

# 비영 분산 천이 광섬유를 갖는 WDM 시스템에서 광 위상 공액기에 의한 왜곡된 광 신호의 보상

## Compensation for the Distorted Signals in WDM System with Non Zero - Dispersion Shifted Fiber Using Optical Phase Conjugator

이 성 렬

Seong-Real Lee

### 요 약

본 논문에서는 광 전송로로 비영 분산 천이 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 보상 특성을 MSSI(Mid-Span Spectral Inversion)에서의 보상 특성과 비교하였다. 우선 OPC를 이용한 WDM 시스템에서 모든 채널을 효과적으로 보상하는데 있어 본 논문에서 구한 최적 파라미터 값들이 매우 유용하다는 것을 확인하였다. 그리고 이 최적 파라미터들은 구하는 순서에 크게 의존하지 않지만 서로 연관되어 있어야 한다는 것을 알 수 있었다. 본 논문에서 제안한 방법은 WDM 시스템에 OPC를 적용하고자 할 때 발생하는 OPC를 중심으로 한 광 신호 전력과 총 분산 값의 비대칭 문제를 해결할 수 있는 방법을 대체할 것으로 예상된다.

### Abstract

In this paper, 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 8×40 Gbps WDM system with non zero-dispersion shifted fiber(NZ-DSF) as an optical fiber. And the compensation characteristics in the system with two induced optimal parameters are compared with those in the system with mid-span spectral inversion (MSSI) technique in order to confirm the availability of the proposed methods. It is confirmed that the optimal parameter values induced in this approach are very useful to effectively compensate overall channels in WDM system with OPC. And, it is confirmed that two optimal parameters depend on each other, but less related with the searching procedure. 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 is a serious problem of applying the OPC into multi-channels WDM system.

Key words : Optical Phase Conjugator, Mid-Span Spectral Inversion, WDM, NZ-DSF, Optimal Parameters

### I. 서 론

최근의 통신 용량 수요의 급증에 따라 통신에서

의 기준 패러다임이 변화하고 있고, 향후 통신의 개인화, 멀티미디어화가 더욱 더 진행되면 필요한 시스템 전송 용량은 비약적으로 계속 증가하여 테라비

트를 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<sup>[1]</sup>, 정밀한 파장 제어와 가변이 가능한 반도체 레이저<sup>[2]</sup>, 광섬유의 고기능화 등이 WDM 시스템의 발전을 가능하게 했다.

10 Gbps 이상의 고속 광 전송 시스템이 현장에 적용되면서 광 펄스가 붕괴되는 현상인 색 분산(chromatic dispersion)을 줄이기 위해 기존 1,300 nm 대역에서 사용되던 단일 모드 광섬유(SMF: Single Mode Fiber) 대신에 영 분산 파장을 1,550 nm로 갖는 분산 천이 광섬유(DSF: Dispersion Shifted Fiber)의 사용이 확대되고 있으나, 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<sup>[3]</sup>. FWM 현상은 색 분산이 클수록 효율이 작아지게 되므로 ITU-T에서는 영 분산 파장이 전송 대역 밖에 위치하면서 색 분산이 6 ps/nm/km 정도로 제한된 새로운 광섬유의 규격화를 진행하고 있다<sup>[4]</sup>.

DSF는 C-밴드가 영 분산 대역이 되기 때문에 C-밴드를 사용하는 WDM 전송에는 적합하지 않다. DSF를 그대로 WDM에 이용하려면 단위 파장의 주파수 간격을 불균등하게 하고 C-밴드 이외의 파장 영역을 사용해야 한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 영 분산 대역을 1,550 nm 대역의 전후로 이동시킨 비영 분산 천이 광섬유(NZ-DSF: Non Zero DSF)가 새로운 WDM용 광 전송로로 대두되고 있다.

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<sup>[5]</sup>. 이러한 한계

를 극복하기 위해 광 위상 공역기(OPC: Optical Phase Conjugator)를 전체 전송 거리의 중간에 위치시켜 광 신호의 왜곡을 보상하는 MSS(Mid-Span Spectral Inversion) 방식이 제안되고, 현재 솔리톤(soliton) 전송을 대체할만한 기술로 쓰이고 있다<sup>[6]</sup>.

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<sup>[7]</sup>. 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<sup>[8]</sup>. 하지만 첫 번째 문제 때문에 완벽한 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, 광섬유의 분산 계수 값, 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.

본 논문에서는 OPC를 중심으로 광 전력 분포와 분산량을 대칭으로 만드는 방법을 대체할 수 있는 수리적 방법을 제안하고자 한다. 즉 광 전송로로 NZ-DSF를 이용한 WDM 시스템에서 모든 채널들을 효과적으로 보상할 수 있는 OPC의 최적 위치와 두 번째 광섬유 구간의 최적 분산 계수값을 수치적으로 도출하고자 한다. 그리고 도출된 이들 파라미터 값의 유용성을 확인을 위해 유도된 두 파라미터로 설계된 WDM 시스템에서의 보상 정도를 OPC가 전체 전송로 중간에 위치하고 두 광섬유 구간의 분산 계수가 동일한 MSS에서의 보상 정도와 비교해 보도록 하겠다.

