

WDM 신호의 BER 개선을 위한 OPC의 최적 파라미터에 대한 소광비의 영향

Influence of Extinction Ratio on Optimal Parameters of OPC for Improving BER of WDM Signals

이성렬*, 권순녀**

Seong-Real Lee*, Soon-Nyu Kweon**

요 약

16 × 40 Gb/s WDM 전송 시스템에서 비트 에러율 (BER ; bit error rate)의 효과적인 보상과 융통적 WDM 전송 시스템의 설계를 위한 광 위상 공액기 (OPC ; optical phase conjugator)의 최적 위치 값과 광섬유 구간의 최적 분산 계수 값들을 10 dB와 20 dB의 소광비(ER ; extinction ratio)에 따라 도출하였다. 모든 WDM 채널들의 BER의 효과적인 보상을 위한 최적 파라미터 값들은 기존 연구들에서 살펴보았던 변조 파형 형식, 전송 채널수와 마찬가지로 신호의 소광비에 의존하는 것을 확인하였다. 그리고 최적 파라미터 값들을 이용한 융통적인 WDM 시스템 설계가 ER이 10 dB인 경우보다 ER이 20 dB인 경우가 더욱 유리한 것을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we numerically induced the optimal values of optical phase conjugator (OPC) position and dispersion coefficients of fiber sections, which can improve the bit error rate (BER) and design the adaptive WDM transmission system, as a function of the extinction ratio (ER) of 10 dB and 20 dB in 16 × 40 Gb/s WDM transmission system. It is confirmed that these optimal parameter values for effectively compensating overall WDM channels are dependence on the extinction ratio of signals as well as modulation format, transmitted channel numbers, which were investigated in previous researches. It is also confirmed that ER of 20 dB has the advantage of designing flexible WDM systems using optimal parameters than ER of 10 dB.

Key words : extinction ratio, BER, optical phase conjugator, OPC position offset, dispersion offset, Q-factor

I. 서 론

광섬유의 분산 맵 (dispersion map)을 최적화하는 기술은 고속 WDM 전송 시스템에서 전송 성능을 향상시킬 수 있는 가장 대표적인 기술이다 [1], [2]. 그러나 분산의 매핑이 전체 전송 거리, 증폭기 간 거리, 전송 채널 수, 채널 간격, 채널 전송률 등에 의존한다

는 단점이 있다. 이 분산 매핑 기술에 필적할만한 기술로 MSSI (mid-span spectral inversion)이 있다. MSSI 기술은 시스템의 전체 전송 거리 중간에 광 위상 공액기 (OPC ; optical phase conjugator)를 두어 송신기부터 OPC까지의 첫 번째 광섬유 구간에서 발생한 비선형 효과 (Kerr nonlinearity)와 색 분산 (chromatic dispersion) 효과에 의한 광 신호의 왜곡을 OPC를 통

* 목포해양대학교 해양전자통신공학부 (Div. of Marine Electro. & Comm. Eng., Mokpo National Maritime University)

** 한국재활복지대학 컴퓨터게임개발과 (Dept. of Computer Game Design, Korean National College of Rehabilitation & Welfare)

· 제1저자 (First Author) : 이성렬

· 접수일자 : 2007년 7월 20일

해 공액 변환(phase conjugate)하여 수신기까지의 두 번째 광섬유 구간으로 전파시키면 이 구간에서 발생한 색 분산과 비선형 효과에 의한 왜곡에 의해 상쇄시키는 원리를 갖는다[3],[4].

MSSI 기술을 광 전송 시스템에 적용하고자 하는 경우 각 광섬유 구간별로 적절한 분산 매핑을 하지 않아도 된다는 것과 서로 다른 변조 형식과 채널 전송률을 동일한 전송 링크에 적용할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 OPC를 중심으로 광 신호의 전력 분포가 대칭되어야 하는 전제 조건을 가져야 한다 [5]. 불행하게도 실제적인 광 전송 링크에서의 증계 간격마다의 증폭과 손실 때문에 이 조건을 만족시키기 어렵고, 특히 WDM 전송에서 이 조건을 모든 채널 파장에 대해 만족시키는 것은 거의 불가능하다.

