

---

# 비영 분산 천이 광섬유를 갖는 WDM 시스템에서 광 위상 공액기의 최적 파라미터를 이용한 비트 에러율 개선

이 성 렬\*

Improvement of Bit Error Rate using the Optimal Parameters of Optical Phase Conjugator  
in WDM System with Non Zero - Dispersion Shifted Fiber

Seong-Real Lee\*

## 요 약

본 논문에서는 광 전송로로 비영 분산천이 광섬유 (NZ-DSF ; Non Zero - Dispersion Shifted Fiber)를 이용한 8×40 Gbps WDM 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 ; Bit Error Rate) 특성을 현재 일반화된 MSSI (Mid-Span Spectral Inversion)에서의 BER 특성과 비교하였다. 최적 파라미터들을 갖는 OPC를 WDM 시스템에 적용하게 되면 채널 간 파워 패널티를 4배 이상으로 감소시킬 수 있다는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 논문에서 제안한 방법은 WDM 시스템에 OPC를 적용하고자 할 때 전제가 되어야 하지만 실제 광 전송 링크에서 구현하기 어려운 OPC를 중심으로 한 광 신호 전력과 총 분산 값의 대칭 문제를 해결해야 하는 방법을 대체할 것으로 예상된다.

## ABSTRACT

The numerical methods of finding out the optimal position of optical phase conjugator (OPC) and the optimal fiber dispersions are proposed, which are able to effectively compensate overall channels in 8×40 Gbps WDM 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 4 times than that of WDM system with the conventional MSSI. 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.

## 키워드

WDM 전송 시스템, Optical Phase Conjugator, Optimal parameters, BER 특성

## I. 서 론

다채널 WDM 전송 시스템에서는 분산 천이 광섬유(DSF ; Dispersion Shifted Fiber)의 비선형 특성, 특히 4-광파 혼합 현상(FWM ; Four Wave Mixing)에 의한 심각한 누화(Crosstalk)가 발생되고, 이의 증가는 결국 전송 거리를 제한하게 되므로 WDM 전송 시스템으로 확장할 때 문제를 야기한다[1]. FWM 현상은 색 분산이 클수록 효율이 작아지게 되므로 ITU-T에서는 영 분산 대역을 1,550nm 대역의 전후로 이동시킨 새로운 광섬유인 비영 분산 천이 광섬유(NZ-DSF ; Non Zero - DSF)의 규격화를 진행하고 있다[2].

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 Modulation), 상호 위상 변조(XPM ; Cross Phase Modulation) 등에 의해 시스템의 비트율-전송 거리 곱(bit rate-distance product)에서 한계를 나타낼 수밖에 없다[3]. 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 제안되었다[4].

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[5]. 두 번째는 선택된 OPC가 모든 WDM 채널들에 대해 비슷한 특성이 나타나도록 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[6]. 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 모든 파장에 공통적으로 적용되는 해결책을 찾는 것이 쉽지 않다. 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 8-채널 전송 시스템이고, 각 채널의 강도 변조 파형 형식은 NRZ로 모델링 하였다. 그리고 FWM 현상을 제거하기 위해 채널의 파장 간격은 비균일하게 하였다[7]. WDM 신호 왜곡에 대한 XPM의 영향은 광섬유의 분산 계수가 클수록 감소한다[8]. 본 논문에서 가정한 NZ-DSF의 분산 계수는 XPM의 영향을 무시할 수 있는 4와 6 ps/nm/km로 하였기 때문에 XPM에 의한 채널 간 누화 현상은 고려하지 않았다. 시뮬레이션은 현재 널리 사용되고 있는 단계 분할 푸리에(SSF ; Split-Step Fourier) 방법[9]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  $j$ 번째 복소 포락선이라 하면  $A_j(z,t)$ 는 아래의 비선형 슈뢰딩거 방정식을 만족하며 전파한다[9].

