

광 위상 공액기의 최적 파라미터 값 도출을 통한 0.96 Tbps WDM 신호의 BER 개선*

이 영 교**

BER Improvements of 0.96 Tbps WDM Signals through Optimal Parameter Values of Optical Phase Conjugator

Lee Youngkyo

〈Abstract〉

In this paper, it is investigated that the limitation due to the asymmetry of optical power and chromatic dispersion with respect to optical phase conjugator (OPC) for compensating optical signal distortion in WDM system is overcome by using OPC position offset and optimal dispersion coefficients of fiber sections, which depend on OPC position offset. It is confirmed that overall WDM channels are efficiently compensated by applying the optimal parameter values obtained from the proposed method into 24 channels x 40 Gbps WDM system with non zero - dispersion shifted fiber (NZ-DSF) of 1, 000 km, such as power penalties of inter-channel are reduce to almost 3.5 dB from the infinite value. It is also confirmed that the flexible design of WDM system with OPC is possible by using the optimal parameters, in which OPC is placed at ± 15 km from 500 km for efficiently compensating overall channels. Thus, the methods proposed in this research will be expected to alternate with the method of making a symmetrical distribution of power and local dispersion in real optical link which generates a serious problem if it was not made but it is the condition in the case of applying the OPC into multi-channels WDM system.

Key Words : Optical Phase Conjugator, OPC Position Offset, Dispersion Offset, MSSI, WDM System

I. 서론

장거리, 초고속, 그리고 고강도(high-intensity) 광

전송 시스템에서 광섬유의 특성에 기인하는 색 분산(chromatic dispersion)과 비선형 효과(Kerr effects)는 최대 전송 거리와 전송 용량에 한계를 가져다준다[1-2]. 즉 비선형 효과 중 자기 위상 변조(SPM; self phase modulation)와 관련한 광섬유의 분산 특성은 전송하는 광 신호에 왜곡을 발생시키기 때문에 이러

* 본 논문은 2014년도 부천대학교 교비지원 연구비에 의하여 지원된 연구 결과임.

** 부천대학교 정보통신과 부교수

한 왜곡을 보상하는 기술이 적용되어야 장거리, 초고속, 고강도 광 전송 시스템의 구현이 가능하다. 이러한 왜곡을 보상하기 위한 다양한 기술들이 제안되었다[3-6]. 이 기술들 중 전체 전송로 중간의 광 위상 공액기(OPC ; optical phase conjugator)가 전송로의 전반부 (first fiber section)를 거치면서 왜곡된 광 신호의 스펙트럼을 반전시킨 후 나머지 구간 (second fiber section)을 통과시켜 광 신호왜곡을 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 공액파 (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 변환된 공액파 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.

본 논문에서는 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 확인해 보고자 한다.

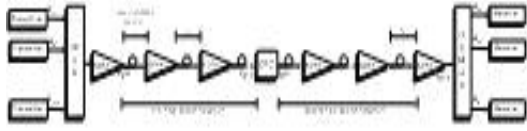
II. WDM 시스템의 모델링

<표 1> 광섬유 파라미터

파라미터	기호 및 값
형태	NZ-DSF
분산 계수	$D_x = 2 \text{ ps/nm/km}$
비선형 굴절 계수	$n_2 = 2.5 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$
손실 계수	$\alpha = 0.2 \text{ dB/km}$
유효 코어 직경	$A_{\text{eff}} = 72 \text{ im}^2$

<그림 1>은 OPC가 전체 전송 거리의 중간에 위치한 강도 변조 / 직접 검파 (IM/DD ; Intensity Modulation / Direct Detection) WDM 시스템의 전체 구성을 나타낸 것이다 (즉 MSSI). 전송로는 총 전송 거리가 1,000 km인 비 영 분산 천이 광섬유(NZ-DSF ; non zero - DSF)로 하였고, 이는 상대적인 길이 $L_1(=L/2)$ 과 L_2 두 전송 구간(section)으로 나뉜다. 각 전송 구간은 50 km 간격(L)을 갖는 에르븀 첨가 광섬유 증폭기 (EDFA ; erbium-doped fiber amplifier) 10개로 연결되는 것으로 가정하였다.

WDM 채널들의 중심 주파수들을 ITU-T 권고에 따라 100 GHz (즉 0.8 nm)의 등간격으로 분할하였다 [14]. 24 채널 중 첫 번째 채널의 중심 주파수는 1550.0 nm로 가정하였다. 따라서 24개의 신호 파장들(1550.0~1568.4 nm)과 이들의 공액파 파장들(1531.1~1549.5 nm) 모두 그림 3의 변환 효율 3-dB 대역폭 안에 포함된다.