고려하는 WDM 전 대역에 대한 광 전력 분포를 대칭화시켜야 하는 전제 조건을 대체하는 효과로써 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 적용 할 수 있는 기술을 지난 연구를 통해 제안하였다[6].

광통신 시스템의 전송 성능을 좌우할 수 있는 요소로 가장 중요한 것은 앞서 언급한 색 분산과 비선형 효과의 본질적인 것 외에 광 펄스의 변조 파형 형식, 초기 주파수 쉐(chirp), 광 펄스의 소광비 (ER ; extinction ratio) 등의 시스템 파라미터이다. 여기서 ER은 광 변조기에서 발생하는 광 펄스 '0'에 대한 '1'의 전력비로, 이상적인 경우 30 dB 이상이 되어야한다. 그러나 광 신호의 비트율이 40 Gbps 이상이 되면 실제 사용되고 있는 광 변조기에서 발생하는 광 펄스의 ER은 10 dB 이하로 얻어지고 있다. 하지만 광 소자 기술의 반전으로 ER이 점차 증가하고 있는 실정

이다.

앞선 논문에서 제안한 방법이 실제 WDM 시스템에 유효해지려면 ER에 따른 분석도 이루어져야 한다. 특히 현실적 소광비 값인 10 dB와 가까운 근래에 구현되리라고 예상되는 20 dB의 ER에서의 분석은 실용적인 면에서 의미가 있다고 판단된다. [6]을 통해 지난 연구에서 최적 파라미터들과 ER의 관계를 살펴보았으나, [6]에서는 WDM 채널들의 송신 전력이 0 dBm 이상인 큰 신호의 성능 평가를 위한 눈 열림 패널티 (EOP; eye opening penalty) 분석이었다. 그러나 일반적으로 시스템의 전력 마진 (power margin) 설계를 위해서는 소신호에 대한 분석인 비트 에러율 (BER; bit error rate)의 분석도 이루어져야 한다. 또한 색 분산과 비선형 현상은 입사 전력에 따라 광 신호에 매우 다른 특징으로 영향을 미칠 수 있기 때문에 이에 대한 분석이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 선행 연구에서와 같은 방법으로 도출되는 최적 파라미터 값들을 ER이 10 dB, 20 dB인 WDM 채널 신호에 대한 비트 에러율 (BER; Bit Error Rate)과 Q-factor의 성능 지표를 사용하여 살펴보려고 한다. 본 논문에서 가정한 WDM 전송 시스템의 모든 파라미터들 - 예를 들어 비 영 분산 천이 광섬유 (NZ-DSF non zero -DSF) -은 참고 문헌 [6]과 동일하게 하였다.

II. 시스템 구성과 해석 모델링

그림 1은 채널 비트율이 40 Gbps인 16-채널 강도 변조 직접 검파(IM/DD: intensity modulation / direct detection) 방식의 WDM 전송 시스템의 전체적인 구조를 나타낸 것이다. WDM 시스템의 j번째 신호파의 포락선 A_j 는 아래 방정식을 따라 전파한다[7].

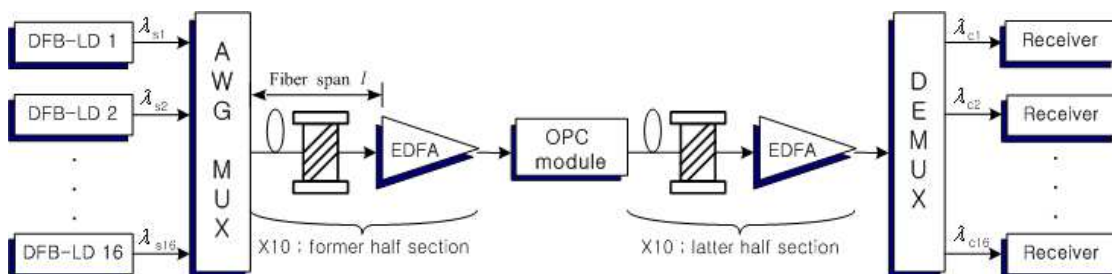


그림 1. WDM 전송 시스템의 구조

Fig. 1. Configuration of WDM transmission system.