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

여기서  $j, k = 1, 2, \dots, 8$  ( $j \neq k$ )이고,  $\alpha$ 는 광섬유 손실 계수,  $\beta_j$ 는  $j$ -번째 채널의 신호 파장,  $\beta_{2j}$ 는 광섬유 색 분산 파라미터,  $\beta_{3j}$ 는 3차 색 분산 파라미터,  $\gamma_j$ 는 광섬유의 비선형 계수, 그리고  $T = t - z/v_g$ 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 강도 변조 / 직접 검파(IM/DD ; Intensity Modulation / Direct Detection) WDM 시스템의 전체 구성을 나타낸 것이다(즉 MSSI). 총 전송 거리( $L$ )는 상대적인 길이  $L_1(=L/2)$ 과  $L_2$

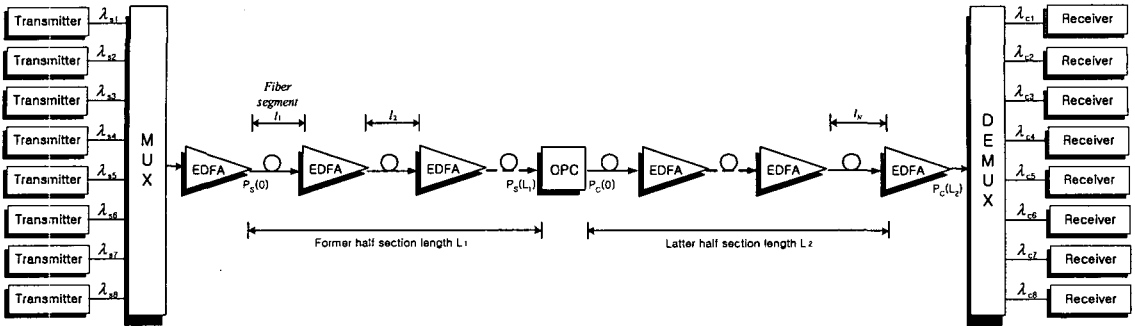


그림 1. 8-채널 WDM 시스템  
Fig. 1. 8-channels WDM system.

의 두 전송 구간(section)으로 나뉜다. 각 전송 구간은 50 km 간격( $l$ )마다 10개의 EDFA로 연결된다. 본 논문에서 가장한 광섬유 파라미터들은 표 1에 요약해 놓았다[10].

표 1. 광섬유 시뮬레이션 파라미터  
Table. 1. Simulation parameters of fibers

파라미터	기호 및 파라미터 값
형태	NZ-DSF
손실 계수	$\alpha_1 = \alpha_2 = 0.2 \text{ dB/km}$
분산 계수	$D_{1\lambda} = 4, 6 \text{ ps/nm/km}$
비선형 굴절 계수	$n_2 = 2.5 \times 10^{-26} \text{ km}^2/\text{W}$
유효 코어 직경	$A_{eff} = 72 \mu\text{m}^2$

Watanabe와 Shirasaki는 MSSI에서 완벽한 보상 조건을 아래와 같이 거리  $z$ 의 함수로 일반화하였다[4].

$$\frac{\beta_2(-z_1')}{P_f(-z_1')\gamma_f(-z_1')} = \frac{\beta_2(z_2')}{P_f(z_2')\gamma_f(z_2')} \quad (2)$$

식 (2)를 통해 완벽한 보상을 위해서는 신호 파장과 관련하여 OPC가 전체 전송 거리 중간에 반드시 위치할 필요가 없고, 각 광섬유 구간의 분산 계수들도 반드시 서로 같을 필요가 없음을 알 수 있다. 그러나 식 (2)는 WDM 채널들의 파장이 다양하기 때문에 모든 파장에 적용 가능한 공통의 OPC 위치와 두 광섬유 구간들의 분산 계수 값을 찾는 것이 쉽지 않음을 의미하기도 한다. 이에 본 연구에

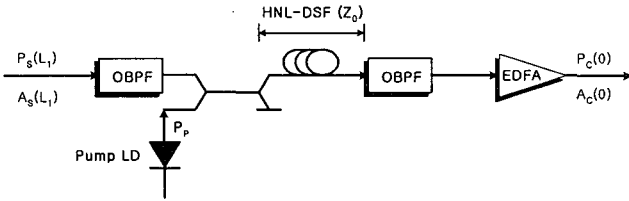
서는 수치적 분석을 통해 모든 WDM 채널을 최선으로 보상할 수 있는 OPC의 최적 위치와 두 번째 광섬유 구간의 분산 계수 값을 도출해 보고자 한다.

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  $\Delta z$ 라고 하자 (즉  $\Delta z = z_{OPC} - z_{mid}$ ). 또한 각 광섬유 구간의 최적 분산 계수 값은 각 광섬유 구간의 분산 계수,  $D_{1\lambda}(x=1,2)$ 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  $\Delta D_{1\lambda}$ 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  $\Delta D_{12} = D_{12} - D_{11}$ 으로 정의한다.