<그림 1> 24x40 Gbps WDM 시스템

<그림 1>의 송신부에서의 각 레이저 다이오드는 서로 독립적인 40 Gbps 128(=2⁷) PRBS(pseudo random bit sequence)에 의해 강도 변조되는 것으로 가정하였다. 이 때 외부 광 변조기로부터 발생하는 출력 전계 강도는 소광비가 10 dB인 NRZ 형식의 2차 가우시안 펄스로 모델링하였다.

<그림 1>의 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.

BER은 참고 문헌 [15]에 기초를 둔 수신 평균 전력에 대한 '1'과 '0' 각각의 평균 눈 감김 정도 (eye closure factor)를 이용하여 아래와 같이 유도할 수 있다.

우선 '1'과 '0' 각각의 평균 눈 감김 정도는 그림 3과 같은 방법으로 아래와 같이 구한다.

$$c_{ISI}^+ = 1 - \frac{P_{mark}}{P_{rec,av}}, \quad c_{ISI}^- = \frac{P_{space}}{P_{rec,av}} \quad (1)$$

여기서, P_{mark} 과 P_{space} 는 각각 샘플링 시간에서의 '1' 펄스와 '0' 펄스의 수신 전력이다.

그런 후 전체 전송로에서의 선로 증폭기와 수신기 맨 앞단의 광 증폭기에서 발생된 ASE (Accumulated Spontaneous Emission)의 전체 전력을 구한

다. 다음 과정은 광 검출기를 통해 변환된 광 신호의 시간 평균 전력의 등가 전류를 구하고 광학적 신호 대 잡음비 (OSNR ; Optical Signal to Noise Ratio)의 정의를 이용하여 ASE 평균 전력의 등가 전류를 구한다. 마지막 과정은 두 번째 과정에서 구해진 c_{ISI}^+ , c_{ISI}^- , 등가 전류, 그리고 OSNR을 이용하여 수신단에서의 잡음 전력과 BER을 유도한다.

결국 잡음들이 가우시안 분포를 갖는다는 조건에서의 유도된 BER은

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

와 같이 표현된다. 여기서 τ 는 수신기 판별 회로에 설정된 판별 문턱치(decision threshold level)이다. 그리고 σ_{mark} 과 σ_{space} 는 잡음 전력들과 관계된 각각 '1' 신호와 '0' 신호에 대한 잡음의 표준 편차이다.

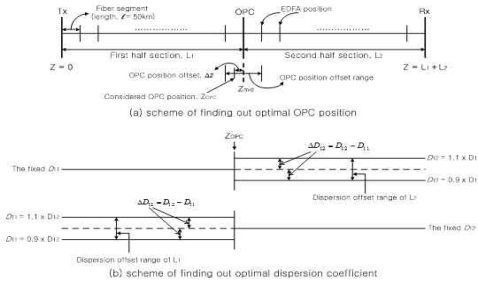
III. 최적 파라미터의 도출 방법

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

$$\frac{\beta_{2j}(-z_1')}{\gamma_j(-z_1')P_j(-z_1')} = \frac{\beta_{2j}(z_2')}{\gamma_j(z_2')P_j(z_2')} \quad (3)$$

이 관계식은 위치 $-z_1'$ 과 z_2' 에서 분산과 비선형성이 동일한 비율로 형성되지만 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 번째 광섬유 구간의 분산 계수도 첫 번째 광섬유 구간의 분산 계수와 반드시 같을 필요가 없음을 의미한다. 그러나 식 (3)은 WDM 채널들의 파장이 다양하기 때문에 모든 파장에 적용 가능한 공통의 OPC 위치와 광섬유 구간의 분산 계수 값들을 찾는 것이 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 수치적 분석을 통해 모든 WDM 채널을 최선으로 보상할 수 있는 OPC의 최상의 위치와 광섬유 구간들의 분산 계수 값을 도출해 보고자 한다.