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

여기서 $j, k=1, 2, \dots, 16$, A_j 는 WDM의 j -번째 채널의 포락선, α 는 광섬유의 손실 계수, β_{2j} 는 색 분산 파라미터, β_{3j} 는 3차 색 분산 파라미터, $\gamma_j = (2\pi n_2 / A_{eff} \lambda_j)$ 는 비선형 계수, n_2 는 비선형 굴절 계수, A_{eff} 는 광섬유의 유효 코어 영역, λ_j 는 j -번째 채널의 신호 파장, $T = t - z/v_j$ 이다. 식 (1) 우변의 마지막 두 항은 각각 비선형 효과 중 자기 위상 변조 (SPM ; self phase modulation)와 상호 위상 변조 (XPM ; cross phase modulation)를 유도한다.

그림 1은 OPC를 갖는 WDM 시스템의 전체 구성을 나타낸 것이다. WDM 송신기는 1550.0 nm부터 100 GHz 간격으로 1562.0 nm까지의 파장을 갖는 분포 궤환 레이저들 (distributed feedback lasers)로 구성된다. 각 채널들은 서로 독립적으로 40 Gbps의 128 PRBS (pseudo random bit sequence)에 의해 변조된다. 변조 파형의 형식은 식 (2)에 의해 정의되는 2차 수퍼가우시안 형태의 NRZ로 가정하였다[7].

$$A(0, t) = \sqrt{P_0} \left[-\frac{(1+iC)}{2} \left(\frac{t}{t_0} \right)^{2m} \right] \quad (2)$$

여기서 C 는 초기 주파수 쉐어 파라미터로 본 논문에서는 이 값을 0(chirp-free)으로 가정하였고, NRZ 펄스의 ER을 10 dB, 20 dB의 두 가지 경우로 가정하였다.

6개의 채널들은 배열 도파로 격자 다중화 장치 (arrayed-waveguide grating multiplexer)에서 다중화되어 전송 링크로 보내어진다. 전체 전송 링크는 OPC를 중심으로 두 개의 광섬유 구간 (fiber section)으로 나누어진다. 각 광섬유 구간은 50 km 간격의 10개의 EDFA (erbium-doped fiber amplifier)로 연결된다. EDFA를 연결하는 광섬유는 $\alpha=0.2$ dB/km, 분산 계수 $D_{1x} = 3.5$ ps/nm/km ($x=1, 2$, 여기서 1, 2는 첫 번째와 두 번째 광섬유 구간을 의미), $A_{eff} = 72 \mu\text{m}^2$, $n_2 = 2.5 \times 10^{-20}$ m²/W와 1,550 nm에서 $\gamma_1 = 1.41$ W⁻¹km⁻¹로 모델링된 NZ-DSF로 가정하였다.

전체 전송 링크의 중간에 위치한 OPC의 손실 계수는 0.61 dB/km, 비선형 계수는 20.4 W⁻¹km⁻¹, 분산

기울기는 0.32 ps/nm²/km, 영(zero) 분산 파장은 1,550 nm로 모델링하였고, OPC의 펌프 광은 1549.5 nm 파장의 18.5 dBm의 전력으로 모델링하였다. 16개 신호 파들은 OPC에 의해 1537.5~1549.5 nm의 파장을 갖는 공액파들로 변환된다. OPC의 변환 효율의 3-dB 대역폭은 1526~1574 nm으로 얻어진다[6]. 따라서 16개의 신호 파장과 이들의 공액파 파장 모두는 변환 효율의 3-dB 대역폭 안에 포함된다.