그림 1의 송신부에 있는 각 레이저 다이오드는 40 Gbps의  $127(=2^7-1)$  의사 랜덤 비트열 (PRBS ; Pseudo Random Bit Sequence)에 의해 외부적으로 변조되는 것으로 가정하였다. 또한 외부 변조기로부터 발생하는 출력 신호는 NRZ 형식의 2차 가우시안(Gaussian) 펄스로 가정하였다.

그림 2는 HNL-DSF를 이용한 OPC의 구조와 파라미터 값들을 나타낸 것이다. 변환 효율 ( $\eta$ , con. version efficiency)은 FWM 곱(product) 전력 대 입력 신호 전력의 비로 정의된다[11]. 그림 2에 나타낸 OPC에 대한  $\eta$ 의 3-dB 대역폭은 그림 3과 같이 48 nm (1,526~1,574 nm)로 얻어진다.

본 연구에서는 FWM 효과에 기인하는 채널 간 누화를 제거하기 위하여 WDM 채널 간 파장 간격을 모두 다르게 설정하는 F. Forghieri 등에 의해 제안된 방법[7]에 따라 8



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-DSF 이용한 OPC  
 Fig. 2. OPC using HNL-DSF

개의 채널 파장을 표 2와 같이 각각 설정하였다. 모든 WDM 채널의 신호 파장과 이의 공액파 파장은 그림 3의 3-dB 대역폭 내에 포함된다.

표 2. 8-채널의 파장 할당  
 Table 2. Wavelength allocation of 8-channels

CH. No.	1	2	3	4
Wavelength [nm]	1550.0	1550.7	1551.7	1552.5
CH. No.	5	6	7	8
Wavelength [nm]	1553.4	1553.9	1555.0	1555.6

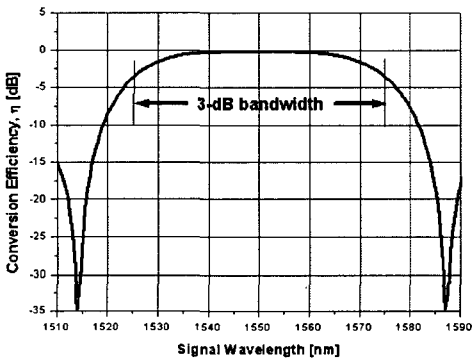


그림 3. 변환 효율 값  
 Fig. 3. Conversion efficiency value

그림 4는 그림 1의 직접 검파 수신기의 구조를 나타낸 것으로, 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 구성된다[12].

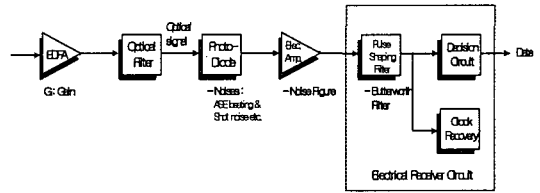


그림 4. 직접 검파 수신기 모델  
 Fig. 4. Model of the direct detection receiver

수신부에서 뿐만 아니라 OPC의 입력단과 출력단에 존재하는 광 필터에 따른 색 분산과 SPM 보상의 영향을 살펴보기 위하여 광 필터를

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

와 같은 주파수 차원에서의 전달 함수를 갖는 로렌치안 (Lorentzian) 필터로 모델링하여 시뮬레이션 하였다. 여기서  $B_0$ 는 3-dB 광 대역폭(optical band width)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 모델링하였고, 검출된 광 신호의 ISI를 최소화하기 위한 펄스 정형 필터는

$$|H(f)|^2 = \frac{1}{1 + (f/B_0)^{2n}} \quad (4)$$

의 전달 함수를 갖는 버터워스 필터로 가정하였다[13]. 여기서  $n$ 은 필터의 차수이고,  $B_0$ 는 필터의 전기적 대역폭이다.

