광섬유 분산 계수가 클수록 감소한다[12]. 본 논문에서 가정한 광섬유는 표 1과 같이 비영 분산 천이 광섬유 (NZ-DSF ; non zero DSF)로 하였고, 그 분산 계수 값은 XPM에 의한 왜곡이 미미하게 나타나는 3 ps/nm/km로 하였기 때문에 XPM의 영향은 무시하였다.

표 1. 광섬유 파라미터

Parameter	Symbol & Value
Type	NZ-DSF
Chromatic dispersion	$D_{1x} = 3 \text{ ps/nm/km}$
Nonlinear refractive Index	$n_2 = 2.5 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$
Attenuation	$\alpha = 0.2 \text{ dB/km}$
Effective core area	$A_{\text{eff}} = 72 \text{ } \mu\text{m}^2$

그림 1은 OPC가 전체 전송 거리의 중간에 위치한 강도 변조 / 직접 검파 (IM/DD ; Intensity Modulation / Direct Detection) WDM 시스템의 전체 구성을 나타낸 것이다 (즉 MSSD). 총 전송 거리는 상대적인 길이 $l_1 (= L/2)$ 과 l_2 의 두 전송 구간(section)으로 나뉜다. 각 전송 구간은 50 km 간격(1)을 갖는 에르븀 첨가 광섬유 증폭기 (EDFA ; erbium-doped fiber amplifier) 10개로 연결되는 것으로 가정하였다.

그림 1의 송신부에서의 각 레이저 다이오드는 서로 독립적인 40 Gbps 128($=2^7$) PRBS (pseudo random bit sequence)에 의해 강도 변조되는 것으로 가정하였다. 이 때 외부 광 변조기로부터 발생하는 출력 전계 강도는 PZ 형식의 2차 가우시안 펄스로 모델링하였다. 또한 수신부는 5 dB의 잡음 지수를 갖는 전치 증폭기, 1 nm 대역폭의 광 필터, PIN 다이오드, 버터워스 형태의 펄스 정형 필터와 판별 회로로 구성된 직접 검파 (direct detection) 방식의 수신기로 가정하였다[14]. 그리고 수신 대역폭은 0.65 x 비트율로 가정하였다.

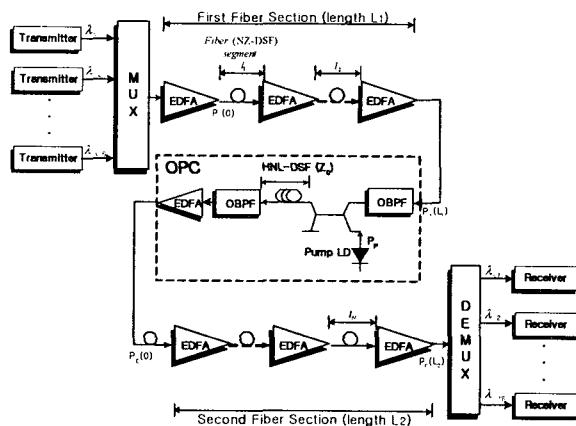


그림 2. 24x40 Gbps WDM 시스템의 구성

표 2. HNL-DSF 파라미터

Parameter	Symbol & Value
Loss	0.61 dB/km
Nonlinear coefficient	$20.4 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$
Length	0.75 km
Zero Dispersion Wavelength	1550.0 nm
Dispersion slop	$0.032 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$
Pump light power	18.5 dB
Pump light wavelength	1549.75 nm

그림 2에 나타낸 HNL-DSF를 이용한 OPC의 파라미터 값들은 표 2에 나타났다. 표 2의 파라미터 값에 따른 OPC의 변환 효율의 3-dB 대역폭은 48 nm (1,526 ~ 1,574 nm)로 얻어진다.

