

24×40Gbps WDM시스템에서 비트에러율 개선

정회원 임 황 빈*

Improvement of Bit Error Rate in 40Gbps × 24Channels WDM System

Hwang-Bin Yim* *Regular Member*

요 약

광 전송로로 비영 분산천이 광섬유(NZ-DSF; Non Zero - Dispersion Shifted Fiber)를 이용한 24×40 Gbps WDM(Wavelength Division Multiplexing) 시스템에서 모든 채널을 효과적으로 보상할 수 있는 광 위상 공액기(OPC ; Optical Phase Conjugator)의 최적 위치와 광섬유의 최적 분산 계수 값을 도출하는 수치적 방법을 제안하였다. 이 방법의 유용성을 확인하기 위하여 도출된 두 최적 파라미터를 갖는 시스템에서의 비트 에러율(BER) 특성을 현재 일반화된 MSSI(Mid-Span Spectral Inversion)에서의 BER 특성과 비교하였다. 그 결과 최적 파라미터들을 갖는 OPC를 WDM 시스템에 적용하게 되면 채널 간 파워 페널티를 12배 이상으로 감소시킬 수 있다는 것을 알 수 있었다.

Key Words : WDM 전송 시스템, Optical Phase Conjugator, Optimal parameters, BER 특성

ABSTRACT

The numerical methods of finding the optimal position of optical phase conjugator (OPC) and the optimal fiber dispersions are proposed, which are able to effectively compensate overall channels in 24×40 Gbps WDM(Wavelength Division Multiplexing) system with non zero - dispersion shifted fiber (NZ-DSF) as an optical fiber. And BER 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 applying two induced optimal parameters into WDM system contribute to reduce power penalty to 12 times than that of WDM system with the conventional MSSI.

I. 서 론

다채널 WDM 전송 시스템에서는 DSF의 비선형 특성, 특히 4-광파 혼합 현상(FWM ; Four Wave Mixing)에 의한 심각한 누화(Crosstalk)가 발생되고, 이의 증가는 채널 당 광의 세기를 제한하고, 따라서 전송 거리를 제한하게 되므로 WDM 전송 시스템으로 확장할 때 문제를 야기할 우려가 있다. FWM

현상은 색 분산이 클수록 효율이 작아지게 되므로 ITU-T에서는 영 분산 대역을 1,550nm 대역의 전송로 이동시킨 새로운 광섬유인 비영 분산 천이 광섬유(NZ-DSF ; Non Zero DSF)의 규격화를 진행하고 있다^[1]. 그러나 장거리 전송을 위해 FWM 현상이 감소되더라도 NZ-DSF에 EDFA 등의 광섬유 증폭기가 결합되면 광 신호의 고전력화에 기인하여 비선형 효과 중 자기 위상 변조(SPM ; Self Phase

* 강원도립대학 정보통신과(hbinyim@gw.ac.kr)

논문번호 : 07101-1130, 접수일자 : 2007년 11월 30일

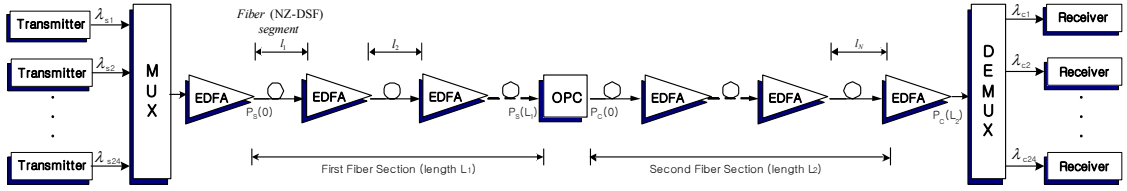


그림 1. 24-채널 WDM 시스템

Modulation), 상호 위상 변조 (XPM; Cross Phase Modulation) 등에 의해 시스템의 비트율-전송 거리 곱에서 한계를 나타낼 수 밖에 없다²⁾. 이러한 한계를 극복하기 위해 광 위상 공액기 (OPC ; Optical Phase Conjugator)를 전체 전송 거리의 중간에 위치시켜 광 신호의 왜곡을 보상하는 MSSI (Mid-Span Spectral Inversion) 방식이 제안되었다³⁾. 그러나 이 기술을 실제적인 WDM 전송 시스템에 적용하려면 OPC를 중심으로 두 전송 구간에서의 광 전력 분포와 분산량이 서로 대칭을 이루어야 한다⁴⁾. 따라서 OPC를 이용하여 모든 채널들을 양호하게 보상하기 위해서는 첫 번째 문제 해결에 필적할 만한 다른 방법을 모색해 보아야 한다.