본 연구에서 가정한 WDM 시스템은 채널 비트율이 40 Gbps인 8-채널 전송 시스템이고, 각 채널의 강도 변조 파형 형식은 NRZ와 RZ로 모델링 하였다. FWM 현상을 제거하기 위해 채널의 파장 간격은 비

균일하게 하였다<sup>[9]</sup>. WDM 신호 왜곡에 대한 XPM의 영향은 광섬유의 분산 계수가 클수록 감소한다<sup>[10],[11]</sup>. 본 논문에서 가정한 NZ-DSF의 분산 계수는 XPM의 영향을 무시할 수 있는 6 ps/nm/km로 하였기 때문에 XPM에 의한 채널 간 누화 현상은 고려하지 않았다. 시뮬레이션은 현재 널리 사용되고 있는 단계 분할 퓨리에(SSF: Split-Step Fourier) 방법<sup>[12]</sup>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<sup>[12]</sup>.

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

여기서  $j, k=1, 2, \dots, 8(j \neq k)$ ,  $\alpha$ 는 광섬유의 손실 계수,  $\lambda_j$ 는  $j$ -번째 채널의 신호 파장,  $\beta_{2j}$ 는 색 분산 파라미터,  $\beta_{3j}$ 는 3차 색 분산 파라미터,  $\lambda_j$ 는 비선형 계수,  $T = t - z/v_j$ 이다. 식 (1) 우변의 마지막 두 항은 각각 SPM과 XPM을 유도한다.

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 MSSSI). 총 전송 거리는 상대적인 길이  $L_1(=L/2)$ 과  $L_2$  두 전송 구간(section)으로 나뉜다. 각

전송 구간은 50 km 간격( $l$ )을 갖는 EDFA 10개로 연결되고 두 구간 모두 분산 계수는 6 ps/nm/km로 동일하게 가정하였다. 표 1에 본 논문에서 가정한 송신기<sup>[12]</sup>, 수신기<sup>[13]</sup> 및 광섬유<sup>[14]</sup>의 기타 파라미터를 요약해 놓았다.

Watanabe와 Shirasaki는 MSSSI에서 완벽한 보상 조

표 1. 시뮬레이션 파라미터

Table 1. Simulation parameters.

Parameters		Symbol and value
Transmitter	Bit rate	$R_b=320$ Gbps( $=8 \times 40$ Gbps)
	Waveform	NRZ super-Gaussian( $m=2$ ), RZ super-Gaussian( $m=2$ )
	Pattern	PRBS $2^7 - 1$ (127 bits)
	Chirp	0
Fiber	Type	NZ-DSF
	Loss	$\alpha_1 = \alpha_2 = 0.2$ dB/km
	Total length	1,000 km( $L_1=L_2=500$ km)
	Dispersion coefficient	$D_{11}=D_{12}=6$ ps/nm/km
	Nonlinear refractive coefficient	$n_2=2.5 \times 10^{-26}$ km <sup>2</sup> /W
	Effective core section	$A_{eff} = 72$ $\mu$ m <sup>2</sup>
	Number of EDFA	20
EDFA spacing	$l=50$ km	
Receiver	Type	PIN-PD with EDFA pre-amp
	EDFA noise figure	5 dB
	Optical bandwidth	1 nm
	Receiver bandwidth	$0.65 \times R_b$

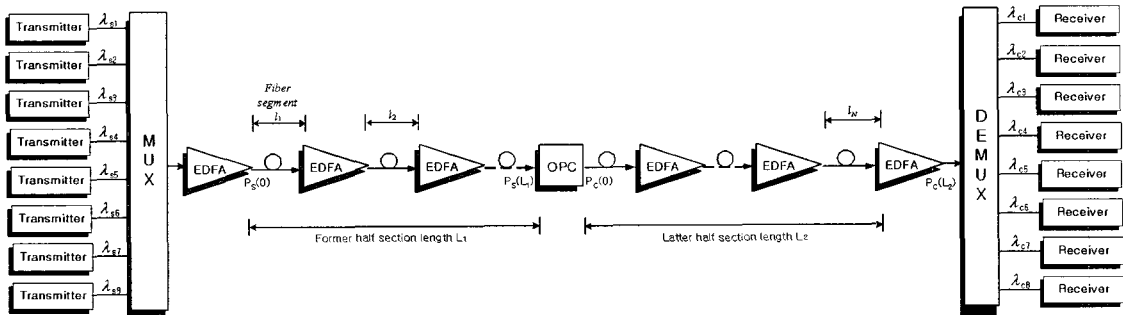


그림 1. 8x40 Gbps WDM 시스템의 모델링  
Fig. 1. Simulation model of 8x40 Gbps WDM system.

건을 아래와 같이 거리  $z$ 의 함수로 일반화하였다<sup>6)</sup>.

$$\frac{\beta_2(-z_1)}{\gamma_1(-z_1)P_1(-z_1)} = \frac{\beta_2(z_2)}{\gamma_1(z_2)P_1(z_2)} \quad (2)$$

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 번째 광섬유 구간의 분산 계수도 첫 번째 광섬유 구간의 분산 계수와 반드시 같을 필요가 없음을 의미한다. 그러나 식 (2)는 WDM 채널들의 파장이 다양하기 때문에 모든 파장에 적용 가능한 공통의 OPC 위치와 각 광섬유 구간의 분산 계수 값들을 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.

최적 OPC 위치는 OPC를 증폭기의 한 간격(즉  $\pm 25$  km) 내에서 변화시키면서 이 OPC 위치( $z_{OPC}$ )에 대한 특정 채널들의 보상 특성을 분석해서 찾고자 한다. 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 값( $D_{1x}, x=1, 2$ )은 각 광섬유 분산 계수를 6 ps/nm/km의 10% 내에서 변화시키면서 이에 대한 특정 채널들의 보상 특성을 분석해서 찾고자 한다. 여기서 각 광섬유 구간의 분산 계수 값의 차이를 분산 계수 편차( $\Delta D_{1x}$ )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.

