

# 1,000km의 비 영 분산 천이 광섬유로 구성된 WDM 시스템에서 최적 파라미터를 갖는 MSSI를 이용한 NRZ 형식의 16×40 Gbps WDM 신호의 비트 에러율 개선\*

이 영 교\*\*

## *Improvement of Bit Error Rate of 16×40 Gbps NRZ-formated WDM Signals over 1,000km NZ-DSF using MSSI with Optimal Parameters*

Lee, Young Kyo

### 〈Abstract〉

In this paper the numerical methods of finding out the optimal position of optical phase conjugator (OPC) and the optimal fiber dispersion are proposed, which are able to effectively compensate overall channels in 16×40 Gbps WDM system. And the compensation characteristics in the system with two induced optimal parameters are compared with those in the system with the currently used mid-span spectral inversion (MSSI) in order to confirm the availability of the proposed methods. It is confirmed that the reception performances are largely improved in the system with the induced optimal parameters than in the system with MSSI through the analyzing the eye opening penalty (EOP) and bit error rate (BER) characteristics. It is also confirmed that two optimal parameters depend on each other, but are less related with the procedural problem about the first optimal value among these parameters.

Key Words : MSSI, WDM system, Optical Phase Conjugator, Optimal parameters, NRZ

## I. 서론

향후의 통신은 개인화, 멀티미디어화가 매우 급속도로 진행됨에 따라 필요한 시스템 전송 용량이 비약적으로 계속 증가하여 테라비트를 넘는 통신 시스템이 불가피하게 될 것이다. 이러한 요구를 만족시키기 위해 파장 분할

다중 시스템 (WDM ; Wavelength Division Multiplexing) 이 급속하게 개발되어 실용화되고 있다. 각종 시스템과의 연동을 가능하게 하는 광통신 부품들, 예르븀 첨가 광섬유 증폭기 (EDFA ; Erbium-Doped Fiber Amplifier) 등의 광 증폭기 [1], 파장 제어와 가변이 가능한 반도체 레이저 [2], 광섬유 고기능화 등이 WDM 시스템의 발전을 가능하게 했다.

그러나 광섬유의 색 분산과 비선형 현상의 상호 작용에 의한 광 신호의 왜곡에 의해 고속 장거리 광 전송 시

\* 본 논문은 2009년도 부천대학 교비지원 연구비에 의하여 지원된 연구 결과임.

\*\* 부천대학 정보통신과 교수

시스템에서 전송 패널티가 발생한다[3]. 이러한 비선형 현상과 분산에 의한 광 신호 왜곡을 극복하기 위한 방법 중 하나로 MSSI (Mid-Span Spectral Inversion)가 제안되었다[4, 5]. 이 방법은 전체 전송 거리 중간에 광 위상 공액기 (OPC ; Optical phase conjugator)를 두어 왜곡된 광 신호를 보상하는 방법으로써, 이론적으로 OPC 위치를 중심으로 첫 번째 전송 구간 (송신기부터 OPC까지)에서의 광 전력과 국부 분산량이 두 번째 전송 구간 (OPC부터 수신기까지)에서의 그것들과 대칭이 되어야 비선형 효과를 제거할 수 있다.

그러나 이 기술을 실제적인 WDM 전송 시스템에 적용하려면 몇 가지 해결되어야 할 문제들이 있다. 우선 OPC를 중심으로 두 전송 구간에서의 광 전력 분포와 분산량이 서로 대칭을 이루어야 한다[6]. 두 번째는 선택된 OPC가 모든 WDM 채널들에 대해 비슷한 특성이 나타나도록 해야 한다. 즉 좀 더 많은 채널의 전송을 위해 OPC가 광대역이어야 한다. 다행스럽게도 두 번째 문제는 OPC의 비선형 매질로 기존의 DSF 대신에 HNL-DSF (Highly-Nonlinear DSF)를 사용하면 광대역화가 이루어지기 때문에 해결될 수 있다[7]. 하지만 첫 번째 문제 때문에 완벽한 문제 해결에는 여전히 한계가 남아 있다. 또한 특정 파장에 대해 이러한 문제를 해결할 수 있다고 하더라도 WDM은 동시에 여러 파장을 전송하기 때문에, 아울러 채택한 변조 파형 형식, 전송 거리 등도 이 비대칭성에 영향을 주기 때문에 모든 파장에 공통적으로 적용되는 해결책을 찾는 것이 쉽지는 않다. 따라서 OPC를 이용하여 모든 채널들을 양호하게 보상하기 위해서는 첫 번째 문제 해결에 필적할 만한 다른 방법을 모색해 보아야 한다.