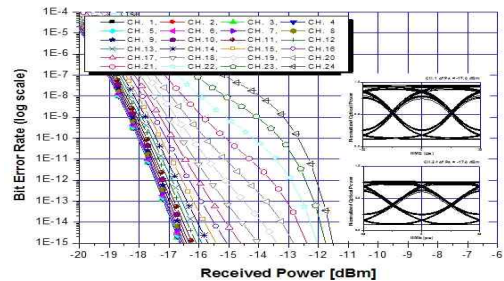
<그림 2> 최적 파라미터 도출 개념도

최상의 OPC 위치는 <그림 2>(a)에서와 같이 OPC를 증폭기의 한 간격 (즉 ± 25 km) 내에서 변화시키면서 이 OPC 위치(z_{OPC})에 대한 특정 채널들의 BER 특성을 분석해서 찾는다. 여기서 OPC 위치와 전체 전송 거리의 중간 위치 (z_{mid})의 차이를 OPC 위치 편차 Δz 라고 정의하였다 (즉 $\Delta z = z_{OPC} - z_{mid}$). 또한 각 광섬유 구간의 최상의 분산 계수 값 ($D_{1x}, x=1,2$)은 <그림 2>(b)에서와 같이 각 광섬유 분산 계수를 2 ps/nm/km의 10% 내에서 변화시키면서 이에 대한 특정 채널들의 BER 특성을 분석해서 찾는다. 여기서 각 광섬유 구간의 분산 계수 값의 차이를 분산 계수 편차 (ΔD_{1x})로 정의한다. 즉 첫 번째 광섬유 구간의 분산 계수 편차는 $\Delta D_{11} = D_{11} - D_{12}$ 로, 두 번째 광섬유 구간의 분산 계수 편차는 $\Delta D_{12} = D_{12} - D_{11}$ 로 정의한다.

최상의 OPC 위치와 광섬유 구간의 분산 계수를 찾기 위해서는 송신 전력 (P_s)을 하나로 고정해 놓아야 하는데 본 논문에서는 선택된 P_s 값이 최상의 파라미터 값들과 이러한 파라미터 값들이 적용된 WDM 시스템의 BER 특성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 서로 다른 3개의 P_s 에서 최상 파라미터 값들을 도출하고 분석해 보고자 한다.

IV. 시뮬레이션 결과 및 검토

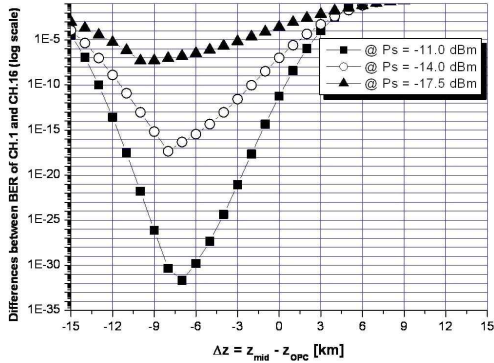
광전송 링크를 통해 손실과 비선형 효과의 영향을 겪으면서 전파하는 광 채널들은 비선형 슈뢰딩거 방정식 (NLSE; Nonlinear Schrödinger Equation)에 의해 표현된다. NLSE를 단계 분할 푸리에 (SSF; Split-Step Fourier) 기법에 따라 Matlab을 이용하여 시뮬레이션 하였다.



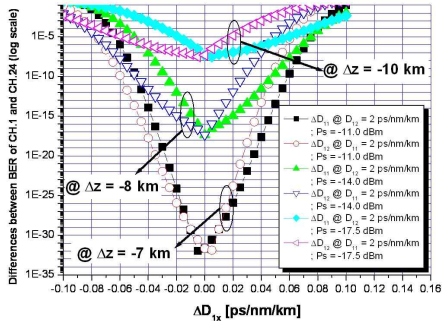
<그림 3> MSSF 기술이 적용된 WDM 시스템에서 입사 전력에 따른 BER 특성

<그림 3>은 전통적 MSSF 기술이 적용된 24 채널 WDM 시스템에서의 BER 특성을 나타낸 것이다. WDM 채널의 신호 파장이 OPC의 영 분산 파장 (zero dispersion wavelength)으로부터 멀어질수록 (즉, 채널 번호가 증가할수록) BER 특성이 나빠져 10⁻⁹ BER이 되는 수신 전력을 감도(sensitivity)로 하

는 경우 감도에 대한 채널간 전력 패널티가 약 5.2 dB로 매우 큰 것을 알 수 있다. 따라서 MSSI 기술을 24 채널 WDM 시스템에 직접 적용하는 것에는 한계가 있다.