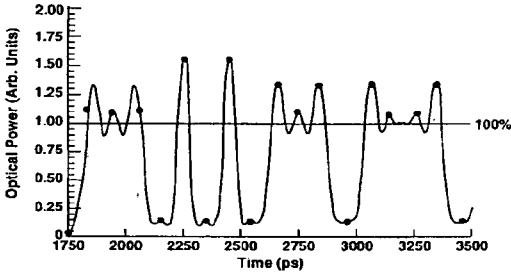


그림 5. PRBS 데이터 신호의 마크와 스페이스에서의 눈 감김 정도를 이용한 ISI의 결정  
 Fig. 5. Determination of the ISI at mark and space of PRBS data signal using eye closure factor

BER은 참고 문헌 [14]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 5와 같은 방법에 따라 식 (5)를 통해 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 평균 눈 감김 정도  $c_{ISI}^+$ 과  $c_{ISI}^-$ , 그리고 광 신호 평균 전력의 등가 전류와 OSNR을 이용하여 수신단에서의 잡음 전력과 BER을 유도한다.

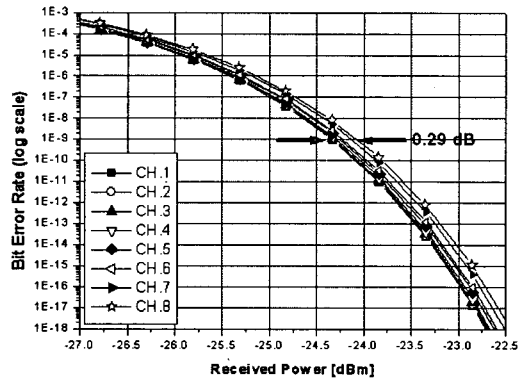
결국 잡음들이 가우시안 분포를 갖는다는 조건에서의 유도된 BER은

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

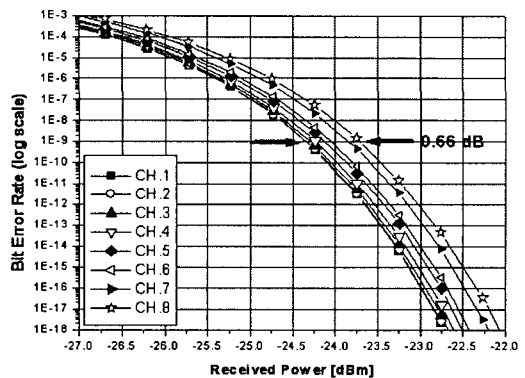
와 같이 표현된다. 여기서  $\tau$ 는 수신기 판별 회로에 설정된 판별 문턱치(decision threshold level)이다. 그리고  $\sigma_{mark}$ 과  $\sigma_{space}$ 는 잡음 전력과 관련된 각각 '1' 신호와 '0' 신호에 대한 잡음의 표준 편차이다.

### III. 결과 및 검토

그림 6은 OPC가 전체 전송로 중간에 위치하고 두 광섬유(NZ-DSF) 구간의 분산 계수 값이 모두 표 1과 같이 고정된 경우 (MSSI 경우)의 8개 채널의 BER 특성을 보여주고 있다.  $10^{-9}$  BER을 얻을 수 있는 수신 전력을 감도 (sensitivity)로 정의하면 감도에서의 채널간 전력 패널티



(a) @  $D_{LX} = 4 \text{ ps/nm/km}$



(b) @  $D_{LX} = 6 \text{ ps/nm/km}$

그림 6. MSSI가 채택된 시스템의 BER 특성  
 Fig. 6. BER characteristics in WDM system with MSSI.

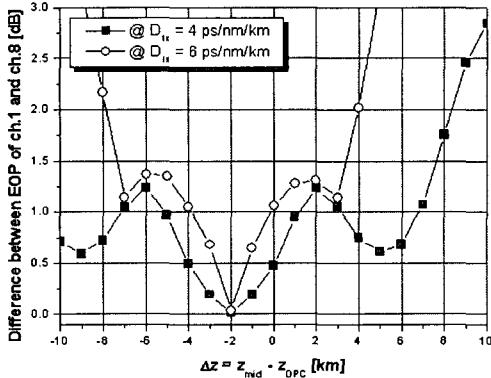


그림 7.  $\Delta z$ 에 따른 눈 열림 페널티 차이  
Fig. 7. EOP differences as a function of  $\Delta z$ .

는 NZ-DSF의 분산 계수가 클수록 증가하는 것을 알 수 있다. 즉 FWM에 의한 WDM 신호의 왜곡을 줄이고자 NZ-DSF의 분산 계수를 늘릴수록 모든 채널을 비슷한 품질로 보상하는 것이 더욱 어려운 큰 분산 계수의 NZ-DSF를 갖는 WDM에 직접 적용하는 것에는 한계가 있을 수 있다는 것을 알 수 있다.