그러나 실제적인 광 전송 링크에서의 OPC를 중심으로 한 광 전력 분포와 분산량의 본질적 비대칭성 문제는 여전히 한계로 남는다. 또한 특정 파장에 대해 이러한 문제를 해결할 수 있다고 하더라도 WDM은 동시에 여러 파장을 전송하기 때문에 모든 파장에 공통적으로 적용되는 해결책을 찾는 것이 쉽지는 않다.

본 논문에서는 OPC를 중심으로 광 전력 분포와 분산량을 대칭으로 만드는 방법을 대체할 수 있는 수치적 방법을 제안하고자 한다. 즉 모든 WDM 채널을 효과적으로 보상할 수 있는 OPC의 최적 위치와 두 번째 광섬유 구간의 최적 분산 계수 값을 수치적으로 도출하고자 한다. 그리고 이들 두 파라미터로 설계된 WDM 시스템에서의 보상 정도와 비트 에러율 (BER ; Bit Error Rate) 특성을 OPC가 전체 전송로 중간에 위치하고 두 광섬유 구간의 분산 계수가 동일한 MSSI에서의 보상 품질과 비교해 보도록 하겠다.

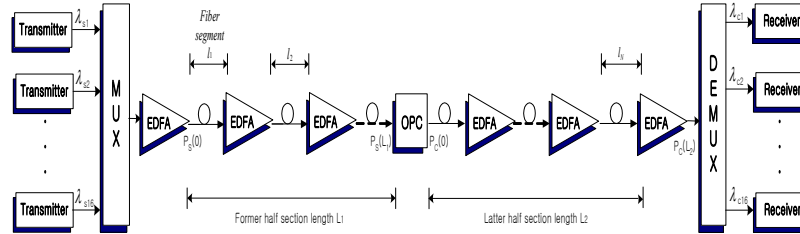
본 연구에서 가정한 WDM 시스템은 채널 비트율이 40 Gbps인 16-채널 전송 시스템이고, 각 채널의 강도 변조 파형 형식은 NRZ로 모델링 하였다. 분석의 간편함을 위하여 채널 간 상호 위상 변조 (XPM ; Cross Phase Modulation) 현상은 무시하였다. 시뮬레이션은 현재 널리 사용되고 있는 단계 분할 푸리에 (SSF ; Split-Step Fourier) 방법[8]을 이용해 수행하였다.

## II. 시뮬레이션을 위한 모델링

같은 편광을 갖고 광섬유를 동시에 전송하는 16 채널 WDM 시스템에서  $A_j(z, t)$ 를  $|A_j|$ 의 순시 광 전력에 의해 정규화된 천천히 변하는  $j$ 번째 복소 포락선이라 하면  $A_j(z, t)$ 는 아래의 비선형 슈뢰딩거 방정식을 만족하며 전파한다[8].

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

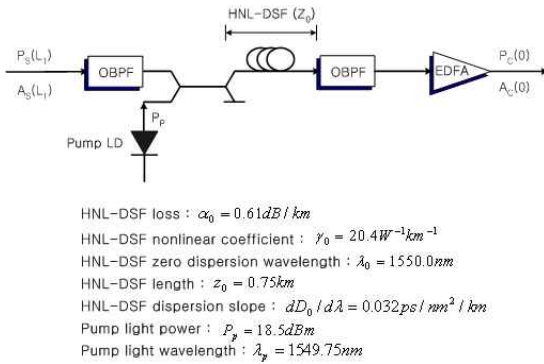
여기서,  $j, k = 1, 2, \dots, 16 (j \neq k)$ 이고,  $\alpha$ 는 광섬유 손실 계수,  $A_j$ 는  $j$ 번째 채널의 신호 파장,  $\beta_2$ 는 광섬유 색 분산 파라미터,  $\beta_3$ 는 3차 색 분산 파라미터,  $\gamma_j$ 는 광섬유 비선형 계수, 그리고  $T = t - z/v_j$ 이다. 식 (1) 우변의 마지막



<그림 1> MSSI 기법을 채택한 16×40 Gbps WDM 전송 시스템

두 항은 각각 자기 위상 변조 (SPM ; Self Phase Modulation)과 상호 위상 변조 (XPM ; Cross Phase Modulation)을 유도한다. 여기서 마지막 항, 즉 XPM 항은 수치적 분석 과정을 간단히 하기 위하여 무시하였다.