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



(b) @ optimal Δz

<그림 4> 채널 1과 24의 BER 차이 (a) $D_{11} = D_{12} = 2$ ps/nm/km에서 Δz 에 의존하는 경우 (b) 그림 (a)에서 구한 최적 Δz 에 OPC가 위치하고 ΔD_{1x} 에 의존하는 경우

각 채널의 P_s 를 -11.0, -14.0, -17.5 dBm으로 가정한 경우에서 <그림 4>(a)는 두 광섬유 구간의 분산 계수가 2 ps/nm/km로 고정되었을 때 OPC 위치 편차 Δz 에 따른 파장 차이가 가장 큰 채널 1과 24의 BER 차이를 나타낸 것이고, <그림 4>(b)는 <그림 4>(a)에서 구한 최적의 Δz 에 OPC가 위치했을 때 분산 계

수 편차 ΔD_{1x} 에 따른 채널 1과 24의 BER 차이를 나타낸 것이다. 채널 1과 24의 BER 차이를 최소로 하는 최상의 OPC 위치는 P_s 가 -11.0 dBm인 경우 493 km (즉, $\Delta z = -7$ km), -14.0 dBm인 경우 492 km, -17.5 dBm인 경우 490 km로 고려하는 P_s 가 감소할수록 편차가 커지는 것을 그림 7(a)를 통해 알 수 있다.

<그림 4>(a)를 통해 얻은 각 P_s 에서의 최상의 OPC 위치에서 한 쪽 광섬유 구간의 분산 계수를 2 ps/nm/km로 고정했을 경우 채널 1과 24의 BER 차이를 최소로 만드는 나머지 광섬유 구간의 최상의 분산 계수 편차들은 <그림 4>(b)로부터 표 2와 같이 얻을 수 있다. <표 2>를 통해 고려한 P_s 에 따라, 또는 최상의 OPC 위치에 따라 최상의 ΔD_{1x} 도 변화하는 것을 알 수 있다.

<표 2> 최적 OPC 위치에서의 최상의 분산 계수 편차

P_s [dBm]	고정된 D_{1x} [ps/nm/km]	최상의 ΔD_{1x} [ps/nm/km]	최상 OPC 위치 [km]
-11.0	$D_{11} = 2$	$\Delta D_{12} = +0.005$	493
	$D_{12} = 2$	$\Delta D_{11} = -0.005$	
-14.0	$D_{11} = 2$	$\Delta D_{12} = 0$	492
	$D_{12} = 2$	$\Delta D_{11} = 0$	
-17.5	$D_{11} = 2$	$\Delta D_{12} = -0.005$	490
	$D_{12} = 2$	$\Delta D_{11} = +0.005$	

<그림 5>(a)부터 (c)는 <그림 4>, 또는 <표 2>의 결과가 실제 WDM 시스템에 미치는 영향을 상호간의 비교를 통해 알아보기 위하여 D_{11} 가 2 ps/nm/km로 고정된 3가지 서로 다른 경우가 적용된 WDM 전체 채널에 대한 BER 특성들을 나타낸 것이다. 즉 표 2의 결과들 중 $P_s = -11.0$ dBm에서 얻은 493 km에 OPC가 위치하고 $D_{12} = 2 + \Delta D_{12} = 2.005$ ps/nm/km가 적용된 경우 (<그림 5>(a)), $P_s = -14.0$ dBm에서 얻은 492 km에 OPC가 위치하고 $D_{12} = 2 + \Delta D_{12} = 2.0$ ps/nm/km가 적용된 경우 (<그림 5>(b)), 그리고 P_s

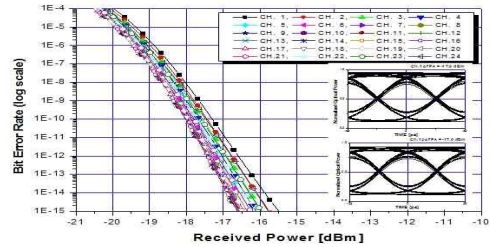
= -17.5 dBm에서 얻은 490 km에 OPC가 위치하고 $D_{12} = 2 + \Delta D_{12} = 1.995$ ps/nm/km가 적용된 경우 (<그림 5>(c))의 WDM 전체 채널에 대한 BER 특성을 나타낸 것이다. 그리고 이것들과 D_{12} 가 2 ps/nm/km로 고정된 경우를 비교하기 위하여 $P_s = -17.5$ dBm의 가정으로부터 얻은 490 km의 최적 OPC 위치에서 $D_{11} = 2 + \Delta D_{11} = 2.005$ ps/nm/km가 적용된 경우의 WDM 전체 채널에 대한 BER 특성을 <그림 5>(d)에 나타냈다.