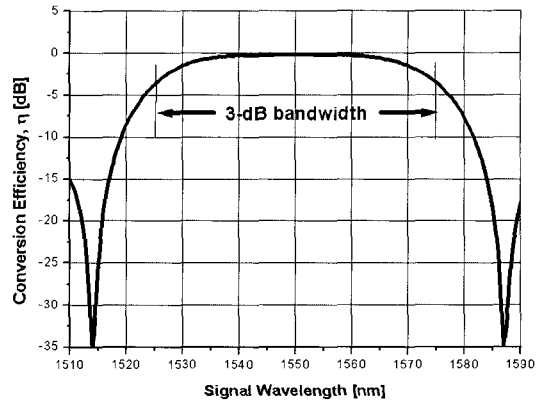


그림 3. 변환 효율 값  
Fig. 3. Conversion efficiency value.

그림 2는 HNL-DSF를 이용한 OPC의 구조와 파라미터 값들을 나타낸 것이다. 변환 효율( $\eta$ , conversion efficiency)은 FWM 곱(product) 전력 대 입력 신호 전력의 비로 정의된다<sup>15)</sup>. 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<sup>9)</sup>에 따라 8개의 채널 파장은 각각 1550.0, 1550.7, 1551.7, 1552.5, 1553.4, 1553.9, 1555.0, 1555.6 nm로 설정하였다. 따라서 모든 WDM 채널의 신호 파장과 이의 공액파 파장은 그림 3의 3 dB 대역폭 내에 포함된다.

### III. 시뮬레이션 결과 및 검토

그림 4는 MSS가 적용된 WDM 시스템(즉 OPC가 전체 전송로 중간에 위치하고, OPC를 중심으로 한

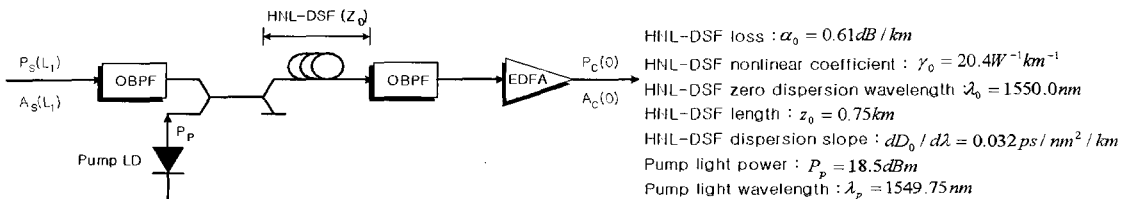
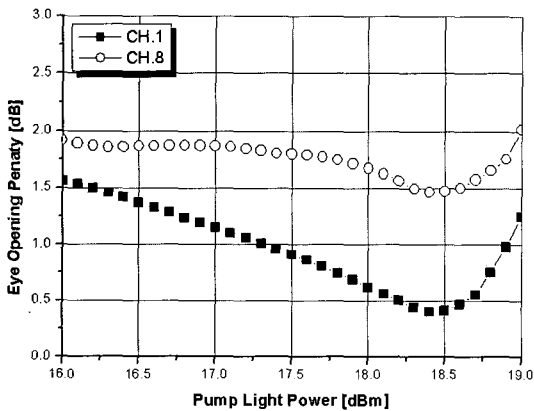


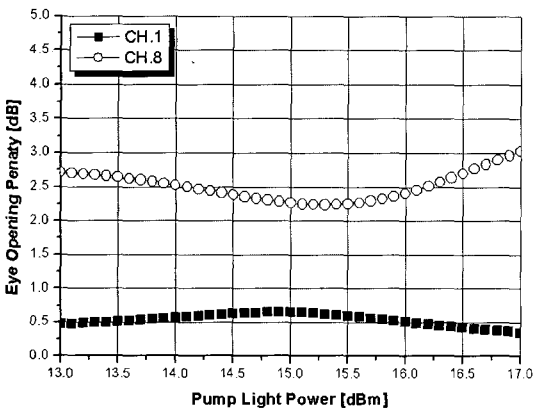
그림 2. HNL-DSF를 이용한 OPC  
Fig. 2. OPC using HNL-DSF.

두 광섬유 구간의 분산 계수가 6 ps/nm/km로 동일하게 가정한 시스템)에서의 각각 NRZ 전송과 RZ 전송에 대한 OPC의 최적 펌프 전력(pump light power)을 찾기 위하여 입사 광 전력(launched light power)이 0 dBm인 경우의 펌프 전력 변화에 따른 채널 1과 채널 8의 눈 열림 페널티(EOP: Eye Opening Penalty)를 나타낸 것이다. 여기서 채널 1과 8만을 선택한 것은 전체 채널 중 두 채널의 신호 파장의 차이가 가장 크기 때문이다. 그림 4를 통해 NRZ 전송의 경우 최적 펌프 전력은 두 채널 모두의 EOP가 공통적으로 가장 작은 18.4 dBm으로 선택하였다. 또한 RZ 전송의 경우에는 그림 4(b)의 결과에 따라 15.3 dBm으로 선택하였다.