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 MSSI). 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(



<그림 2> HNL-DSF를 이용한 OPC

<표 1> 송신기, 광섬유, 수신기의 시뮬레이션 파라미터

파라미터	기호 및 파라미터 값	
송신부	비트율	$R_b = 640 \text{ Gbps} (=16 \times 40 \text{ Gbps})$
	파형	NRZ super-Gaussian (m=2), RZ super-Gaussian (m=2)
	비트 패턴	PRBS 27 (128 bits)
	주파수 chirp	$C = 0$
광섬유	형태	NZ-DSF
	손실 계수	$\alpha_1 = \alpha_2 = 0.2 \text{ dB/km}$
	전체 전송 길이	$L = 1,000 \text{ km}$
	분산 계수	$D_{11} = D_{12} = 2 \text{ or } 4 \text{ ps/nm/km}$
	비선형 굴절 계수	$n_2 = 2.5 \times 10^{-12} \text{ km}^2/\text{W}$
	유효 코어 직경	$A_{eff} = 72 \mu\text{m}^2$
	EDFA의 개수	10
	EDFA 간격	$l = 50 \text{ or } 100 \text{ km}$
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 1에 본 연구에서 사용한 송신기, 광섬유, 수신기의 시뮬레이션 파라미터와 그 값들을 요약해 놓았다[8], [9]. 그림 2는 HNL-DSF (Highly-Nonlinear Dispersion Shifted Fiber)를 이용한 OPC의 구조와 본 연구에서 사용한 OPC의 시뮬레이션 파라미터들이다. 변환 효율 ( $\eta$ ,

conversion efficiency)은 FWM 곱(product) 전력 대 입력 신호 전력의 비로 정의된다[11]. 그림2의 파라미터를 이용해 계산된  $\eta$ 의 최고 값은 0.18 dB이고 이의 3-dB 대역폭은 34 nm (1532.5~ 1566.5 nm)이다[11].

본 연구에서는 FWM 효과에 기인하는 채널 간 누화를 제거하기 위하여 WDM 채널 간 파장 간격을 모두 다르게 설정하는 F. Forghieri 등에 의해 제안된 방법[10]에 따라 16개 채널 파장을 각각 1550.2 nm, 1551.2 nm, 1553.2 nm, 1554.4 nm, 1556.0 nm, 1557.8 nm, 1560.0 nm와 1561.4 nm으로 하였다. 따라서 WDM 채널의 신호 파장과 이의 공역파 파장은 모두 HNL-DSF를 이용한 OPC의 3-dB 대역폭 내에 포함되고 있다[12].

그림 1의 직접 검파 수신부 (Direct Detection Receiver)는 5 dB의 잡음 지수를 갖는 EDFA 전치 증폭기, 1 nm 대역폭의 광 필터, PIN 다이오드, 버터워스 (Butterworth) 필터 구조의 펄스 정형 필터, 마지막으로 판정 회로로 구성되는 것으로 가정하였다[13]. 수신부에서 뿐만 아니라 OPC의 입력단과 출력단에 존재하는 광 필터에 따른 색 분산과 SPM 보상의 영향을 살펴보기 위하여 광 필터를

$$H(\omega) = \left[ 1 + \left\{ \frac{2}{B_0} (\omega - \omega_0) \right\}^2 \right]^{-1} \quad (3)$$

와 같은 주파수 차원에서의 전달 함수를 갖는 로렌치안 (Lorentzian) 필터로 모델링하여 시뮬레이션 하였다. 여기서  $B_0$ 는 3-dB 광 대역폭(optical bandwidth)으로 OPC 입력단의 광 필터와 시스템 수신단의 광 필터에서는 1 nm(=124 GHz)로, OPC 출력단의 광 필터에서는 0.65 nm로 설정하였다.