우선, 그림 7으로부터 얻은 4가지 서로 다른 최상의 파라미터 값들이 WDM 시스템에 달리 적용되더라도 파장이 큰 채널들의 BER 특성이 크게 좋아져서 전력 패널티가 최악의 경우에도 약 1.3 dB 정도로 MSSl (<그림 3>의 경우)에 비해 4배 이상 감소되는 것을 확인할 수 있다.

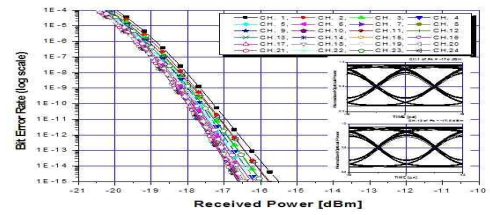
이것은 OPC를 이용한 WDM 시스템에서 색 분산량과 광 전력을 대칭시키지 않더라도 최상의 분산 계수 값의 적용만으로도 전체 채널의 성능 개선을 가능하게 할 수 있다는 것을 의미한다.

그러나 P_s 가 비교적 큰 값에서 얻은 최상의 파라미터들이 적용된 WDM 시스템일수록 전체 채널의 전력 패널티가 더욱 개선되는 것을 알 수 있다. 하지만 P_s 값에 따른 전력 패널티의 차이가 0.5 dB 이내로 비교적 작기 때문에, 즉 24 채널 WDM 시스템에 4가지 서로 다른 최적 파라미터들을 달리 적용하더라도 BER 특성에 눈에 띄만한 큰 차이가 없기 때문에 최상의 OPC 위치를 찾고, 그 위치에서의 최상의 분산 계수를 찾아 WDM 시스템에 적용하는데 있어 P_s 값을 얼마로 설정했느냐는 크게 중요하지 않다고 할 수 있다.

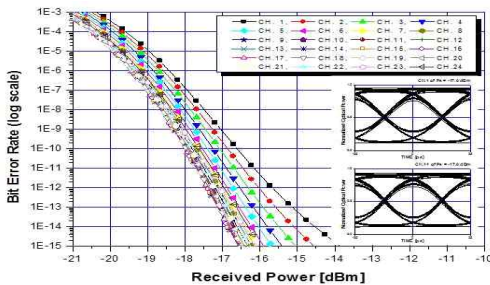
최상의 파라미터들을 구하는데 있어 <그림 4>는 우선 Δz 값을 먼저 구하고 그 값에서 ΔD_{11} 또는 ΔD_{12} 를 구하는 순서를 따랐다. 이 두 파라미터들의 상관성을 알아보기 위하여 구하는 순서를 바꿔볼 필



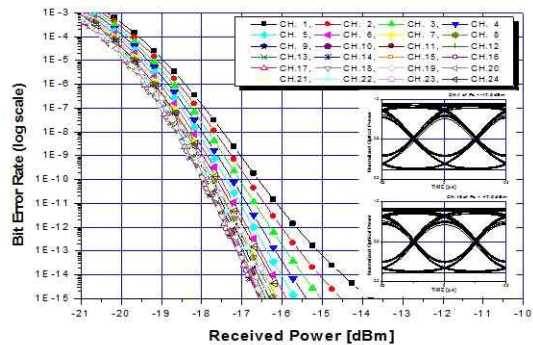
(a) $\Delta z = -7$ km, $D_{11}=2.0$ & $D_{12}=2.005$ ps/nm/km



(b) $\Delta z = -8$ km, $D_{11}=2.0$ & $D_{12}=2.0$ ps/nm/km



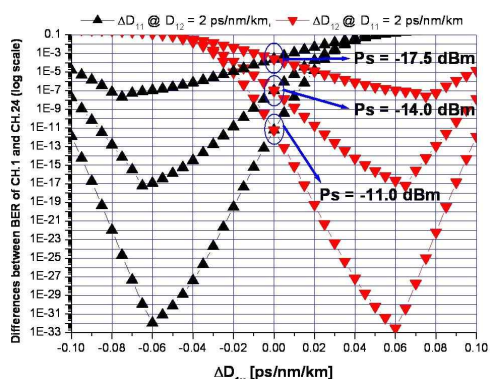
(c) $\Delta z = -10$ km, $D_{11}=2.0$ & $D_{12}=1.995$ ps/nm/km