그림 7은 모든 WDM 채널을 비슷한 품질로 보상할 수 있는 최상의 OPC 위치를 찾기 위해 OPC 위치 편차에 따른 채널 1과 8의 눈 열림 페널티 (EOP ; Eye Opening Penalty) 차이를 나타낸 것이다. 여기서 채널 1과 8을 선택한 이유는 둘 사이의 파장 차이가 가장 커서 전송 품질의 차이가 현격하게 나타날 것이기 때문이다. 그림 7로부터 두 채널 사이의 EOP 차이가 가장 작게 나타나는 OPC 위치는 NZ-DSF의 분산 계수 값에 관계없이 모두 498 km인 것을 알 수 있다.

그림 8은 그림 7의 결과로부터 얻은 최적  $\Delta z$ 에서의 한 쪽 광섬유 구간의 분산 계수가 고정된 경우 나머지 광섬유 구간의 분산 계수 편차에 따른 채널 1과 8의 EOP 차이를 나타낸 것이다. 그림을 통해 OPC가 최적 위치에 있으면  $D_{1x} = 4, 6 \text{ ps/nm/km}$ 인 경우 모두 두 광섬유 구간 사이에는 분산 계수의 차이가 없어야 한다는 것을 알 수 있다.

그림 9는 그림 8의 결과가 실제 WDM 시스템에 미치는 영향을 알아보기 위하여 그림 8의 결과, 즉 최적 파라미터들이 적용된 WDM 시스템에서의 BER 특성을 나타낸 것이다. 최적 파라미터들이 WDM 시스템에 적용되면 MSI(그림 6의 경우)에 비해 전력 페널티를 4배 이상 감소시켜 모든 WDM 채널들이 거의 비슷한 품질로 보상되는 것을 알 수 있다.

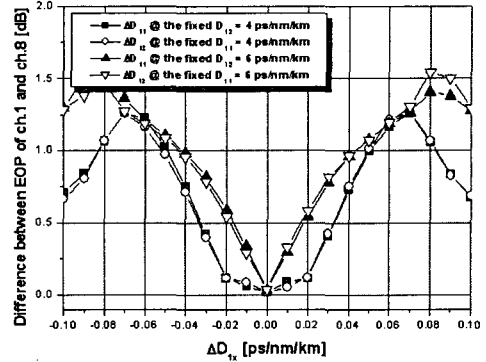
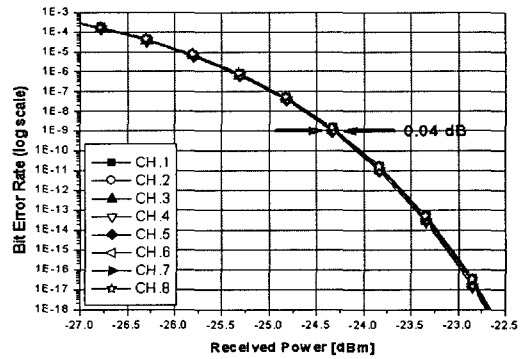
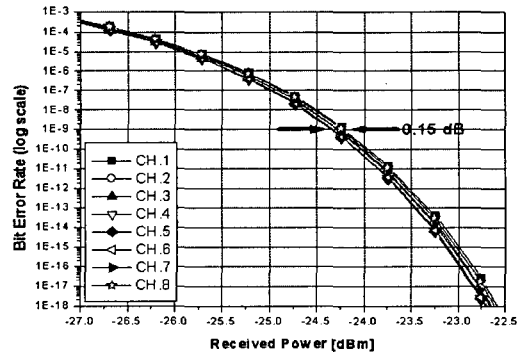


그림 8. OPC가 최적  $\Delta z$ 에 위치하는 경우  $\Delta D_{1x}$ 에 따른 눈 열림 페널티 차이  
Fig. 8. EOP differences as a function of  $\Delta D_{1x}$  when  $\Delta z$  is optimized.