본 논문에서는 OPC를 중심으로 광 전력 분포와 분산량을 대칭으로 만드는 방법을 대체할 수 있는 수치적 방법을 제안하고자 한다. 즉 광 전송로로 NZ-DSF를 이용한 WDM 시스템에서 모든 채널들을 효과적으로 보상할 수 있는 OPC의 최적 위치와 각 광섬유 구간의 최적 분산 계수 값들을 수치적으로 도출하여 이들 파라미터 값을 갖는 WDM 시스템에서의 비트 에러율 (BER ; Bit Error Rate) 특성을 OPC가 전체 전송로 중간에 위치하고 두 광섬유 구간의 분산 계수가 동일한 MSSI에서의 BER 특성과 비교해 보도록 하겠다. 본 연구에서 가정한 WDM 시스템은 채널 비트율이 40 Gbps인 24-채널 전송 시스템이고, 각 채널의 강도 변조 파형 형식은 RZ로 모델링 하였다. 시뮬레이션은 현재 널리 사용되고 있는 단계 분할 퓨리에 (SSF ; Split-Step Fourier) 방법⁵⁾을 이용해 수행하였다.

II. WDM 시스템의 모델링

같은 편광을 갖고 광섬유를 동시에 전송하는 8 채널 WDM 시스템에서 $A_j(z,t)$ 를 $|A_j|^2$ 의 순시 광 전력에 의해 정규화된 천천히 변하는 j번째 복소 포락선이라 하면 $A_j(z,t)$ 는 아래의 비선형 슈뢰딩거 방정식을 만족하며 전파한다⁵⁾.

$$\frac{\partial A_j}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2} A_j - \frac{i}{2} \beta_{2j} \frac{\partial^2 A_j}{\partial T^2} + \frac{1}{6} \beta_{3j} \frac{\partial^3 A_j}{\partial T^3} + i\gamma_{jl} |A_{jl}|^2 A_j + 2i\gamma_{jkl} A_{kl}^2 A_j \quad (1)$$

여기서 α 는 광섬유의 손실 계수, γ_j 는 j번째 채널 신호 파장, β_{2j} 는 광섬유의 색 분산 파라미터, β_{3j} 는 3차 색 분산 파라미터, γ_{jl} 는 비선형 계수, $T=t-z/v_j$ 이다. 식 (1) 우변의 마지막 두 항은 각각 SPM과 XPM을 유도한다. 여기서 마지막 항, 즉 XPM 항은 수치적 분석 과정을 간단히 하기 위하여 무시하였다.

그림 1은 OPC가 전체 전송 거리의 중간에 위치한 WDM 시스템의 전체 구성을 나타낸 것이다 (즉 MSSI). 총 전송 거리는 상대적인 길이 L_1 과 L_2 의 두 전송 구간(section)으로 나뉜다. 각 전송 구간은 50 km 간격(l)마다 10개의 EDFA로 연결된다. 본 논문에서의 시뮬레이션을 위해 가정한 광섬유 파라미터들은 표 1에 요약해 놓았다⁶⁾.

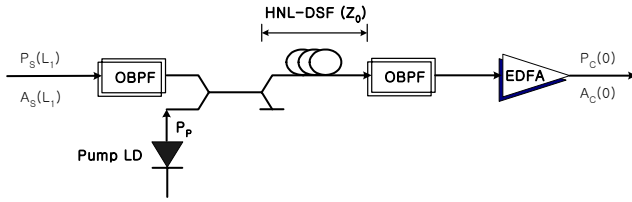
표 1. 광섬유 시뮬레이션 파라미터

파라미터	기호 및 파라미터 값
형태	NZ-DSF
손실 계수	$\alpha_1 = \alpha_2 = 0.2$ dB/km
분산 계수	$D_{1x} = 3$ ps/nm/km
비선형 굴절 계수	$n_2 = 2.5 \times 10^{-26}$ km ² /W
유효 코어 직경	$A_{eff} = 72$ μm ²

Watanabe와 Shirasaki는 MSSI에서 완벽한 보상 조건을 아래와 같이 거리 z 의 함수로 일반화하였다³⁾.