WDM 채널들의 중심 주파수들을 ITU-T 권고에 따라 100 GHz (즉 0.8 nm)의 등간격으로 분할하였다[15]. 24 채널 중 첫 번째 채널의 중심 주파수는 1550.0 nm로 가정하였다. 따라서 24개의 신호 파장들(1550.0 ~ 1568.4 nm)과 이들의 공역파 파장들(1531.1 ~ 1549.5 nm) 모두 그림 3의 변환 효율 3-dB 대역폭 안에 포함된다.

3. 최적 파라미터의 도출 방법

Watanabe와 Shirasaki는 MSSI에서 완벽한 보상 조건을 아래와 같이 거리 z 의 함수로 일반화하였다[16].

$$\frac{\beta_{2j}(-z_1')}{P_j(-z_1')\gamma_j(-z_1')} = \frac{\beta_{2j}(z_2')}{P_j(z_2')\gamma_j(z_2')} \quad (2)$$

이 관계식은 위치 $-z_1'$ 과 z_2' 에서 분산과 비선형성이 동일한 비율로 형성되기만 하면 완벽한 보상이 이루어진다는 것을 의미한다. 달리 말해, 이것은 완벽한 보상을 위해서는 신호 파장과 관련하여 OPC가 전체 전송 거리 중간에 반드시 위치할 필요가 없고, 두 광섬유 구간의 분산 계수들도 서로 반드시 같을 필요를 없음을 의미한다. 그러나 WDM 시스템에서 채널들의 파장이 다양하기 때문에 모든 파장에 적용 가능한 공통의 OPC 위치와 광섬유 구간의 분산 계수 값을 찾는 것이 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 수치적 분석을 통해 모든 WDM 채널을 최적으로 보상할 수 있는 OPC의 최적 위치와 광섬유 구간들의 분산 계수 값을 도출해 보고자 한다.

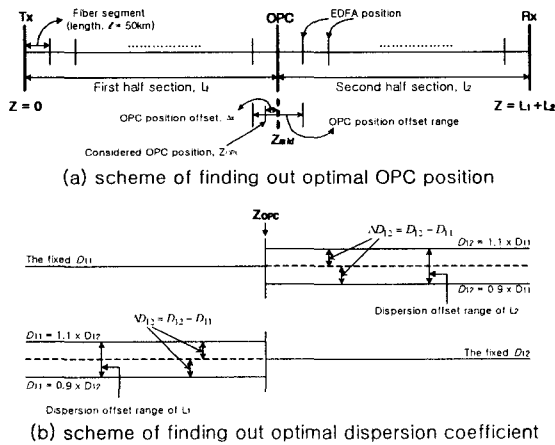


그림 3. 최적 파라미터 도출 개념도

최적 OPC 위치는 OPC 위치 오프셋 Δz 에 따른 두 채널 사이의 파장 차이가 가장 큰 채널 1과 24의 눈 열림 패널티 (EOP ; eye opening penalty)를 비교 분석하여 찾는다. Δz 는 OPC 위치(z_{OPC})와 전체 전송 거리의 중간 위치 (z_{mid})의 차이, 즉 $\Delta z = z_{OPC} - z_{mid}$ 로 정의된다. 여기서 그림 4(a)에서처럼 z_{mid} 는 500 km 이고 z_{OPC} 는 z_{mid} 을 중심으로 증폭기의 한 간격 (즉 ± 50 km) 내에서 변화시킨다. 또한 각 광섬유 구간의 최적 분산 계수 값은 분산 계수 오프셋 ΔD_{1x} 에 따른 채널 1과 24의 EOP를 비교 분석하여 찾는다. ΔD_{1x} 는 그림 4(b)에서

보여지듯 두 광섬유 구간의 분산 계수 차이로 정의된다. 즉 첫 번째 광섬유 구간의 분산 계수 오프셋은 $\Delta D_{11} = D_{11} - D_{12}$ 로 정의되는데, 여기서 D_{12} 는 3 ps/nm/km로 고정시키지만 D_{11} 는 고정된 D_{12} 값의 90~110 % 범위 내에서 변화시킨다. 그리고 두 번째 광섬유 구간의 분산 계수 오프셋은 $\Delta D_{12} = D_{12} - D_{11}$ 로 정의되는데, 여기서 D_{11} 는 3 ps/nm/km로 고정시키지만 D_{12} 는 고정된 D_{11} 값의 90~110 % 범위 내에서 변화시킨다.