그림 5는 MSI가 적용된 WDM 시스템에서 OPC

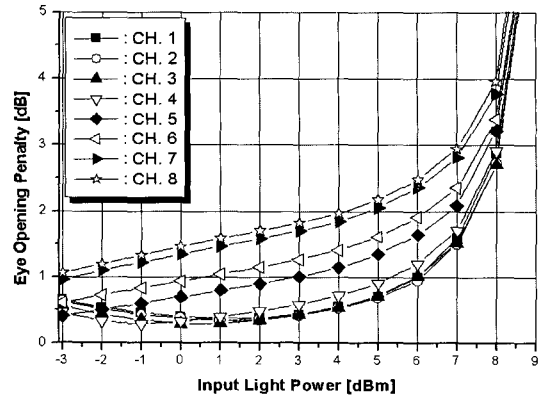


(a) NRZ

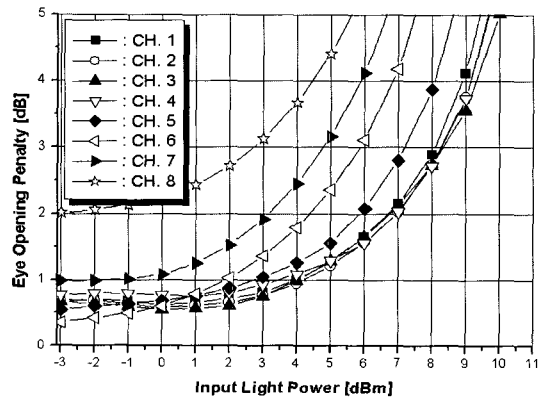


(b) RZ

그림 4. 펌프 광 전력에 따른 눈 열림 페널티  
Fig. 4. Eye opening penalty as a function of pump light power.



(a) NRZ



(b) RZ

그림 5. MSI가 채택된 WDM 시스템에서 입사 광 전력에 따른 눈 열림 페널티

Fig. 5. Eye opening penalty as a function of the launched light power in WDM system with MSI.

가 그림 4로부터 얻은 최적 펌프 전력으로 설정된 경우의 입사 광 전력에 따른 전체 채널들의 EOP를 나타낸 것이다. 각 채널의 양호한 수신이 가능한 입사 전력의 크기 제한 기준을 1 dB EOP라고 하면 NRZ 전송의 경우 채널 간 전력 페널티(power penalty)는 6 dB 정도 되고, RZ 전송의 경우에는 그 이상이 되는 것을 알 수 있다. 이 결과는 본 연구에서 가정한 HNL-DSF OPC가 이용된 MSI 방법을 통해 WDM 채널들을 보상하는 것에는 채널 간 성능 차이가 매우 크기 때문에 한계가 있다는 것을 의미한다.

그림 6은 최적 파라미터들 중 최적 OPC 위치를 찾기 위하여 광섬유 구간의 분산 계수 편차가 없는 경우의 OPC 위치 편차( $\Delta z$ )에 따른 NRZ와 RZ 채널

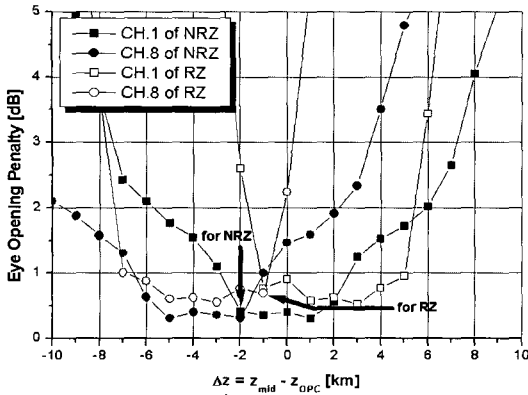
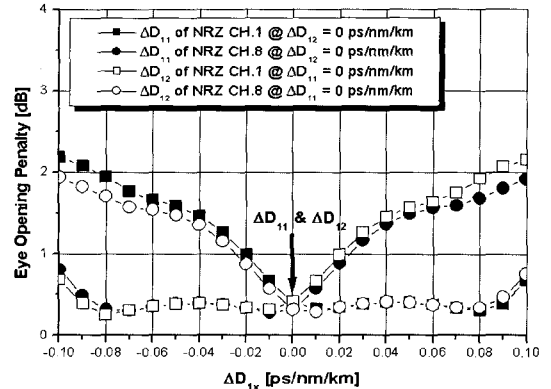


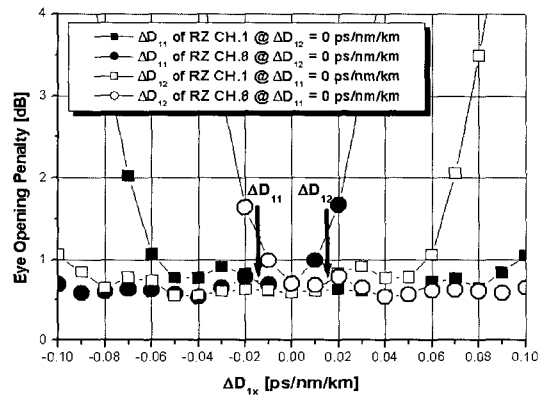
그림 6.  $\Delta D_{11}=\Delta D_{12}=0$  ps/nm/km인 경우  $\Delta z$ 에 따른 눈 열림 페널티  
 Fig. 6. Eye opening penalty as a function of  $\Delta z$  for  $\Delta D_{11}=\Delta D_{12}=0$  ps/nm/km.

1과 8의 EOP를 나타낸 것이다. 그림을 통해 NRZ 전송의 경우 OPC의 위치가 전체 전송로 중간인 500 km에서 498 km로 이동하여야 하고, RZ 전송의 경우에는 499 km로 이동하여야만 두 채널 모두 양호하게 보상될 수 있다는 것을 알 수 있다. 그림 6으로부터 얻어진 값이 유효하기 위해서는 OPC의 위치가 전체 전송로 중간으로부터 이동될 경우 모든 채널들의 최상의 보상을 위한 각 광섬유 분산 계수 값에는 변화가 없어도 되는 것을 살펴보아야 한다.