광 검출기는 PIN 다이오드로 모델링 하였고, 검출된 광 신호의 ISI를 최소화하기 위한 펄스 정형 필터는 아래의 전달 함수를 갖는 버터워스 필터를 사용하여 시뮬레이션 하였다[11].

$$|H(f)|^2 = [1 + (f/B_e)^{2n}]^{-1} \quad (4)$$

여기서  $n$ 은 필터의 차수이고,  $B_e$ 는 필터의 전기적 대역폭이다.

BER은 수신 평균 전력에 대한 '1'과 '0' 각각의 평균 눈 감김 정도 (eye closure factor)를 이용하여 아래와 같이 유도할 수 있다[14].

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

$$c_{ISI}^+ = 1 - \frac{P_{mark}}{P_{rec,av}}, \quad c_{ISI}^- = \frac{P_{space}}{P_{rec,av}} \quad (5)$$

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 구한다. 다음 과정은 광 검출기를 통해 변환된 광 신호의 시간 평균 전력의 등가 전류  $I_{s,av}$ 를 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  $c_{ISI}^+$ ,  $c_{ISI}^-$ ,  $I_{s,av}$ 와 OSNR을 이용하여 수신단에서의 잡음 전력과 BER을 유도한다.

결국 잡음들이 가우시안 분포를 갖는다는 조건에서의 유도된 BER은

$$BER = \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left[ \sqrt{2} \left\{ \frac{(1 - c_{ISI}^+ - \tau) I_{s,av}}{\sigma_{mark}} \right\} \right] + \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left[ \sqrt{2} \left\{ \frac{(\tau - c_{ISI}^-) I_{s,av}}{\sigma_{space}} \right\} \right] \quad (6)$$

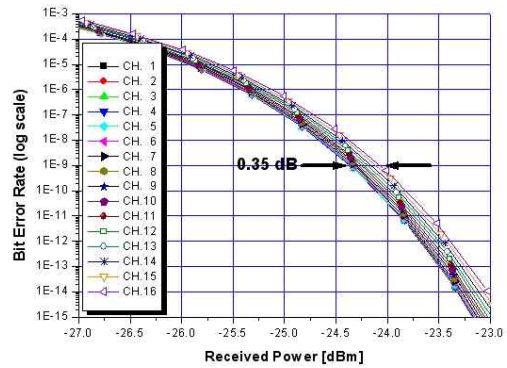
와 같이 표현된다. 여기서  $\tau$ 는 수신기 판별 회로에 설정된 판별 문턱치(decision threshold level)이다. 그리고  $\sigma$

mark과  $\sigma_{space}$ 는 잡음 전력들과 관계된 각각 '1' 신호와 '0' 신호에 대한 잡음의 표준 편차이다.

본 연구에서 이용한 성능 평가 파라미터 중에서 EOP는 아래 식 (7)과 같이 계산된다.

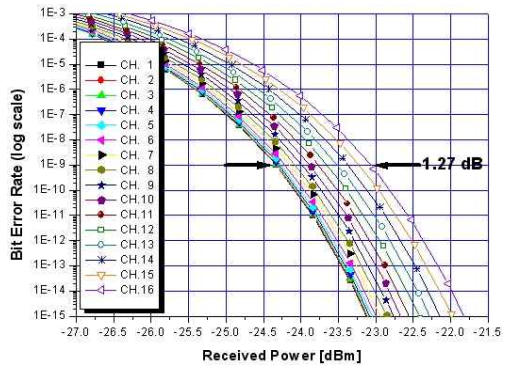
$$EOP(dB) = 10 \log \left( \frac{b}{a} \right) \quad (7)$$

여기서  $a$ 는 back-to-back 시스템에서의 eye opening이고  $b$ 는 본 연구에서 가정된 WDM 시스템에서 수신된 신호의 eye opening이다.