4. 시뮬레이션 및 결과 고찰

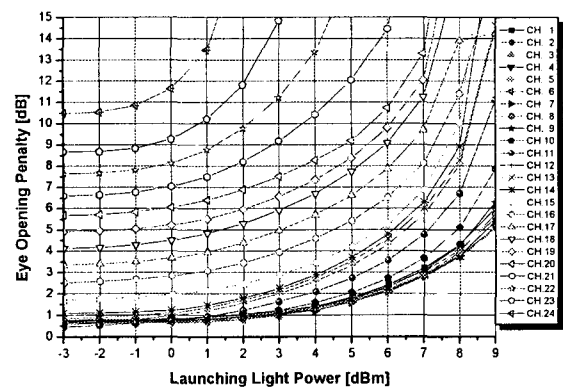
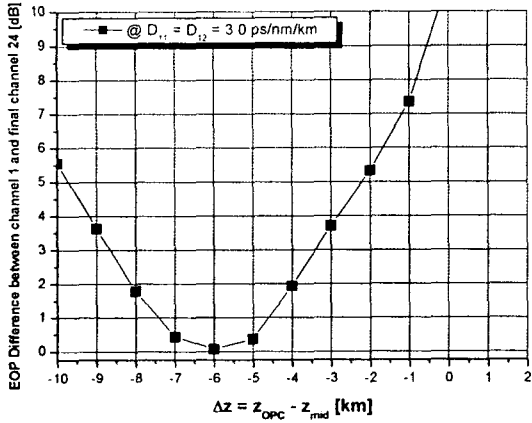


그림 5. MSSI 기술이 적용된 WDM 시스템에서 입사 전력에 따른 EOP

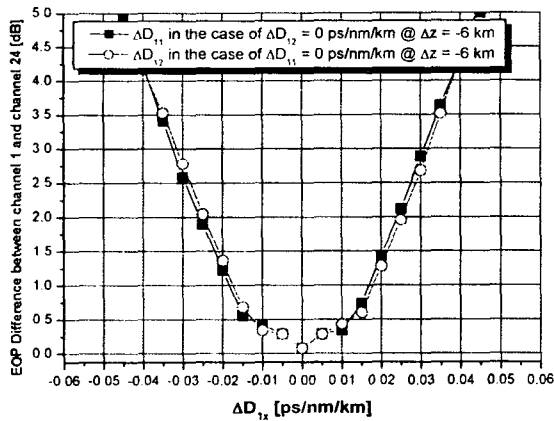
그림 5는 전통적 MSSI 기술이 적용된 24 채널 WDM 시스템에서의 입사(입력) 광 전력에 따른 전체 채널들의 눈 열림 패널티 (EOP ; eye opening penalty)를 나타낸 것이다. WDM 채널의 신호 파장이 OPC의 영 분산 파장 (zero dispersion wavelength)으로부터 멀어질수록 (즉, 채널 번호가 증가할수록) EOP 특성이 나빠지는 것을 알 수 있다. 따라서 MSSI 기술을 WDM 시스템에 직접 적용하여 WDM 채널 수를 증가시키는 것에는 한계가 있는 것을 확인할 수 있다.