그림 7은 그림 6의 결과로부터 얻은 최적  $\Delta z$ 에서의 한 쪽 광섬유 구간의 분산 계수 편차( $\Delta D_{1x}$ )가 0 ps/nm/km일 때 나머지 광섬유 구간의 분산 계수 편차에 따른 NRZ와 RZ 채널 1과 8의 EOP를 나타낸 것이다. 가장 눈 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. 즉 RZ 전송의 경우  $\Delta D_{11}=0$  ps/nm/km일 때의 최적  $\Delta D_{12}$  값은 +0.015 ps/nm/km인 반면  $\Delta D_{12}=0$  ps/nm/km일 때의 최적  $\Delta D_{11}$  값은 -0.015 ps/nm/km로 얻어진다. 그리고 NRZ 전송의 경우에는 최적  $\Delta D_{11}$  값과  $\Delta D_{12}$  값 모두 0 ps/nm/km로 얻어졌다. 즉 NRZ 전송의 경우 최적  $\Delta z$ 에서의 WDM 채널들



(a) NRZ @  $\Delta z = -2$  km

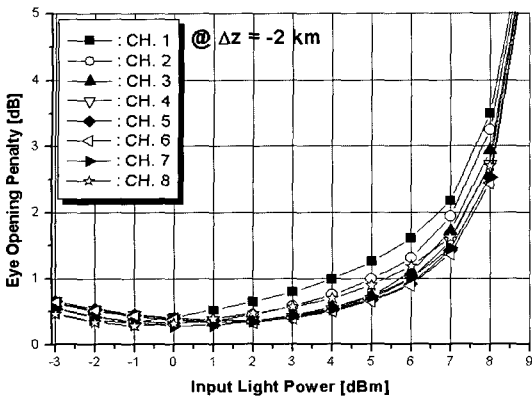


(b) RZ @  $\Delta z = -1$  km

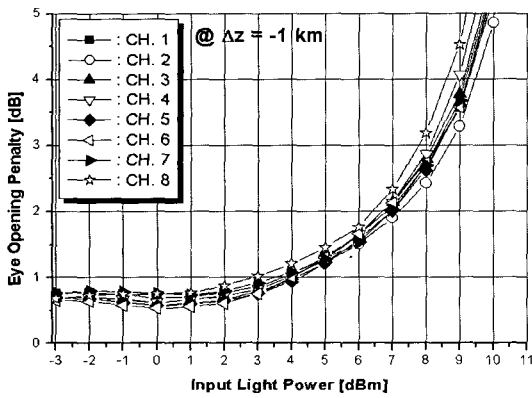
그림 7. OPC가 최적  $\Delta z$ 에 위치하는 경우  $\Delta D_{1x}$ 에 따른 눈 열림 페널티  
 Fig. 7. Eye opening penalty as a function of  $\Delta D_{1x}$  when the OPC placed at the optimal  $\Delta z$ .

의 양호한 전송을 위한 두 광섬유 구간의 분산 계수 차이는 없어야 하는 반면 RZ 전송의 경우에는 두 번째 광섬유 구간의 분산 계수는 첫 번째 광섬유 구간의 분산 계수보다 0.015 ps/nm/km 만큼 커야 한다는 것을 알 수 있다.

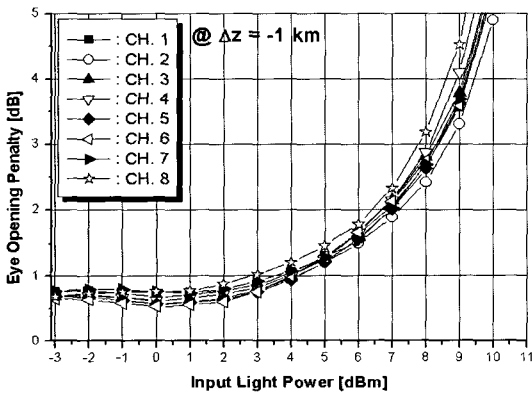
그림 8은 그림 6과 7의 결과가 실제 WDM 시스템에 미치는 영향을 알아보기 위하여 최적 파라미터들이 적용된 WDM 시스템에서의 전체 채널에 대한 입사 광 전력에 따른 EOP 특성을 나타낸 것이다. 그림 6과 7로부터 얻은 최적 파라미터들이 WDM 시스템에 적용되면 MSS(그림 5의 경우)에 비해 NRZ와 RZ 전송 모두에서 모든 채널들의 보상 정도가 거의 비슷한 정도로 개선되는 것을 알 수 있다. 즉 MSS에 비해 전력 페널티가 NRZ 전송의 경우 6 dB에서



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



(b) RZ @  $\Delta D_{11}=0$  ps/nm/km,  $\Delta D_{12}=0.015$  ps/nm/km



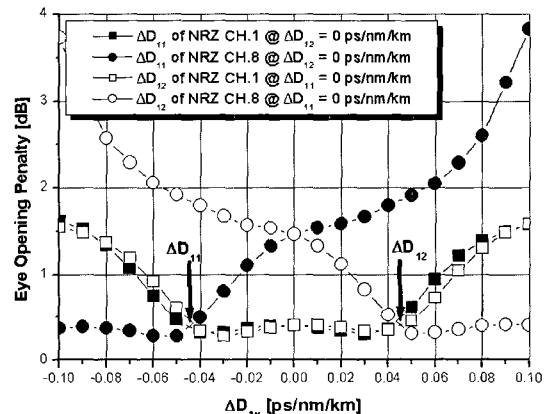
(c) RZ @  $\Delta D_{11}=-0.015$  ps/nm/km,  $\Delta D_{12}=0$  ps/nm/km

그림 8. 최적 파라미터들이 채택된 WDM 시스템에서 입사 광 전력에 따른 눈 열림 패널티  
Fig. 8. Eye opening penalty as a function of the launched light power in WDM system with the optimal parameters.