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

이 관계식은 상응 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 관련한



HNL-DSF loss : $\alpha_0 = 0.61 \text{ dB/km}$
 HNL-DSF nonlinear coefficient : $\gamma_0 = 20.4 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$
 HNL-DSF zero dispersion wavelength : $\lambda_0 = 1550.0 \text{ nm}$
 HNL-DSF length : $z_0 = 0.75 \text{ km}$
 HNL-DSF dispersion slope : $dD_0/d\lambda = 0.032 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$
 Pump light power : $P_p = 18.5 \text{ dBm}$
 Pump light wavelength : $\lambda_p = 1549.75 \text{ nm}$

그림 2. HNL-DSF를 이용한 OPC

여 OPC가 전체 전송 거리 중간에 반드시 위치할 필요가 없고, 각 광섬유 구간의 분산 계수들도 반드시 서로 같을 필요가 없음을 의미한다.

그러나 식 (2)는 WDM 채널들의 파장이 다양하기 때문에 모든 파장에 적용 가능한 공통의 OPC 위치와 두 번째 광섬유 구간의 분산 계수 값을 찾는 것이 쉽지 않음을 의미하기도 한다. 이에 본 연구에서는 수치적 분석을 통해 모든 WDM 채널을 최선으로 보상할 수 있는 OPC의 최적 위치와 최적 광섬유 분산 계수 값을 도출해 보고자 한다.

최적 OPC 위치는 OPC를 증폭기의 한 간격 ($\pm 25 \text{ km}$) 내에서 변화시키면서 이 OPC 위치, z_{OPC} 에 대한 특정 채널들의 보상 특성을 분석해서 찾을 수 있을 것이다. 여기서 OPC 위치와 전체 전송 거리의 중간 위치, z_{mid} 의 차이를 OPC 위치 편차 Δz 라고 하자 (즉 $\Delta z = z_{\text{OPC}} - z_{\text{mid}}$). 또한 각 광섬유 구간의 최적 분산 계수 값은 각 광섬유 구간의 분산 계수, $D_{1x}(x=1,2)$ 를 10% 내에서 변화시키면서 이에 대한 특정 채널들의 보상 특성을 분석해서 찾을 수 있을 것이다. 여기서 두 광섬유 구간의 분산 계수 값의 차이를 분산 계수 편차 ΔD_{1x} 로 정의한다. 즉 첫 번째 광섬유 구간의 분산 계수 편차는 $\Delta D_{11} = \Delta D_{11} - \Delta D_{12}$ 로, 두 번째 광섬유 구간의 분산 계수 편차는 $\Delta D_{12} = \Delta D_{12} - \Delta D_{11}$ 으로 정의한다.

그림 1의 송신부에 있는 각 레이저 다이오드는 40 Gbps의 128(=2⁷) 의사 랜덤 비트열 (PRBS ; pseudo random bit sequence)에 의해 외부적으로 변조되는 것으로 가정하였다. 또한 외부 변조기로부터 발생되는 출력 신호는 RZ 형식의 2차 가우시안 (Gaussian) 펄스로 가정하였다.

그림 2는 HNL-DSF (Highly-Nonlinear Dispersion Shifted Fiber)를 이용한 OPC의 구조와 파라미터 값들을 나타낸 것이다. 변환 효율 (η_c)은 FWM 곱 전력 대 입력 신호 전력의 비로 정의된다. 그림 2에 나타낸 OPC에 대한 η_c 의 3-dB 대역폭은 48 nm (1,526~1,574 nm)로 얻어졌다.

본 연구에서는 ITU-T G.694.1 규정에 따라 1번

째 채널의 중심 파장을 1550.0 nm로, 24번째 채널의 중심 파장을 1564.8 nm로 하여 채널 간 중심 파장 간격을 100 GHz (0.8 nm)의 등간격으로 나누어 할당하였다⁷⁾. 따라서 이들 24개 채널의 신호 파장들과 이들의 공액파 파장 모두는 OPC의 η_c 의 3-dB 대역폭 내에 포함된다. 그림 1의 직접 검파 수신기는 5 dB의 잡음 지수를 갖는 EDFA 전치 증폭기, 1 nm 대역폭의 광 필터, PIN 다이오드, Butterworth 필터 구조의 펄스 정형 필터, 마지막으로 판정 회로로 구성되는 것으로 가정하였다.