그림 6(a)는 두 광섬유 구간의 분산 계수가 3 ps/nm/km로 고정되었을 때 OPC 위치 편차 Δz 에 따른 채널 1과 24의 EOP 차이를 나타낸 것이고, 그림 6(b)는 그림 6(a)에서 구한 최상의 Δz 에 OPC가 위치했을 때 분산 계수 편차 ΔD_{1x} 에 따른 채널 1과 24의 EOP 차이를 나타낸 것이다. 여기서 EOP 차이를 채널 1과 24에 대해서만 살펴보는 것은 이 두 채널의 파장 차이가 가장 크기 때문에 EOP 차이를 최소화 하는 최적 파라미터 값들이 24 채널 모두에도 영향을 미칠 수 있다는 이유 때문이다. 채널 1과 24의 EOP 차이를 최소화 하는 최적 OPC 위치는 494 km (즉, $\Delta z = -6$ km) 이고, 이 위

치에서 각각의 광섬유 구간의 최적 분산 계수 편차는 모두 0 ps/nm/km인 것을 그림 6을 통해 알 수 있다. 즉 OPC가 496 km에 위치한 경우 첫 번째 광섬유 구간의 분산 계수와 두 번째 광섬유 구간의 분산 계수 모두 3 ps/nm/km이어야 한다는 것을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 6. 채널 1과 24의 EOP 차이 (a) $D_{11} = D_{12} = 3$ ps/nm/km에서 Δz 에 의존하는 경우 (b) 그림 (a)에서 구한 최상 Δz 에 OPC가 위치하고 ΔD_{1x} 에 의존하는 경우

그림 7은 그림 6의 결과가 실제 WDM 시스템에 미치는 영향을 알아보기 위하여 그림 6의 결과, 즉 $\Delta z = -6$ km, $D_{11} = D_{12} = 3$ ps/nm/km로 설정된 WDM 시스템에서의 전체 채널에 대한 입사 광 전력에 따른 EOP를 나타낸 것이다. 그림 6으로부터 얻은 최적 파라미터들이 WDM 시스템에 적용되면 MSSI(그림 5의 경우)에 비해 파장이 큰 채널들의 EOP가 크게 좋아져서 WDM 시스템 전반의 수신 성능이 큰 폭으로 개선되는 것을 알 수 있다. 즉 1 dB EOP를 전송 성능의 기준으로 한다면 MSSI에서의 정할 수 없었던 전력 매널티가 3.5 dB 정도로 감소되는 것을 확인할 수 있다. 이것은

OPC를 이용한 WDM 시스템에서 색 분산량과 광 전력을 대칭시키지 않더라도 OPC의 최적 위치와 그에 의존하는 광섬유 구간의 최적 분산 계수 값의 적용만으로도 전체 채널의 성능 개선을 가능하게 할 수 있다는 것을 의미한다.

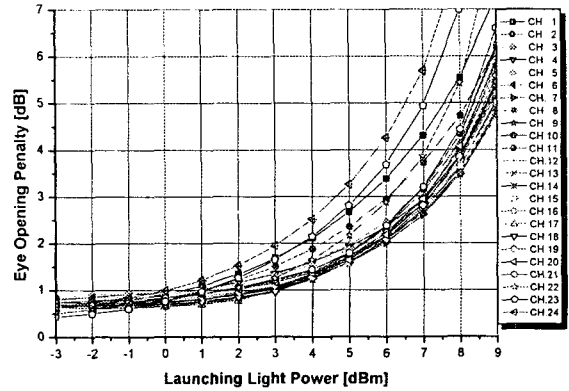
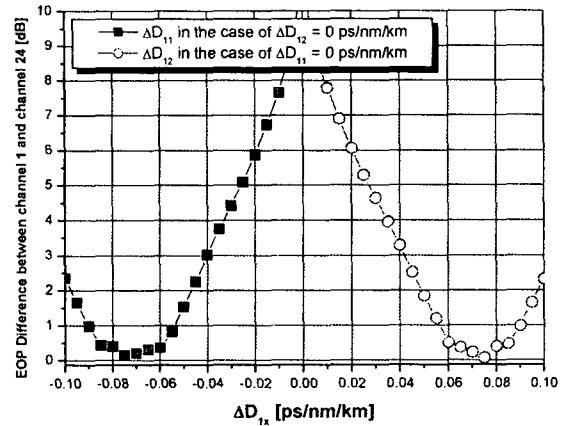
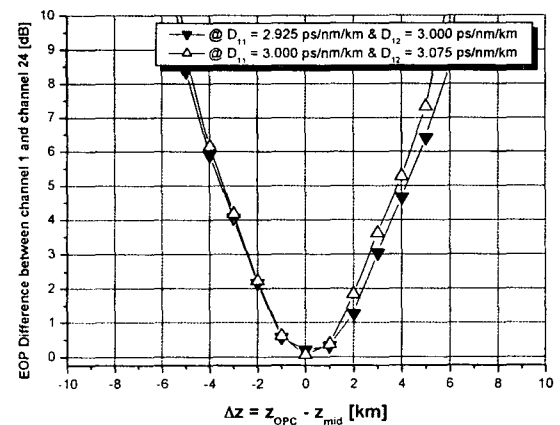