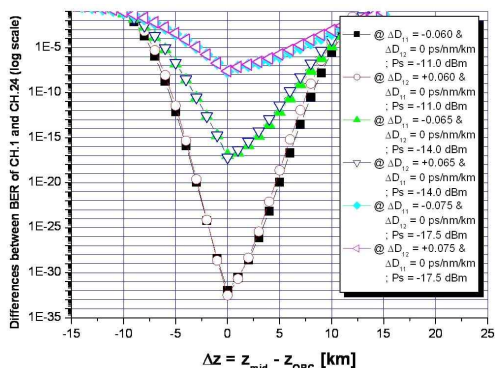
(d) @ $\Delta z = -10$ km, $D_{11}=2.005$ & $D_{12}=2.0$ ps/nm/km

<그림 5> <그림 4>의 최적 파라미터들이 채택된 WDM 시스템의 BER 특성

요가 있다. <그림 4>에서와 마찬가지로 각 채널의 P_s 를 -11.0, -14.0, -17.5 dBm으로 가정한 경우에서 <그



(a) @ $\Delta z = 0$ km



(b) @ ΔD_{1x}

<그림 6> 채널 1과 24 사이의 BER 차이 (a) $\Delta z = 0$ km에서 ΔD_{1x} 에 의존하는 경우 (b) 그림 (a)에서 구한 최적 ΔD_{1x} 에서 Δz 에 의존하는 경우

림 6>(a)는 $\Delta z = 0$ km인 경우 한 쪽 광섬유의 ΔD_{1x} 가 0 ps/nm/km일 때 나머지 광섬유의 분산 계수 편차에 따른 채널 1과 24의 BER 차이를 나타낸 것이고, <그림 6>(b)는 한 쪽 광섬유 구간의 분산 계수가 <그림 6>(a)에서 구한 최상의 ΔD_{1x} 에 의해 $D_{1x} + \Delta D_{1x}$ 로 설정되고 나머지 광섬유 구간의 분산 계수가 2ps/nm/km로 고정된 경우의 Δz 에 따른 채널 1과 24의 BER 차이를 나타낸 것이다.

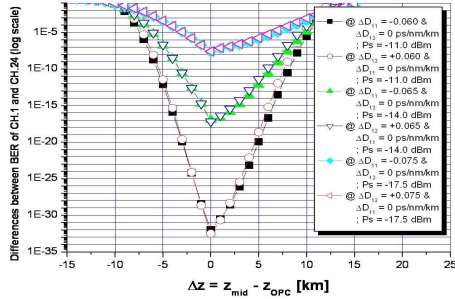
<그림 6>(a)에서 P_s 가 -11.0 dBm인 경우 $\Delta D_{11} = 0$ ps/nm/km일 때의 최상의 ΔD_{12} 값은 +0.06 ps/nm/km인 반면 $\Delta D_{12} = 0$ ps/nm/km일 때의 최

상의 ΔD_{11} 값은 -0.06 ps/nm/km임을 알 수 있다. 또한, P_s 가 -14.0 dBm인 경우 $\Delta D_{11} = 0$ ps/nm/km일 때의 최상의 ΔD_{12} 값은 +0.065 ps/nm/km인 반면 $\Delta D_{12} = 0$ ps/nm/km일 때의 최상의 ΔD_{11} 값은 -0.065 ps/nm/km, P_s 가 -17.5 dBm인 경우 $\Delta D_{11} = 0$ ps/nm/km일 때의 최상의 ΔD_{12} 값은 +0.075 ps/nm/km인 반면 $\Delta D_{12} = 0$ ps/nm/km일 때의 최상의 ΔD_{11} 값은 -0.075 ps/nm/km임을 알 수 있다. 즉 P_s 가 감소할수록 편차가 커지는 것을 알 수 있다.

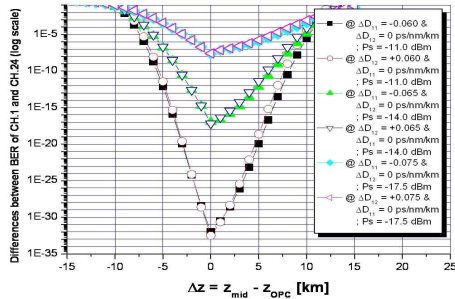
그리고 각 광섬유 구간의 분산 계수 편차가 <그림 6>(a)를 통해 얻은 값으로 설정되면 OPC의 최상의 위치는 모든 경우에 대해 500 km (즉, $\Delta z = 0$ km)이어야 한다는 것을 <그림 6>(b)를 통해 알 수 있다.