BER은 참고 문헌 [8]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.

$$BER = \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left[\sqrt{2} \left\{ \frac{(1 - c_{ISI}^+ - \tau) I_{s,av}}{\sigma_{mark}} \right\} \right] + \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left[\sqrt{2} \left\{ \frac{(\tau - c_{ISI}^-) I_{s,av}}{\sigma_{space}} \right\} \right] \quad (3)$$

여기서 $I_{s,av}$ 는 광 신호의 시간 평균 전력의 증가 전류이고, τ 는 수신기 판정 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 편차이고, c_{ISI}^+ 과 c_{ISI}^- 는 각각 ‘1’과 ‘0’의 평균 눈 감김 정도이다.

III. 결과 및 검토

그림 3은 OPC가 전체 전송로 중간에 위치하고 두 광섬유 구간의 분산 계수 값이 모두 3 ps/nm/km로 고정된 경우 (MSSI 경우)의 24개 채널의 BER 특성을 보여주고 있다. 10⁻¹² BER을 얻을 수 있는 수신 전력을 감도(sensitivity)로 정의하면 감도에서의 채널간 전력 페널티가 2.5 dB 이상인 것을 알 수 있다. 즉 MSSI 기술을 24 채널 WDM 시스템에 그대로 적용하는 것에는 한계가 있다고 할 수

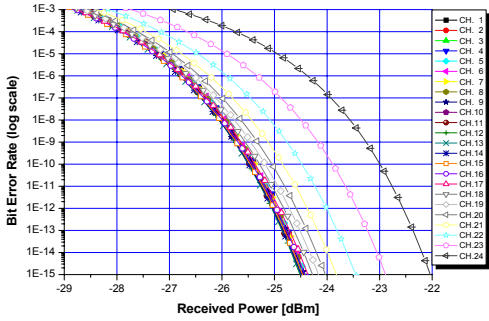


그림 3. MSSI 기술이 채택된 WDM 시스템의 BER 특성

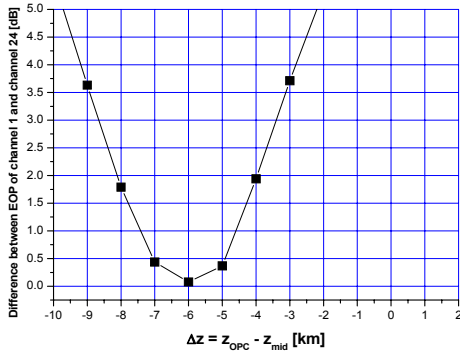


그림 4. Δz에 따른 눈 열림 페널티

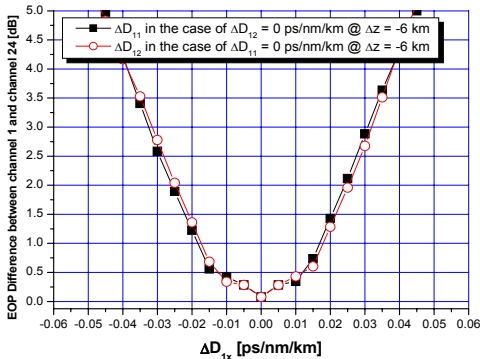


그림 5. OPC가 최적 Δz에 위치하는 경우 ΔD1x에 따른 눈 열림 페널티

있다. 그림 4는 모든 WDM 채널을 비슷한 품질로 보상할 수 있는 최상의 OPC 위치를 찾기 위해 OPC 위치 편차에 따른 채널 1과 24의 눈 열림 페널티 (EOP ; Eye Opening Penalty)를 나타낸 것이다. 여기서 채널 1과 24를 선택한 이유는 둘 사이의 파장 차이가 가장 커서 전송 품질의 차이가 현격하게 나타날 것이기 때문이다. 그림 4로부터 두 채널 사이의 EOP 차이가 가장 작게 나타나는 OPC

위치는 494 km인 것을 알 수 있다.