그림 7. 그림 6의 최적 파라미터들이 채택된 WDM 시스템에서 입사 광 전력에 따른 EOP



(a)



(b)

그림 8. 채널 1과 24 사이의 EOP 차이 (a) $\Delta z = 0$ km에서 ΔD_{1x} 에 의존하는 경우 (b) 그림 (a)에서 구한 최상 ΔD_{1x} 에서 Δz 에 의존하는 경우

최적 파라미터들을 구하는데 있어 그림 6은

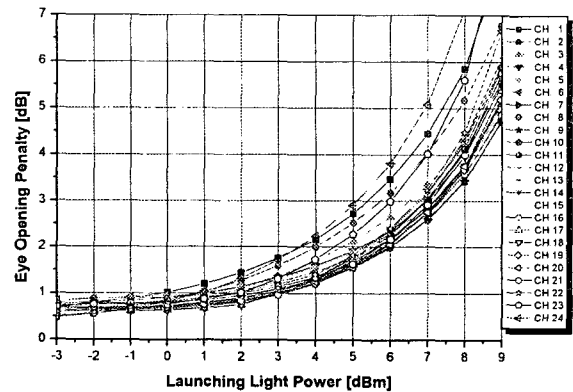
우선 Δz 값을 먼저 구하고 그 값에서 ΔD_{11} 또는 ΔD_{12} 를 구하는 순서를 따랐다. 이 두 파라미터들의 상관성을 알아보기 위하여 구하는 순서를 바꿔볼 필요가 있다. 그림 8(a)는 $\Delta z=0$ km라고 가정한 경우 한 쪽 광섬유의 ΔD_{1x} 가 0 ps/nm/km일 때 나머지 광섬유의 분산 계수 편차에 따른 채널 1과 24의 EOP 차이를 나타낸 것이고, 그림 8(b)는 한 쪽 광섬유 구간의 분산 계수가 그림 8(a)에서 구한 최상의 ΔD_{1x} 에 의해 $D_{1x} + \Delta D_{1x}$ 로 설정되고 나머지 광섬유 구간의 분산 계수가 3 ps/nm/km로 고정된 경우에서 Δz 에 따른 채널 1과 24의 EOP 차이를 나타낸 것이다. 그림 8(a)에서 ΔD_{11} 과 ΔD_{12} 에 대한 EOP 차이 특성이 서로 대칭적으로 나타난다. 즉 $\Delta D_{11}=0$ ps/nm/km일 때의 최적 ΔD_{12} 값은 +0.075 ps/nm/km인 반면 $\Delta D_{12}=0$ ps/nm/km일 때의 최적 ΔD_{11} 값은 -0.075 ps/nm/km임을 알 수 있다. 즉 한 쪽 광섬유 구간의 분산 계수 값이 3 ps/nm/km로 고정되어 있는 경우 나머지 광섬유 구간의 분산 계수는 이에 대해 0.075 ps/nm/km만큼 차이가 있어야 채널 1과 채널 24의 EOP 차이를 최소화 할 수 있다.