(a) @  $\Delta z = -2 \text{ km}$  &  $D_{1x} = 4 \text{ ps/nm/km}$



(b) @  $\Delta z = -2 \text{ km}$  &  $D_{1x} = 6 \text{ ps/nm/km}$

그림 9. 그림 8의 최적 파라미터들이 채택된 WDM 시스템에서의 BER 특성  
Fig. 9. BER characteristics in WDM system with the optimal parameters obtained in Fig. 8.

최적 파라미터들을 구하는데 있어 그림 7과 8은 우선  $\Delta z$  값을 먼저 구하고 그 값에서  $\Delta D_{11}$  또는  $\Delta D_{12}$ 를 구하는 순서를 따랐다. 이 두 파라미터들의 상관성을 알아보기 위하여 구하는 순서를 바꿔볼 필요가 있다.

그림 10은  $\Delta z = 0$  km라고 가정한 경우 한 쪽 광섬유의 분산 계수가 고정되었을 때 나머지 광섬유의 분산계수 편차에 따른 채널 1과 8의 EOP를 나타낸 것이다. 가장 눈에 여겨 보아야 할 특징은 각 채널별  $\Delta D_{11}$ 과  $\Delta D_{12}$ 에 대한 EOP 특성이 서로 대칭적이라는 것이다. 즉 모든 경우에 대해  $\Delta D_{11}=0$  ps/nm/km일 때의  $\Delta D_{12}$  변화에 따른 EOP 특성은  $\Delta D_{12}=0$  ps/nm/km일 때의  $\Delta D_{11}$  변화에 따른 EOP 특성과 반대로 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 특성은 최적  $\Delta z$ 에서의 최적  $\Delta D_{1x}$ 값이 서로 반대 부호로 나타나게 만든다.

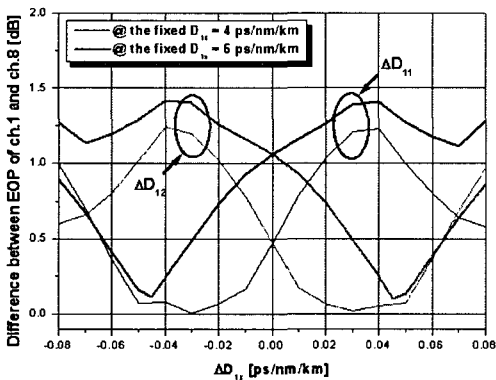


그림 10.  $\Delta z = 0$  km라고 가정한 경우  $\Delta D_{1x}$ 에 따른 눈 열림 패널티 차이

Fig. 10. EOP differences as a function of  $\Delta D_{1x}$  in the case of assuming  $\Delta z = 0$  km.

즉 모든 경우에 대해  $\Delta D_{11}=0$  ps/nm/km일 때의  $\Delta D_{12}$  변화에 따른 EOP 특성은  $\Delta D_{12}=0$  ps/nm/km일 때의  $\Delta D_{11}$  변화에 따른 EOP 특성과 반대로 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 특성은 최적  $\Delta z$ 에서의 최적  $\Delta D_{1x}$ 값이 서로 반대 부호로 나타나게 만든다. 이러한 특성은 그림 8에서도 나타나는 데 최적  $\Delta D_{1x}$ 가 모두 0 ps/nm/km로 얻어져서 그렇게 보이지 않을 뿐이다. 그림을 통해 NZ-DSF의 분산 계수를 4 ps/nm/km로 하는 경우  $\Delta D_{11}=0$  ps/nm/km일 때의 최적  $\Delta D_{12}$  값은 +0.030 ps/nm/km인 반면  $\Delta D_{12}=0$  ps/nm/km일 때의 최적  $\Delta D_{11}$  값은 -0.030 ps/nm/km, 분산 계수를 6 ps/nm/km로 하는 경우  $\Delta D_{11}=0$  ps/nm/km일 때의 최적  $\Delta D_{12}$  값은 +0.045 ps/nm/km인 반면  $\Delta D_{12}=0$  ps/nm/km일 때

의 최적  $\Delta D_{11}$  값은 -0.045 ps/nm/km임을 알 수 있다.

그림 8과 다른 결과 값이 나오는 것은 최적 파라미터들을 구하는 순서에 따라 전체로 한  $\Delta z$  값이 그림 8과 달라졌기 때문이다. 이러한 사실은  $\Delta z$ 와  $\Delta D_{1x}$ 이 서로 연관되어 있다는 것을 의미한다. 즉  $\Delta z$  값에 따라 최적  $\Delta D_{1x}$  값이 바뀌어야 한다는 것을 의미한다.