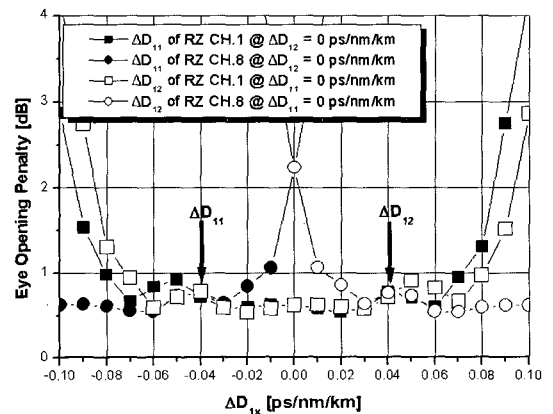
2 dB 정도로, RZ 전송의 경우 6 dB 이상에서 1 dB 정도로 감소되는 것을 확인할 수 있다. 또한 최적 파

라미터들로 인한 보상 정도 개선 효과는 NRZ보다 RZ 전송에서 더욱 크게 얻어진다.

최적 파라미터들을 구하는데 있어 그림 6과 7은 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 9는  $\Delta z=0$  km라고 가정한 경우 한 쪽 광섬유의  $\Delta D_{1x}$ 가 0 ps/nm/km일 때 나머지 광섬유의 분산 계수 편차에 따른 NRZ와 RZ 채널 1과 8의 EOP를 나타낸 것이다. 그림 7과 마찬가지로 각 채널별  $\Delta D_{11}$ 과  $\Delta D_{12}$ 에 대한 EOP 특성이 서로 대칭적으로 나타났다. 즉 NRZ 전송의 경우  $\Delta D_{11}=0$  ps/nm/km 일 때의 최적  $\Delta D_{12}$  값은  $+0.045$  ps/nm/km인 반면



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



(b) RZ @  $\Delta z=0$  km

그림 9.  $\Delta z=0$  km라고 가정한 경우  $\Delta D_{1x}$ 에 따른 눈 열림 패널티

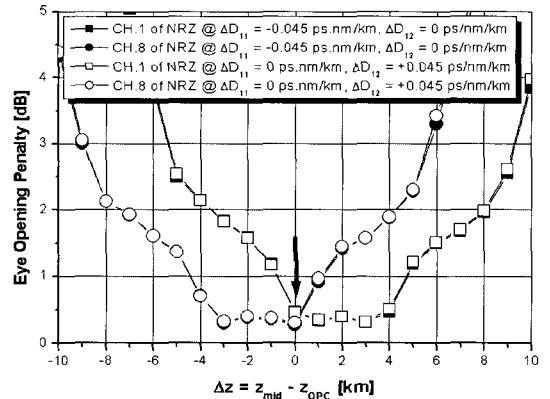
Fig. 9. Eye opening penalty as a function of  $\Delta D_{1x}$  in the case of assuming  $\Delta z=0$  km.

$\Delta D_{12}=0$  ps/nm/km일 때의 최적  $\Delta D_{11}$  값은  $-0.045$  ps/nm/km임을 알 수 있다. 그리고 RZ 전송의 경우  $\Delta D_{11}=0$  ps/nm/km일 때의 최적  $\Delta D_{12}$  값은  $+0.04$  ps/nm/km인 반면  $\Delta D_{12}=0$  ps/nm/km일 때의 최적  $\Delta D_{11}$  값은  $-0.04$  ps/nm/km임을 알 수 있다. 그림 7과 다른 결과 값이 나오는 것은 최적 파라미터들을 구하는 순서에 따라 전체로 한  $\Delta z$  값이 그림 7과 달라졌기 때문이다. 이러한 사실은  $\Delta z$ 과  $\Delta D_{1x}$ 이 서로 연관되어 있다는 것을 의미한다. 즉  $\Delta z$  값에 따라 최적  $\Delta D_{1x}$  값이 바뀌어야 한다는 것을 의미한다.

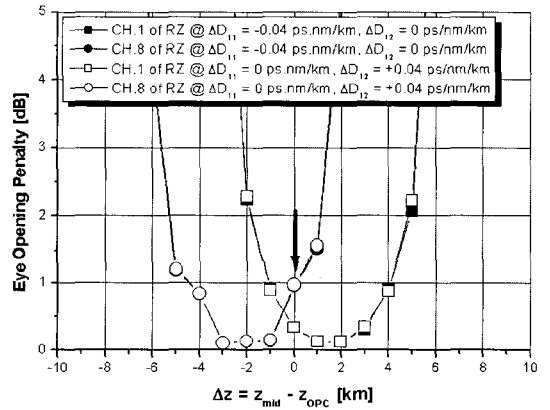
그림 10은 그림 9의 결과로부터 얻은  $\Delta D_{1x}$ 에서의  $\Delta z$ 에 따른 NRZ와 RZ 채널 1과 8의 EOP를 나타낸 것이다. 그림 9의 결과가 타당성을 얻으려면  $\Delta D_{11}$ 와  $\Delta D_{12}$ 의 차이가 그림 9의 결과에 따라 설정된 경우  $\Delta z$ 의 변화에 따른 각 채널의 EOP 특성(즉 예를 들어,  $\Delta D_{11}=0$  ps/nm/km이고  $\Delta D_{12}=+0.045$  ps/nm/km인 경우의 NRZ 채널 1의 EOP 특성과  $\Delta D_{11}=-0.045$  ps/nm/km이고  $\Delta D_{12}=0$  ps/nm/km인 경우의 NRZ 채널 1의 EOP 특성)이 일치하게 나타나야 하고, NRZ 전송의 경우 최적  $\Delta z$ 는 그림 9의 전제이었던 0 km이어야 하는데 이러한 결과가 모든 경우에 대해서 나타나는 것을 그림 10을 통해 확인할 수 있다. 즉 그림 9와 10의 결과를 정리하면, 우선 NRZ 전송에서 OPC의 위치 변동이 없는 경우 모든 채널의 최적 보상을 위해서는 두 광섬유 구간의 분산 계수 차이가 0.045 ps/nm/km를 유지해야 하고, RZ 전송의 경우 0.04 ps/nm/km를 유지해야 한다.