그림 8(b)를 통해 첫 번째 광섬유 구간의 분산 계수가 그림 8(a)의 결과에 따라 $D_{11}=D_{1x} + \Delta D_{11}=(3-0.075)$ ps/nm/km = 2.925 ps/nm/km로 설정되고 두 번째 광섬유 구간의 분산 계수가 $D_{12}=D_{1x}=3$ ps/nm/km로 설정된 경우와 첫 번째 광섬유 구간의 분산 계수가 $D_{11}=D_{1x}=3$ ps/nm/km로 설정되고 두 번째 광섬유 구간의 분산 계수가 $D_{12}=D_{1x} + \Delta D_{12}=(3+0.075)$ ps/nm/km = 3.075 ps/nm/km로 설정된 경우 모두 최적 Δz 는 0 km이어야 한다는 것을 알 수 있다 (즉 최적 OPC 위치 = 500 km).

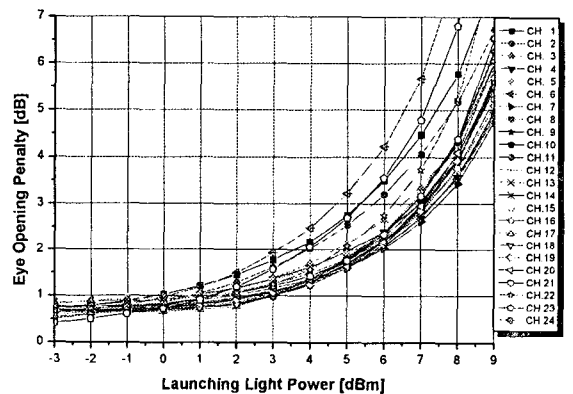
그림 9는 그림 8의 결과에서 얻어진 최적 파라미터들이 적용된 WDM 시스템에서의 전체 채널에 대한 입사 광 전력에 따른 EOP 특성을 나타낸 것이다. 우선 그림 9(a)와 9(b)의 EOP 특성이 서로 비슷하게 나타나고, 그리고 이들은 이와 반대의 절차로 구해진 최적 파라미터들이 적용된 WDM 전체 채널들의 EOP 특성을 나타낸 그림 7의 결과들과도 매우 비슷한 것을 알 수 있다. 즉 그림 7과 9의 비교를 통해 구하는 순서가 바뀌게 되면 구체적인 최적 값들에서는 차이가 있지만 이들 최적 파라미터 값들이 적용된 WDM 시스템에서의 전체 채널의 보상 특성에는 큰 영향이 없음을 확인할 수 있다.

지금까지의 결과들을 종합해 보면, OPC의 최적 위치와 광섬유 구간의 최적 분산 계수 값을 가지고 WDM 전체 채널의 보상 품질을 개선하고자 할 때 단순히 두 최적 파라미터 값들

중에 하나만을 갖고도 충분하다는 것을 알 수 있다. 즉 두 광섬유 구간의 분산 계수 값들은 3 ps/nm/km로 그대로 두고 OPC 위치만을 494 km로 이동시켜 개선시킬 수도 있고 (그림 7), OPC 위치를 500 km로, 한 쪽 광섬유 구간의 분산 계수를 3 ps/nm/km로 둔 채 나머지 광섬유 구간의 분산 계수만에 편차를 주어서 개선시킬 수도 있다 (그림 9의 (a) 또는 (b)).