<그림 7>은 <그림 6>의 결과가 실제 WDM 시스템에 미치는 영향을 알아보기 위하여 앞선 과정에서 같은 P_s 에 따라 얻은 각기 다른 최적 파라미터들이 적용된 WDM 전체 채널에 대한 BER 특성들을 나타낸 것이다. 이들 중 <그림 7>(a)부터 (c)는 D_{12} 가 2 ps/nm/km로 고정된 경우에서 $P_s = -11.0$ dBm에서 얻은 $D_{11} = 2 + \Delta D_{11} = 1.94$ ps/nm/km가 적용된 경우 (그림 10(a)), $P_s = -14.0$ dBm에서 얻은 $D_{11} = 2 + \Delta D_{11} = 1.935$ ps/nm/km가 적용된 경우 (<그림 7>(b)), 그리고 $P_s = -17.5$ dBm에서 얻은 $D_{11} = 2 + \Delta D_{11} = 1.925$ ps/nm/km가 적용된 경우 (<그림 7>(c))의 WDM 전체 채널에 대한 BER 특성을 나타낸 것이다. 그리고 이것들과 D_{11} 가 2 ps/nm/km로 고정된 경우를 비교하기 위하여 $P_s = -17.5$ dBm에서 얻은 $D_{12} = 2 + \Delta D_{12} = 2.075$ ps/nm/km가 적용된 경우의 WDM 전체 채널에 대한 BER 특성을 <그림 7>(d)에 나타냈다.

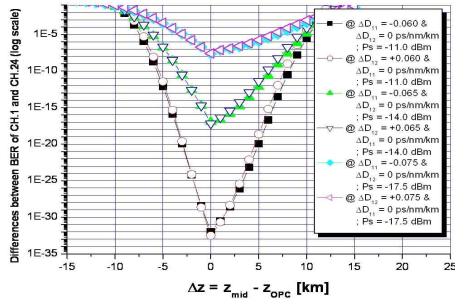
우선, <그림 7>의 4가지 다른 경우의 BER 특성들 각각이 <그림 5>에서의 4가지 경우의 BER 특성들과 매우 일치하게 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 사실이 의미하는 것은, 우선 광섬유 구간의 최상의 분산



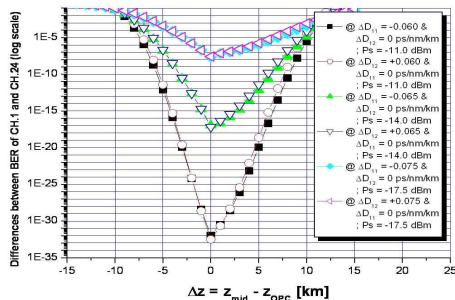
(a) $D11 = 1.940$ & $D12 = 2.0$ ps/nm/km, $\Delta z = 0$ km



(b) $D11 = 1.935$ & $D12 = 2.0$ ps/nm/km, $\Delta z = 0$ km



(c) $\Delta z = -10$ km, $D11=2.0$ & $D12=1.995$ ps/nm/km



(d) @ $D11 = 2.0$ & $D12 = 2.075$ ps/nm/km, $\Delta z = 0$ km

<그림 7> <그림6>의 최적 파라미터들이 채택된 WDM 시스템의 BER 특성

계수를 먼저 찾고, 그 값에서 최상의 OPC 위치를 찾아 WDM 시스템에 적용하는데 있어 P_s 값은 <그림 5>에서와 같이 크게 중요하지 않다는 것이다. 아울러 최상의 파라미터들을 구하는 순서가 바뀌게 되면 그 구체적인 값들에서는 차이가 있지만 이들 최적 파라미터 값들이 적용된 WDM 시스템에서의 전체 채널의 보상 특성에는 큰 영향이 없음을 의미한다.