그림 11은 그림 9와 10의 결과에서 얻어진 최적 파라미터들이 적용된 WDM 시스템에서의 전체 채널에 대한 입사 광 전력에 따른 EOP 특성을 나타낸 것이다. 이와 반대의 절차로 구해진 최적 파라미터들이 적용된 WDM 전체 채널들의 EOP 특성을 나타낸 그림 8의 결과들과 매우 동일하게 얻어지는 것을 알 수 있다. 즉 최적 파라미터를 구하는 순서가 바뀌게 되면 구체적인 값들에서는 차이가 있지만 최적 파라미터 값들이 적용된 WDM 시스템에서의 전체 채널의 보상 특성에는 큰 영향이 없음을 확인할 수 있다.

본 논문에서 제안한 방법으로 WDM 전송 시스템을 구현하는 경우 우선 광 전송로로는 FWM과 XPM에 의한 채널 간 간섭과 누화의 영향을 최소로 해결 수 있는 사용 파장대에서 분산 계수가 비교적 큰



(a) NRZ



(b) RZ

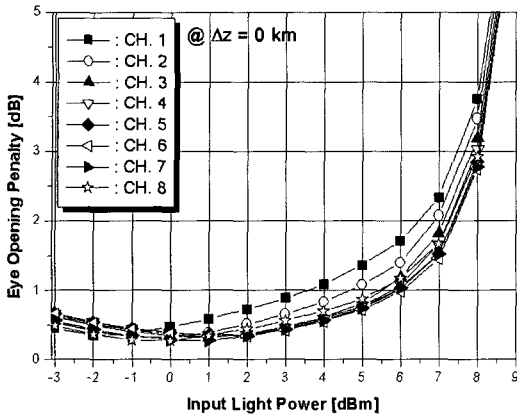
그림 10.  $\Delta D_{1x}$ 에서  $\Delta z$ 에 따른 눈 열림 페널티  
Fig. 10. Eye opening penalty as a function of  $\Delta z$  for  $\Delta D_{1x}$ .

NZ-DSF를 사용해야 하고, 색 분산과 SPM에 의한 왜곡을 보상하기 위해 OPC를 이용한다면 채널 파장을 고려한 최적 위치와 두 NZ-DSF 구간의 최적 분산 계수를 도출하여 WDM 시스템에 적용해야 한다는 것을 지금까지 얻은 결과들로부터 확인할 수 있었다.

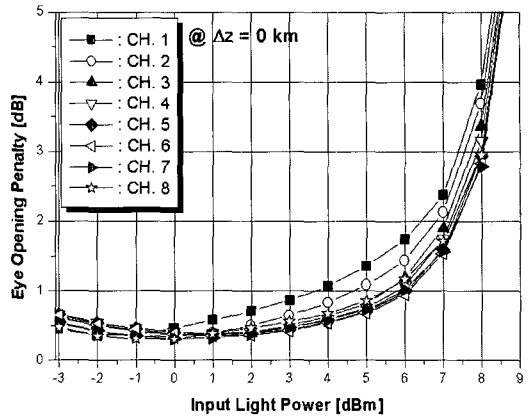
#### IV. 결 론

지금까지 OPC를 중심으로 광 전력 분포와 분산량을 대칭으로 만드는 방법을 대체할 수 있는 수치적 방법을 광 전송로로 NZ-DSF를 이용한 WDM 시스템에 NRZ 형식 또는 RZ 형식을 전송하는 경우로 나누어 살펴보았다. 우선 OPC를 이용한 WDM 시스템을 통해 고속 채널 모두를 양호한 품질로 장거리 전송하고자 한다면 OPC의 위치와 광섬유의 분산 계