(a) @  $D_{1x} = 2$  ps/nm/km

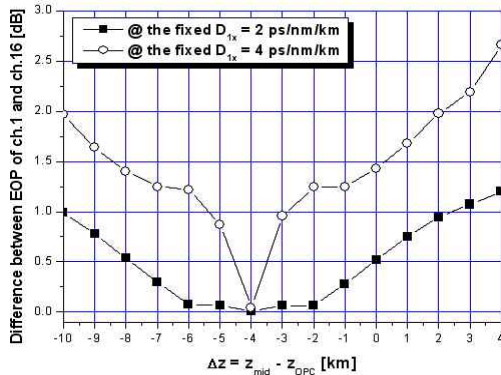
<그림 2> 관리시스템의 구조도



<그림 3> MSSI가 채택된 시스템의 BER 특성

### III. 시뮬레이션 결과 및 검토

그림 3은 OPC가 전체 전송로 중간에 위치하고 두 광섬유 구간의 분산 계수 값( $D_x$ )이 모두 표 1의 값들로 고정된 경우 (MSSI 경우)의 16개 채널의 BER 특성을 보여주고 있다.  $10^{-9}$  BER을 얻을 수 있는 수신 전력을 감도 (sensitivity)로 정의하면 채널 간 전력 패널티는  $D_x=2$  ps/nm/km인 경우 0.35 dB,  $D_x=4$  ps/nm/km인 경우 약 1.27 dB 정도 되는 것을 알 수 있다. 즉 분산 계수 값이 클수록 채널 간 전송 품질에 큰 차이가 생기는 것을 알 수 있다.

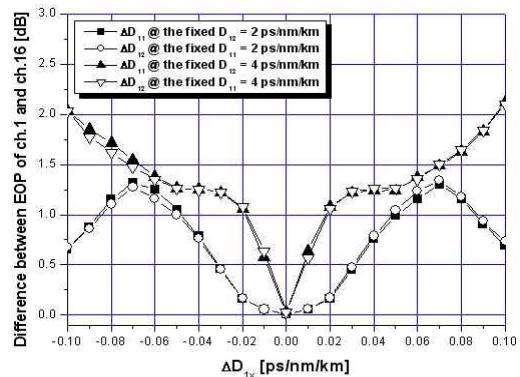


<그림 4>  $\Delta z$ 에 따른 눈 열림 패널티

그림 4는 모든 WDM 채널을 비슷한 품질로 보상할 수 있는 최상의 OPC 위치를 찾기 위해  $D_x=2$ 와 4 ps/nm/km의 모든 경우에서 분산 계수 편차  $\Delta D_x=0$  ps/nm/km로 가정한 경우의 OPC 위치 편차에 따른 채널 1과 16의 EOP 차이를 나타낸 것이다. 여기서 채널 1과 16을 선택한 이유는 둘 사이의 가장 큰 파장 차이에 기 인하여 그림 3에서 보는 것과 같이 BER 특성의 차이가 현격하게 나타나기 때문이다. 그림 4로부터 두 채널 사이의 EOP 차이가 가장 작게 나타나는 OPC 위치가 모든 경우 496 km (즉  $\Delta z=4$  km)인 것을 알 수 있다.

그림 5는 그림 4로부터 얻어진 OPC의 최적 위치 (즉

496 km)에서 모든 WDM 채널을 비슷한 품질로 보상할 수 있는 최상의  $D_x$ 를 찾기 위해 분산 계수 편차( $\Delta D_x$ )에 따른 채널 1과 16의 EOP 차이를 나타낸 것으로, 두 채널 사이의 EOP 차이가 가장 작게 나타나는 최적  $\Delta D_x$  값은 두 경우 모두 0 ps/nm/km임을 알 수 있다. 즉 NZ-DSF의 분산 계수를 2 ps/nm/km로 선택하는 경우와 4 ps/nm/km로 선택하는 경우 모두 OPC가 496 km에 위치하면 두 구간의 분산 계수 값에 편차를 줄 필요가 없다는 것을 알 수 있다.