그림 5는 그림 4의 결과로부터 얻은 최적 Δz에서의 한 쪽 광섬유 구간의 분산 계수편차 (ΔD_{1x})가 0 ps/nm/km일 때 나머지 광섬유 구간의 분산 계수 편차에 따른 채널 1과 24의 EOP를 나타낸 것이다. NZ-DSF의 모든 분산 계수 값에서 $\Delta D_{11}=0$ ps/nm/km일 때의 최적 ΔD_{12} 값은 0 ps/nm/km이고, $\Delta D_{12}=0$ ps/nm/km일 때의 최적 ΔD_{11} 값도 0 ps/nm/km로 얻어졌다. 즉 NRZ 전송의 경우 최적 Δz에서의 WDM 채널들의 양호한 전송을 위한 두 광섬유 구간의 분산 계수 차이는 없어야 한다. 그림 6은 그림 5의 결과가 실제 WDM 시스템에 미치는 영향을 알아보기 위하여 그림 5의 결과, 즉 최적 파라미터들이 적용된 WDM 시스템에서의 BER 특성을 나타낸 것이다. 최적 파라미터들이 WDM 시스템에 적용되면 MSSI(그림 3의 경우)에 비해 전력 페널티 (power penalty)가 12배 이상 줄어드는 것을 알 수 있다. 최적 파라미터들을 구하는데 있어 그림 4와 5는 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 7은 Δz = 0 km라고 가정할 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 8은 한 쪽 광섬유 구간의 분산 계수가 그림 7에서 구한 최상의 ΔD_{1x} 에 의해 $D_{1x}+\Delta D_{1x}$ 로 설정되고 나머지 광섬유 구간의 분산 계수가 3 ps/nm/km로 고정된 경우에서 Δz에 따른 채널 1과 24의 EOP 차이를 나타낸 것이다. 그림 7에서 ΔD_{11} 과 ΔD_{12} 에 대한 EOP 차이 특성이 서로 대칭적으로 나타난다. 즉 $\Delta D_{1x} = 0$ 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 최소로 할 수 있다. 그림 8을 통해 첫 번째 광섬유 구간의 분산 계수가 그림 7의 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 $D_{12} =$

$D_{1x} + \Delta D_{12} = (3+0.075) \text{ ps/nm/km} = 3.075 \text{ ps/nm/km}$ 로 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 BER 특성을 나타낸 것이다. 우선 그림 9(a)와 9(b)의 BER 특성이 서로 비슷하게 나타나고, 그리고 이들은 이와 반대의 절차로 구해진 최적 파라미터들이 적용된 WDM 전체 채널들의 BER 특성을 나타낸 그림 6의 결과들과도 매우 비슷한 것을 알 수 있다. 즉 그림 6과 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.