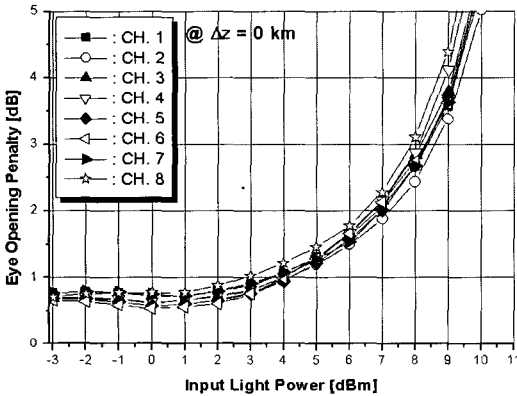




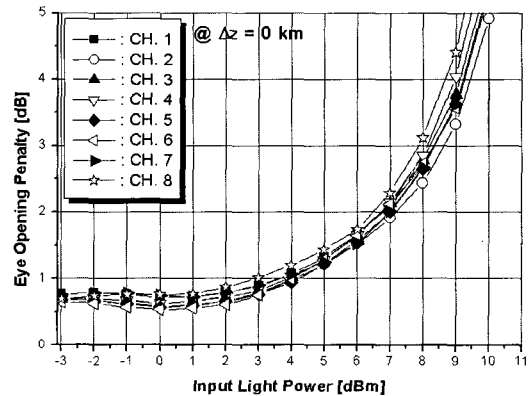
(a) NRZ @  $\Delta D_{11} = -0.045$  ps/nm/km,  $\Delta D_{12} = 0$  ps/nm/km



(b) NRZ @  $\Delta D_{11} = 0$  ps/nm/km,  $\Delta D_{12} = +0.045$  ps/nm/km



(c) RZ @  $\Delta D_{11} = -0.04$  ps/nm/km,  $\Delta D_{12} = 0$  ps/nm/km



(d) NRZ @  $\Delta D_{11} = 0$  ps/nm/km,  $\Delta D_{12} = +0.04$  ps/nm/km

그림 11. 최적 파라미터들이 채택된 WDM 시스템에서 입사 광 전력에 따른 눈 열림 패널티

Fig. 11. Eye opening penalty as a function of the launched light power in WDM system with the optimal parameters.

수가 변조 파형 형식에 따라 최적 값으로 설정되어야 한다는 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 바탕으로 한다면, 예를 들어 1,000 km의 NRZ 전송에서 모든 채널들을 양호한 품질로 전송하고자 한다면 OPC의 위치에 변동이 없는 경우 두 번째 광섬유 구간의 분산 계수는 첫 번째 광섬유 구간의 분산 계수보다 0.045 ps/nm/km만큼 커야 하는 반면 OPC의 위치가 송신단 쪽으로 2 km만큼 가까워져야 하는 경우 두 번째 광섬유 구간의 분산 계수는 첫 번째 광섬유 구간의 분산 계수와 같아야 한다. 이러한 결과를 확장하면 NRZ 전

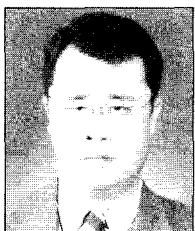
송에서 OPC 위치 편차 1 km당 두 광섬유 구간의 분산 계수 차가  $\pm 0.0225$  ps/nm/km로 변화기만 하면 모든 채널들을 양호하게 보상할 수 있을 것으로 예상된다. 또한 RZ 전송에서는 OPC 위치 편차 1 km당 두 광섬유 구간의 분산 계수 차가  $\pm 0.04$  ps/nm/km로 변해야 한다. 본 논문에서는 이러한 사실까지는 확인하지 못했다. 따라서 앞으로의 연구에서는 본 논문에서 얻은 최적 파라미터 값들의 유효성을 확인해 보기 위하여 OPC 위치 편차 당 두 광섬유 구간의 분산 계수 차를 다양한 경우에 대해 정량화할 것이다.

### 참고 문헌

[1] 조호성, "반도체 광 증폭기의 기술현황", 주간기술동향 통권 833호, 한국전자통신연구원, 1998년.

- [2] K. E. Stubkjaer et al., "Wavelength converter technology", *IEICE Trans. Commun.*, vol. E82-B, no. 2, p. 390, 1999.
- [3] 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.
- [4] ITU Recommendation, "Characteristics of a non-zero dispersion shifted single-mode optical fibre cable", G.655, 2003.
- [5] A. R. Chraplyvy, "Limitations on lightwave communications imposed by optical-fiber nonlinearities", *J. Lightwave Technol.*, vol. 8, no. 10, pp. 1548-1557, 1990.
- [6] S. Watanabe, 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.
- [7] C. Lorattanasane, 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.
- [8] 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 non-linear fiber four-wave mixing", *ECOC '97 Conf.*, pp. 1-4, 1997.
- [9] 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.
- [10] 이성렬, 권순녀, 이윤현, "광 펄스 왜곡 보상을 위해 Mid-Span Spectral Inversion 기법을 채택한 120 Gbps WDM 시스템에서 채널 간 상호 위상 변조 현상의 영향", *한국전자과학회논문지*, 14 (7), pp. 741-749, 2003년 7월.
- [11] 이성렬, 김지웅, 손성찬, "320 Gbps 강도 변조 직접 검파 WDM 시스템의 채널 보상에서 상호 위상 변조의 영향", *한국해양정보통신학회논문지*, 8(6), pp. 1234-1242, 2004년 10월.
- [12] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, 2001.
- [13] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [14] M. Wu, W. I. way, "Fiber nonlinearity limitations in ultra-dense WDM systems", *J. Lightwave Technol.*, vol. 22, no. 6, pp. 1483-1498, 2004.
- [15] 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.

## 이 성 렬



1990년 2월: 한국항공대학교 항공통신정보공학과 (공학사)

1992년 8월: 한국항공대학교 항공통신정보공학과 (공학석사)

2002년 2월: 한국항공대학교 항공통신정보공학과 (공학박사)

1992년 8월~1994년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 조교

2002년 6월~2004년 2월: (주)에이티엔 기술연구소 연구소장

2004년 3월~현재: 국립목포해양대학교 해양전자통신공학부 조교수

[주 관심분야] 솔리톤 전송 시스템, 광 파장 분할 다중화, 광의 비선형 현상 분석