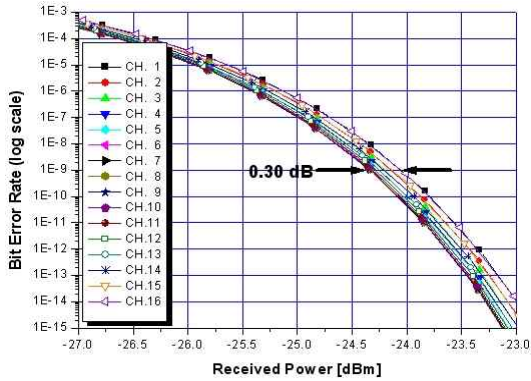
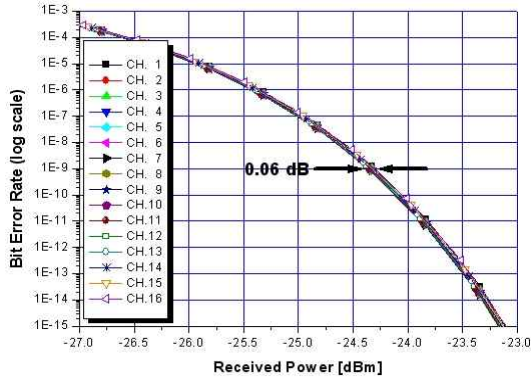
<그림 5> OPC가 최적  $\Delta z$ 에 위치하는 경우  $\Delta D_x$ 에 따른 눈 열림 패널티

그림 6은 그림 5의 결과가 실제 WDM 시스템에 미치는 영향을 알아보기 위하여 그림 6의 결과, 즉 최적 파라미터들이 적용된 WDM 시스템에서의 BER 특성을 나타낸 것이다. 최적 파라미터들이 WDM 시스템에 적용되면 MSSI(그림 4의 경우)에 비해 전력 패널티가  $D_x=2$  ps/nm/km인 경우 약 0.06 dB,  $D_x=4$  ps/nm/km인 경우 0.3 dB 정도로 4배 이상 개선되는 것을 알 수 있다.

최적 파라미터들을 구하는데 있어 그림 4와 5는 우선  $\Delta z$  값을 먼저 구하고 그 값에서  $\Delta D_1$  또는  $\Delta D_2$ 를 구하는 순서를 따랐다. 이 두 파라미터들의 상관성을 알아보기 위하여 구하는 순서를 바꿔볼 필요가 있다.

그림 7은  $\Delta z=0$  km, 즉 OPC가 500 km에 위치한 경우 모든 WDM 채널을 비슷한 품질로 보상할 수 있는 최상





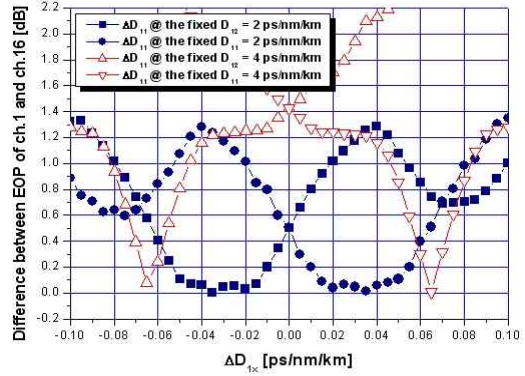
(a) @  $\Delta z = -4$  km &  $D_{11} = D_{12} = 4$  ps/nm/km

<그림 6> 최적 파라미터들이 채택된 WDM 시스템에서의 BER 특성

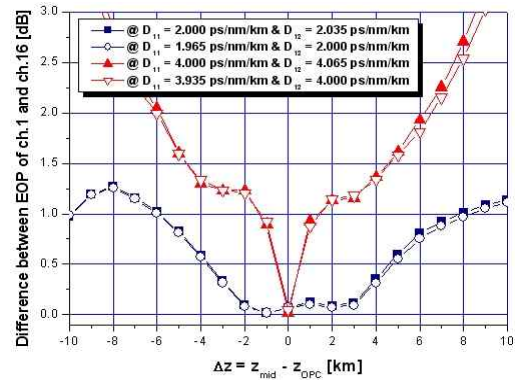
의  $D_x$ 를 찾기 위해  $\Delta D_x$ 에 따른 채널 1과 16의 EOP 차이를 나타낸 것이다.

그림 7로부터 두 채널 사이의 EOP 차이가 가장 작게 나타나는 최적  $\Delta D_1$  값은  $D_2$ 가 2와 4 ps/nm/km로 고정된 경우 각각 -0.035 ps/nm/km와 -0.065 ps/nm/km로 얻어졌다. 또한 최적  $\Delta D_2$  값은  $D_1$ 가 2와 4 ps/nm/km로 고정된 경우 각각 +0.035 ps/nm/km와 +0.065 ps/nm/km로 얻어졌다.