그림 11은 그림 10의 결과로부터 얻은 최적  $\Delta D_{1x}$ 에서의  $\Delta z$ 에 따른 채널 1과 8의 EOP를 나타낸 것이다. 그림 10의 결과가 타당성을 얻으려면  $\Delta D_{11}$ 와  $\Delta D_{12}$ 의 차이가 그림 10의 결과에 따라 설정된 경우  $\Delta z$ 의 변화에 따른 각 채널의 EOP 특성 (즉 예를 들어,  $\Delta D_{11}=0$  ps/nm/km이고  $\Delta D_{12}=+0.045$  ps/nm/km인 경우의 채널 1의 EOP 특성과  $\Delta D_{11}=-0.045$  ps/nm/km이고  $\Delta D_{12}=0$  ps/nm/km인 경우의 채널 1의 EOP 특성)이 일치하게 나타나야 하고, 최적  $\Delta z$ 는 그림 10의 전제이었던 0 km이어야 하는데 이러한 결과가 모든 경우에 대해서 나타나는 것을 그림 11을 통해 확인할 수 있다.

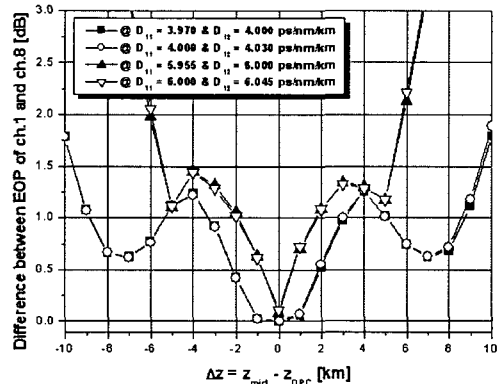


그림 11. 최적  $\Delta D_{1x}$ 에서  $\Delta z$ 에 따른 눈 열림 패널티 차이

Fig. 11. EOP differences as a function of  $\Delta z$  for optimal  $\Delta D_{1x}$

그림 12는 그림 11의 결과에 따른 최적 파라미터들이 적용된 WDM 시스템에서의 모든 채널의 BER 특성을 나타낸 것이다. 그림들 중 왼쪽 그림들은  $D_{11}=D_{1x}$ 이고  $D_{12}=D_{1x}+\Delta D_{12}$ 인 경우의 NZ-DSF의 분산 계수 값에 따른 BER 특성이고, 오른쪽 그림들은  $D_{11}=D_{1x}+\Delta D_{11}$ 이고  $D_{12}=D_{1x}$ 인 경우의 BER 특성들로 서로 일치하는 것을 알 수 있다. 그리고 그림 12의 결과들은 그림 8의 결과들과도 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 즉 최적 파라미터를 구하