(a) $\Delta z = 0$ km @ $D_{11} = 2.925$ and $D_{12} = 3.00$ ps/nm/km



(b) $\Delta z = 0$ km @ $D_{11} = 3.00$ and $D_{12} = 3.075$ ps/nm/km

그림 9. 그림 8의 최적 파라미터들이 채택된 WDM 시스템에서 입사 광 전력에 따른 EOP

5. 결론

전체 전송 거리 중간에 위치한 OPC를 이용하여 광 신호의 왜곡을 보상하는 MSSI 기술에서 OPC를 중심으로 광 전력과 색 분산이 대칭화될 수 없어 특히 장파장 영역의 WDM 채널의 보상에 문제가 있었던 한계는 OPC의 이동과 그에 따른 광섬유 구간의 최적 분산 계수 값의 적용으로 극복될 수 있다는 것을 확인하였다. 즉 광 전력과 색 분산을 OPC에 대해 대칭시키지 않더라도 1,000 km의 NZ-DSF의 분산 계수가 3 ps/nm/km로 설계된 RZ 형식을 채택한 24 채널 × 40 Gbps WDM 시스템에

서 OPC의 위치를 500 km인 경우 두 광섬유 구간간의 분산 계수 차를 0.075 ps/nm/km로 하거나, 분산 계수 편차를 두지 않는 경우 반대로 OPC 위치를 494 km로 설정하면 모든 채널을 최상으로 보상할 수 있는 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] A. Mecozzi, C. B. Clausen, and M. Shtaif, "System impact of intra-channel nonlinear effects in highly dispersed optical pulse transmission", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, no. 12, pp 1633~1635, 2000.
- [2] J. P. Gordon and L. F. Mollenauer, "Phase noise in photonic communications system using linear amplifiers", *Opt. Lett.*, vol. 15, pp. 1351~1353, 1990.
- [3] T. L. Koch Alferness, "Dispersion compensation by active predistorted signal synthesis", *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-3, pp. 800~805, 1985.
- [4] A. H. Gnauck et al., "8-Gb/s-130 km transmission experiment using Er-doped fiber preamplifier and optical dispersion equalization", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 3, pp 1147~1149, 1991.
- [5] N. Takachio, K. Iwashita, K. Nakanishi, and S. Koike, "Chromatic dispersion equalization in an 8 Gbit/s 202 km optical CPFSK transmission experiment", in *Proc. IOOC '89, Kobe, Japan, 1989, Paper 20PDA-13.*
- [6] A. M. Vengsarkar and W. A. Reed, "Dispersion-compensating single-mode fibers : Efficient designs for first- and second-order compensation", *Opt. Lett.*, vol. 18, pp. 924~926, 1993.
- [7] 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.
- [8] D. M. Pepper and A. Yariv, "Compensation for phase distortions in nonlinear media by phase conjugation", *Opt. Lett.*, vol. 5, pp 59~60, 1979.
- [9] S. Watanabe, S. Takeda, G. Ishikawa, H. Ooi, J. G. Nielsen and C. Sonne, "Simultaneous wavelength conversion and optical phase conjugation of 200 Gb/s (5×40 Gb/s) WDM Signal using a highly nonlinear fiber four-wave mixing", *ECOC 97 Conf.*, pp. 1~4, 1997.
- [10] Seong-Real Lee, "Compensation for the Distorted 16×40 Gbps NRZ Channels in 1,000 km NZ-DSF WDM System using M^cSI with Optimal Parameters". *한국통신학회논문지*, 제 31권 11A호, pp. 1044~1052, 2006.
- [11] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, 2001.
- [12] 이성렬, 김지웅, 손성찬, "320 Gbps 강도 변조 직접 검파 WDM 채널 보상에서 상호 위상 변조의 영향", *한국해양정보통신학회논문지*, 제 8권 6호, pp. 1134~1140, 2004.
- [13] M. Wu and W. I. way, "Fiber nonlinearity limitations in ultra-dense WDM systems", *J. Lightwave Technol.*, vol. 22, no. 6, pp. 1483~1498, 2004.
- [14] G. P. Agrawal, *Fiber-optic communication systems*, John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [15] ITU Recommendation "Spectral grids for WDM applications : DWDM frequency grid" G.694.1, 2006.