그림 8은 그림 7로부터 얻어진 최적  $D_x$  값에서 모든 WDM 채널을 비슷한 품질로 보상할 수 있는 OPC의 최상 위치를 찾기 위해  $\Delta z$ 에 따른 채널 1과 16의 EOP를 나타낸 것이다. 그림 8을 통해 최적 OPC 위치가  $D_x=2$  ps/nm/km에서 499 km ( $\Delta z=-1$  km),  $D_x=4$  ps/nm/km에서 500 km ( $\Delta z=0$  km)인 것을 알 수 있다.

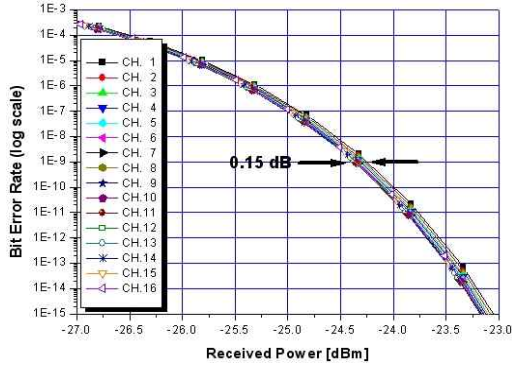


<그림 7>  $\Delta z = 0$  km라고 가정한 경우  $\Delta D_{1x}$ 에 따른 눈 열림 패널티

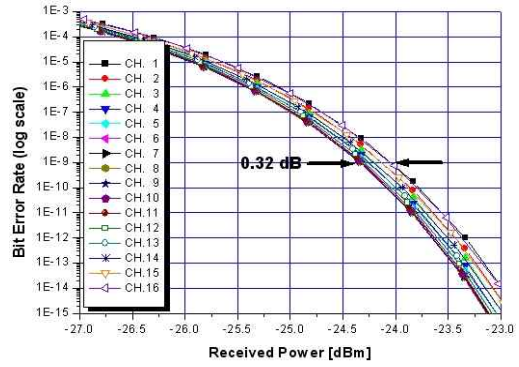


<그림 8> 최적  $\Delta D_{1x}$ 에서  $\Delta z$ 에 따른 눈 열림 패널티

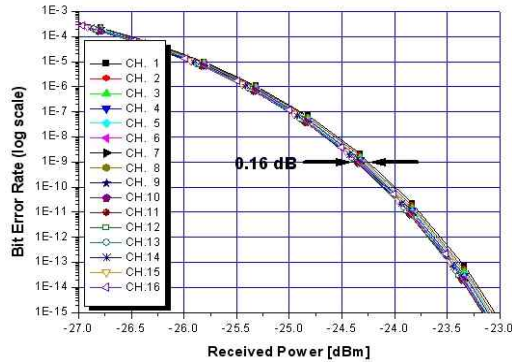
그림 9와 10은 그림 8의 결과에 따른 최적 파라미터들이 적용된 WDM 시스템에서의 BER 특성을 나타낸 것이다. 우선  $D_x=2$  ps/nm/km의 경우 그림 9의 결과, 즉  $\Delta z=-1$  km에서  $D_1$ 는  $D_x=2$  ps/nm/km로 고정된 반면  $D_2=D_x+\Delta D_2=2.035$  ps/nm/km의 경우 (그림 9(a))의 BER 특성이  $D_2$ 는  $D_x=2$  ps/nm/km로 고정된 반면  $D_1=D_x+\Delta D_1=1.965$  ps/nm/km의 경우 (그림 9(b))의 BER 특성과 매우 일치하는 것을 알 수 있다. 아울러 이 결과들을 그림 6(a)와 비교해도 BER 특성이 크게 차이 나지 않는 것을 알 수 있다. 이러한 특성들은  $D_x=4$  ps/nm/km의 경우에서도 동시에 나타난다.