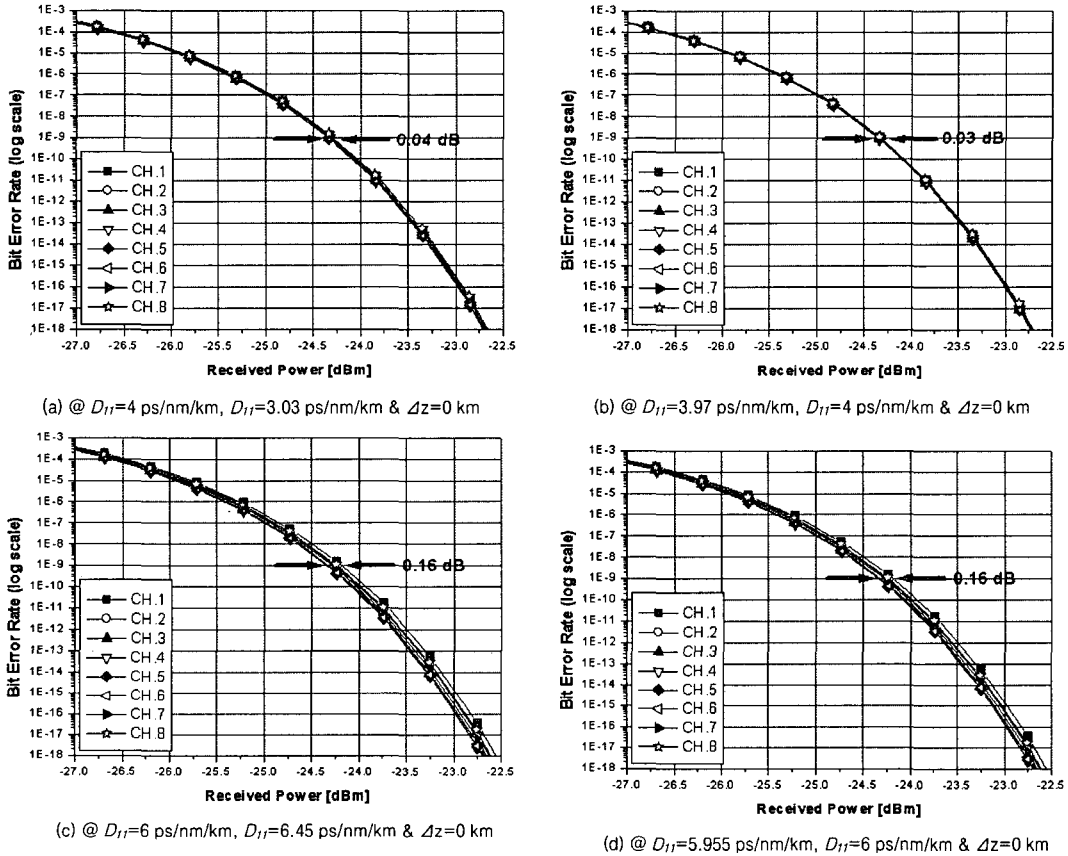


그림 12. 그림 11의 최적 파라미터들이 채택된 WDM 시스템에서의 BER 특성  
 Fig. 12. BER characteristics in WDM system with the optimal parameters obtained in Fig. 11.

는 순서가 바뀌게 되면 구체적인 값들에서는 차이가 있지만 최적 파라미터 값들이 적용된 WDM 시스템에서 전체 채널의 BER 특성에는 큰 영향이 없음을 확인할 수 있다.

#### IV. 결론

지금까지 OPC를 중심으로 광 전력 분포와 분산량을 대칭으로 만드는 방법을 대체할 수 있는 수치적 방법을 광 전송로로 NZ-DSF를 이용한 WDM 시스템에 NRZ 형식을 전송하는 경우에 대해 살펴보았다.

우선 OPC를 이용한 WDM 시스템을 통해 고속 채널 모두를 양호한 품질로 장거리 전송하고자 한다면 OPC의 위치와 광섬유의 분산 계수가 최적 값으로 설정되어야 한다

는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 최적 파라미터들은 구하는 순서에 크게 의존하지 않지만 두 파라미터들은 서로 연관되어 있어야 한다는 것을 알 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.

#### 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, pp. 1068~1077, 1990.

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

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

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[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] 이성렬, 김지웅, 손성찬, "320 Gbps 강도 변조 직접 검파 WDM 시스템의 채널 보상에서 상호 위상 변조의 영향", 한국해양정보통신학회논문지, 8권 6호, pp. 1234~1242, 2004년 10월.

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

[10] 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.

[11] K. Inoue, "Four-wave mixing in an optical fiber in the zero-dispersion wavelength region", J. Lightwave Technol., vol. LT-10, no. 11, pp. 1553~1561, 1992.

[12] G. P. Agrawal, Fiber-optic communication systems, John Wiley & Sons, Inc., 2002.

[13] 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, pp. 2347~2354, 1998.

[14] 이성렬, "Mid-Span Spectral Inversion 기법을 채택한 장거리 광 전송 시스템에서의 증폭기 간격에 따른 비트 에러율", 한국항해학회논문지 9권 2호, pp. 109~120, 2005.

## 저자소개

### 이 성 렬(Seong-Real Lee)



1990년 2월 한국항공대학교 통신정보공학과 (공학사)  
1992년 8월 한국항공대학교 대학원 통신정보공학과 (공학석사)

2002년 2월 한국항공대학교 대학원 통신정보공학과 (공학박사)

1996년 1월~2002년 5월 (주)세영통신 전파기술연구소 책임연구원

2002년 6월~2004년 2월 (주)에이티엔 기술연구소장

2004년 3월~현재 국립목포해양대학교 해양전자통신공학부 조교수

※ 관심분야: WDM 시스템, 광의 비선형 현상 분석, 광솔리톤 전송