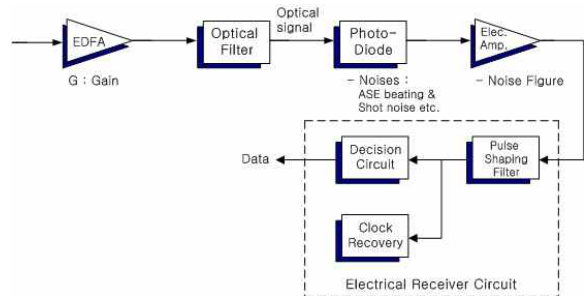


그림 2. 직접 검파 수신기의 구조
Fig. 2. Configuration of direct detection receiver.

그림 1에서 수신기는 그림 2의 직접 검파 방식 (direct detection)의 수신기로, 여기서 EDFA는 5 dB 잡음 지수를 갖도록 모델링하였다[8].

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

$$H(\omega) = [1 / \{1 + 2 / B_o(\omega - \omega_0)\}] \quad (3)$$

와 같은 주파수 차원에서의 전달 함수를 갖는 로렌치안(Lorentzian) 필터로 모델링하여 시뮬레이션 하였다. 여기서 B_o 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 아래의 전달 함수를 갖는 버터워스(Butterworth) 필터를 사용하여 시뮬레이션 하였다[9].

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

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

III. 최적 파라미터의 도출과 성능 지표

Watanabe와 Shirasaki에 의하면 MSSI에서 특정 위치에서 분산과 비선형성이 동일한 비율로 형성되면 완벽한 보상을 얻을 수 있다 [10]. 그러나 WDM 전송 시스템에서는 채널들의 파장이 다양하기 때문에 모든 파장에 적용 가능한 공통의 OPC 위치와 광섬유 구간의 분산 계수 값들을 찾는 것이 쉽지 않다. 모든 채널들을 효과적으로 보상할 수 있는 최적의 OPC 위치와 광섬유 구간의 분산 계수를 지난 연구에서 제안한 방법으로 따라 ER이 다르게 설정된 WDM 신호에 대해 도출한다.

최적 OPC 위치는 OPC 위치 오프셋 $\Delta z (=z_{OPC} - z_{mid})$ 에 따른 두 채널 사이의 파장 차이가 가장 큰 채널 1과 16의 BER과 Q-factor를 비교 분석하여 찾는다. 여기서 z_{OPC} 는 OPC 위치이고, z_{mid} 는 전체 전송 링크의 중간 위치이다.

BER 계산은 참고 문헌 [11]에 따라 아래의 식을 가지고 이루어진다.

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

여기서 $I_{s,av}$ 는 시간 평균 신호 광 전력 (time-averaged signal photo currents)이고, c_{ISI}^+ 와 c_{ISI}^- 는 각각 신호 '1'과 '0'에서의 눈 닫힘 (eye closures) 값, σ_1 와 σ_0 는 각각 산탄 잡음, 신호-자연방출 비트 잡음 (signal-spontaneous beat noise), 자연방출-자연방출 비트 잡음, 열 잡음 등을 포함한 전체 잡음의 마크와 스페이스 신호에 대한 표준 편차이다. 또한 Q-factor는 식 (3)의 BER을 이용하여 아래 식으로부터 계산된다[12].