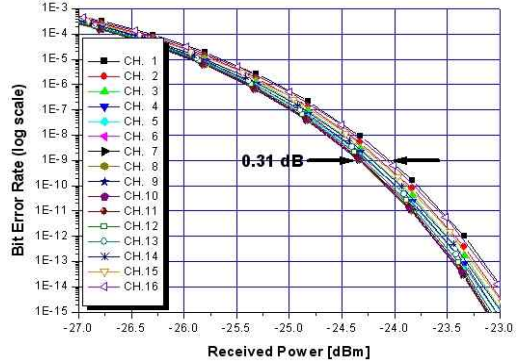
(a) @  $D_{11}=2$  &  $D_{12}=2.035$  ps/nm/km &  $\Delta z=-1$  km



(a) @  $D_{11}=4$  &  $D_{12}=4.065$  ps/nm/km &  $\Delta z=0$  km



(b) @  $D_{11}=1.965$  &  $D_{12}=2$  ps/nm/km &  $\Delta z=-1$  km



(b) @  $D_{11}=3.935$  &  $D_{12}=4$  ps/nm/km &  $\Delta z=0$  km

<그림 9>  $D_x = 2$  ps/nm/km에서 최적 파라미터들이 채택된 WDM 시스템에서의 BER 특성

<그림 10>  $D_x = 4$  ps/nm/km에서 최적 파라미터들이 채택된 WDM 시스템에서의 BER 특성

그림 6과 9, 10을 종합적으로 분석하면, 최적 파라미터를 구하는 순서가 바뀌게 되면 구체적인 값들에서는 차이가 있지만 최적파라미터 값들이 적용된 WDM 시스템에서의 전체 채널의 BER 특성에는 큰 영향이 없음을 확인할 수 있다.

#### IV. 결론

지금까지 40 Gbps의 16 개의 WDM 채널 모두를 비슷한 품질로 보상할 수 있는 OPC의 최적 위치와 두 번째 광섬유 구간의 최적 분산 계수 값을 수치적으로 도출하

고 도출된 두 파라미터가 적용된 WDM 시스템에서의 BER 특성을 MSI가 채택된 WDM 시스템에서의 BER 특성과 비교해 보았다.

본 연구를 통해 최적 파라미터들이 WDM 시스템의 성능에 미치는 영향은 최적 파라미터를 구하는 순서에 크게 상관없지만 두 파라미터가 서로 의존해야 한다는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 최적 파라미터 도출과 이의 적용 관점에서 최적 분산 계수를 정한 후 이에 관련된 OPC 위치를 결정하는 방법보다 최적 분산 계수의 도출 없이 단순히 OPC의 최적 위치만을 결정하는 것이 더욱 쉽게 WDM 시스템의 BER 특성을 개선시키는 것을 알 수 있었다.



## 참고문헌

- [1] 조호성, "반도체 광 증폭기의 기술현황," *주간기술동향*, 통권 833호, 1998.
- [2] K. E. Stubkjaer *et al.*, "Wavelength converter technology," *IEICE Trans. Commun.*, Vol. E82-B, No. 2, 1999, pp. 390.
- [3] W. Pieper *et al.*, "Nonlinearity-insensitive standard-fiber transmission based on optical-phase conjugation in a semiconductor-laser amplifier," *Electron. Lett.*, Vol. 30, pp. 724~726, 1994.
- [4] 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.
- [5] S. Watanabe *et al.*, "Generation of optical phase-conjugate waves and compensation for pulse shape distortion in a single-mode fiber," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 12, No. 12, 1994, pp. 2139~2145.
- [6] 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.
- [7] 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.*, 1997, pp. 1~4.
- [8] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, 2001.
- [9] K. Inoue, "Four-wave mixing in an optical fiber in the zero-dispersion wavelength region," *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-10, no. 11, 1992, pp. 1553~1561.
- [10] F. Forghieri, R. W. Tkach and A. R. Chraplyvy, "WDM systems with unequally spaced channels," *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-13, no. 5, 1995, pp. 889~897.
- [11] S. Kawai and K. Iwatsuki, "System design of filter-guided soliton transmission considering amplitude noise and timing jitter," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 16, No. 12, 1998, pp. 2347~2354.
- [12] 이성렬, 이영교, "WDM 채널 신호의 소광비에 따른 광 위상 공액기의 최적 파라미터 값," *한국향행학회 논문지*, 제11권, 제2호, 2007년 6월.
- [13] G. P. Agrawal, *Fiber-optic communication systems*, John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [14] 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, 1997, pp. 532-535.

### ■ 저자소개 ■



이 영 교  
Lee, Young Kyo

2002년 9월 ~ 현재  
부원대학 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 : 2010년 7월 23일  
수정일 : 2010년 8월 23일(1차), 9월 1일(2차)  
게재확정일 : 2010년 9월 7일