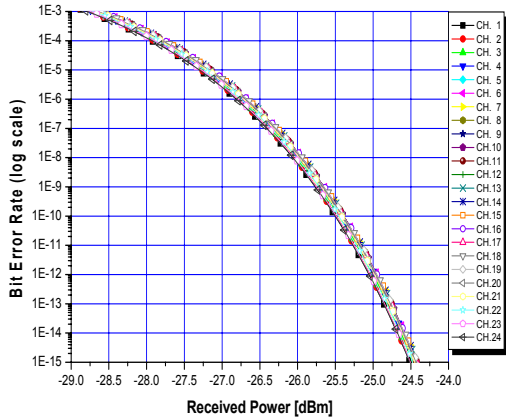


그림 6. 그림 5의 최적 파라미터들이 채택된 WDM 시스템에서의 BER 특성

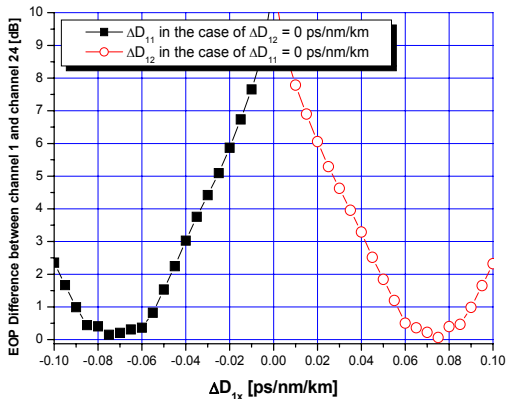


그림 7. OPC가 500 km에 위치하는 경우 ΔD_{1x} 에 따른 눈 열림 페널티

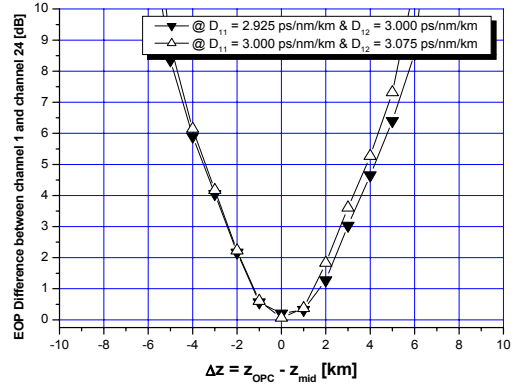
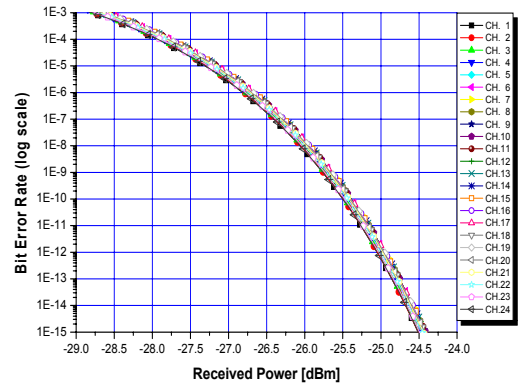
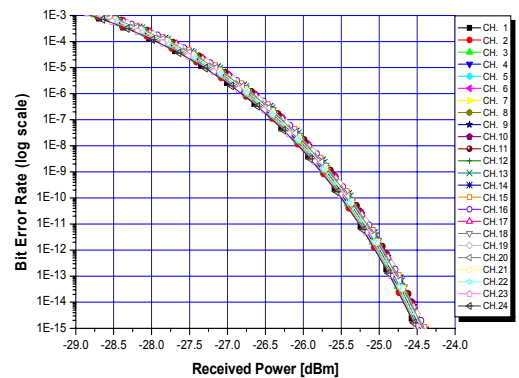


그림 8. 그림 7의 최적 분산 계수를 갖는 경우 Δz 에 따른 열림 페널티



(a) $\Delta z = 0 \text{ km}$, $D_{11} = 2.925$ & $D_{12} = 3.0 \text{ ps/nm/km}$



(b) $\Delta z = 0 \text{ km}$, $D_{11} = 3.0$ & $D_{12} = 3.075 \text{ ps/nm/km}$

그림 9. 그림 8의 최적 파라미터들이 채택된 WDM 시스템에서의 BER 특성

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)).

IV. 결 론

지금까지 OPC를 중심으로 광 전력 분포와 분산량을 대칭으로 만드는 방법을 대체할 수 있는 수치적 방법을 살펴보았다.

OPC를 이용한 WDM 시스템을 통해 고속 채널모드를 양호한 품질로 장거리 전송하고자 한다면 OPC의 위치와 광섬유의 분산 계수가 최적 값으로 설정되어야 한다는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 얻어진 결과를 OPC를 이용한 WDM 전송 시스템에 적용하면 본질적으로 발생되어 보상 효과를 제한하는 광 전력 분포와 분산량의 비대칭 문제를 해소할 수 있을 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

[1] ITU Recommendation "Characteristics of a non-zero dispersion shifted single-mode optical fibre cable" G.655, 2003.

[2] A. R. Chraplyvy, "Limitations on lightwave communications imposed by optical-fiber nonlinearities", *J. Lightwave Technol.*, Vol. 8, No. 10, pp. 1548~1557, 1990

[3] 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. LT-14, no. 3, pp. 243~248, 1996.

[4] C. Lorattanasane and K. Kikuchi, "Design of long-distance optical transmission systems using midway optical phase conjugation", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 7, no. 11, pp 1375~1377, 1995.

[5] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, 2001.

[6] 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.

[7] ITU Recommendation "Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid" G.694.1, 2006

[8] 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, pp. 532535, 1997.

임 황 빈 (Hwang-Bin Yim)

정회원



2002년 순천향대학교 전기전자
공학과 (공학박사)
2003년~현재 강원도립대학 정보
통신과 조교수
<관심분야> 통신응용시스템, 광
통신, 정보보호