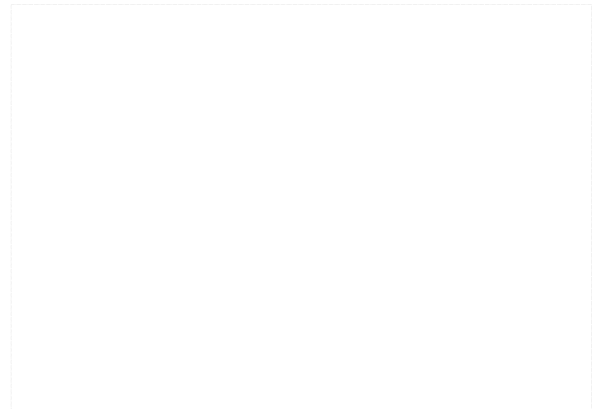
$$Q\text{-factor}[dB] = 20 \log(\sqrt{2} \operatorname{erfc}^{-1}(2 \times BER)) \quad (5)$$

10^{-12} 의 BER은 16.9 dB의 Q-factor에 상응하고, 이들 값들은 모두 수신단에서 전진 에러 정정 (FEC ;

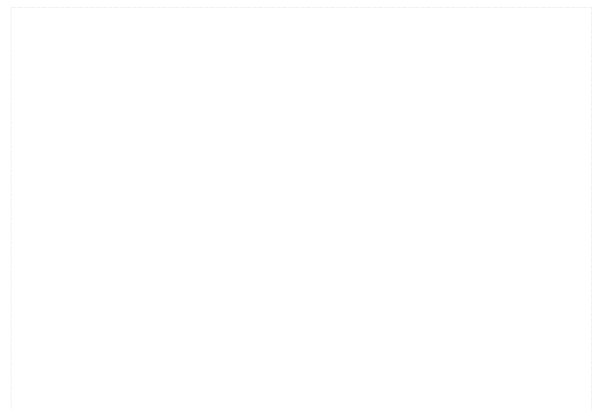
forward error correction) 처리 후 무에러 전송이 가능한 값이다 [13].

첫 번째 광섬유 구간의 최적 분산 계수 값은 두 번째 구간의 분산 계수 값 D_{12} 을 3.5 ps/nm/km로 고정시키고 분산 계수 오프셋은 $\Delta D_{11} = D_{11} - D_{12}$ 에 따른 대해 BER과 Q-factor를 비교 분석해서 찾고, 마찬가지로 두 번째 광섬유 구간의 최적 분산 계수 값은 첫 번째 구간의 분산 계수 값 D_{11} 을 3.5 ps/nm/km로 고정시키고 분산 계수 오프셋은 $\Delta D_{12} = D_{12} - D_{11}$ 에 따른 대해 BER과 Q-factor를 비교 분석해서 찾는다.

IV. 시뮬레이션 결과 및 검토



(a) ER = 10 dB

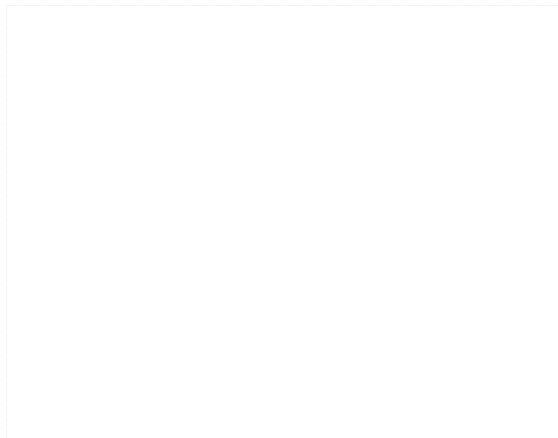


(b) ER = 20 dB

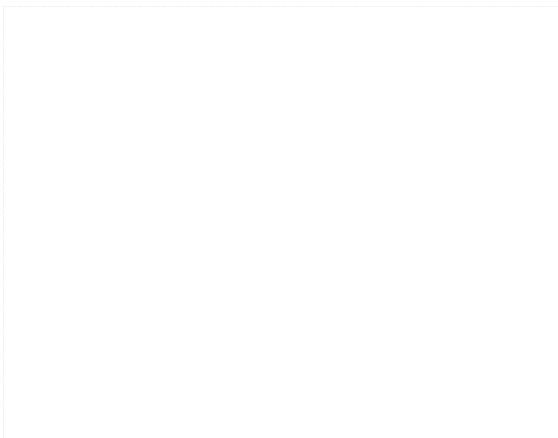
그림 3. MSSI 기술이 적용된 WDM 시스템에서 입사 전력에 따른 BER 특성

Fig. 3. BER characteristics as a function of the launching power in WDM system with MSSI.