이러한 결과보다 중요한 것은 두 가지 서로 다른 순서에 의해 구해진 최상의 파라미터 값들을 이용하면 OPC를 이용한 WDM 시스템을 융통적으로 설계할 수 있는 최적의 파라미터 값을 얻을 수 있다는 것이다. 이러한 내용을 $P_s = -17.5$ dBm에서 첫 번째 광섬유 구간의 분산 계수 값이 2 ps/nm/km로 고정된 경우에 대하여 설명하면 아래와 같다. <그림 4>에서는 OPC가 490 km에 위치할 때 최상의 ΔD_{12} 은 -0.005 ps/nm/km로, <그림 6>에서는 <그림 4>의 결과에 비해 OPC가 10 km 증가한 500 km에 위치할 때 최상의 ΔD_{12} 은 -0.005 ps/nm/km로부터 0.08 ps/nm/km만큼 증가한 $+0.075$ ps/nm/km로 얻어졌다. 그리고 이 두 경우에서의 전체 WDM 채널의 BER 특성이 비슷하게 얻어졌다 (<그림 5>(c)와 <그림 7>(d)). 이 두 경우를 관련지어 보면, OPC를 500 km에서 ± 1 km만큼 이동시키면서 다양하게 위치시키고자 한다면 첫 번째 광섬유 구간의 분산 계수 값이 2 ps/nm/km로 고정되어 있다면 두 번째 광섬유 구간의 최적 분산 계수 값을 2.075 ps/nm/km로부터 ± 0.008 ($=0.08/10$) ps/nm/km만큼 변화시켜야 한다는 사실을 얻을 수 있다.

V. 결론

전체 전송 거리 중간에 위치한 OPC를 이용하여 광 신호의 왜곡을 보상하는 MSSI 기술에서 OPC를

중심으로 광 전력과 색 분산이 대칭화될 수 없어 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 2 ps/nm/km로 설계된 소광비가 10 dB인 NRZ 형식을 채택한 24 채널 x 40 Gbps WDM 시스템에서 OPC를 500 km가 아닌 다른 위치에 두고 보상하고자 하는 경우 OPC 위치 편차 1 km 당 두 광섬유 구간의 분산 계수 차가 ± 0.008 ps/nm/km 되어야 BER 특성을 양호하게 개선할 수 있는 것을 확인하였다.

참고문헌

- [1] N. Shibata, K. Nosu, K. Iwashita, and Y. Azuma, "Transmission limitations due to fiber nonlinearities in optical FDM systems," *IEEE J Select. Areas in Comm.*, vol. 8, no. 6, 1990, pp. 1068-1077.
- [2] A. F. Elrefaie, R. E. Wagner, D. A. Atlas, and D. G. Daut, "Chromatic dispersion limitations in coherent optical fiber transmission systems," *Electron. Lett.*, vol. 23, 1987, pp. 756~758.
- [3] T. L. Koch Alferness, "Dispersion compensation by active predistorted signal synthesis," *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-3, 1985, pp. 800~805.
- [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, 1991, pp 1147~1149.
- [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*, Paper 20PDA-13, 1989.
- [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, 1993., pp. 924~926.
- [7] A. Yariv, D. Fekete, and D. M. Pepper, "Compensation for channel dispersion by nonlinear optical phase conjugation," *Opt. Lett.*, vol. 4, 1979, pp.52~54.
- [8] D. M. Pepper and A. Yariv, "Compensation for phase distortions in nonlinear media by phase conjugation," *Opt. Lett.*, vol. 5, 1979, pp.59~60.
- [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 (5x40 Gb/s) WDM Signal using a highly nonlinear fiber four-wave mixing," *ECOC 97 Conf.*, 1997, pp.1~4.
- [10] 이성렬, "비영 분산 천이 광섬유를 갖는 WDM 시스템에서 광 위상 공액기에 의한 왜곡된 광 신호의 보상," *한국전자파학회논문지*, 제 17권 6호, 2006, pp.546~555.
- [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, 2004, pp. 1134~1140.
- [13] M. Wu and W. I. way, "Fiber nonlinearity

- limitations in ultra-dense WDM systems," J. Lightwave Technol., vol. 22, no. 6, 2004, pp. 1483~1498.
- [14] ITU Recommendation "Spectral grids for WDM applications : DWDM frequency grid," G. 694.1, 2006.
- [15] G. P. Agrawal, Fiber-optic communication systems, John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [16] S. Watanabe and M. Shirasaki, "Exact compensation for both chromatic dispersion and Kerr effect in a transmission fiber using optical phase conjugation," J. Lightwave Technol., vol. 14, no. 3, 1996, pp. 243~248.

■ 저자소개 ■



이 영 교
Lee Youngkyo

2003년 3월~현재
부천대학교 정보통신과 부교수
2002년 2월 한국항공대학교 대학원
통신정보공학과 (공학박사)
1995년 8월 한국항공대학교 대학원
통신정보공학과 (공학석사)
1992년 2월 한국항공대학교 통신정보공학과
(공학사)

관심분야 : 유비쿼터스, 유무선네트워크,
트래픽 제어
E-mail : yklee@bc.ac.kr

논문접수일: 2015년 2월 4일
수정일: 2015년 2월 16일
게재확정일: 2015년 3월 3일