그림 3은 소광비가 각각 10 dB, 20 dB인 16 채널 WDM 시스템에 전통적 MSSI 기술이 적용된 경우 수신 광 전력에 따른 전체 채널들의 BER 특성을 나타낸 것이다. 그림 3에서 10-12 BER을 수신 성능의 기준으로 한다면 WDM 채널 신호가 10 dB와 20 dB의 소광비를 갖는 경우 채널 간 전력 패널티가 각각 7 dB와 1.2 dB 이상이 되어 MSSI 기술의 직접 적용을 통해서 모든 채널의 양호한 전송이 어려운 것을 확인할 수 있다. 즉 MSSI 기술을 WDM 시스템에 그대로 적용하여 모든 채널에 대해 수신 성능을 개선하는 것에는 앞서 언급한 본질적인 비대칭성에 의해 한계가 있는 것을 확인할 수 있다.



(a) dependence on the Δz in the cases of $D_{11} = D_{12} = 3.5$ ps/nm/km



(b) dependence on ΔD_{1x} when the OPC placed at the optimal Δz , which is obtained from Fig. (a)

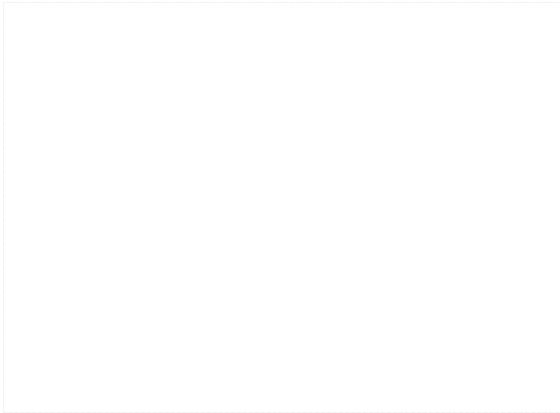
그림 4. 채널 1과 16의 Q-factor 차이

Fig. 4. Q-factor difference between channel 1 and 16.

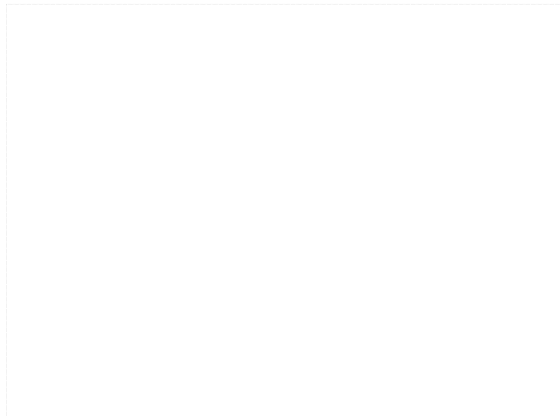
그림 4(a)는 두 광섬유 구간의 분산 계수가 모두 3.5 ps/nm/km로 고정되었을 때 OPC 위치 오프셋 Δz 에 따른 소광비가 10 dB인 경우와 20 dB인 경우에서 각각 -17.5 dBm와 -22.5 dBm의 입사 전력 (launching light power)을 갖는 채널 1과 16 사이의 Q-factor 차이를 나타낸 것이다. 채널 1과 16 사이의 Q-factor 차이를 최소로 하는 최적 OPC 위치는 소광비가 10 dB인 경우 496 km ($\Delta z = -4$ km), 소광비가 20 dB인 경우 495 km ($\Delta z = -5$ km)인 것을 그림 4(a)를 통해 알 수 있다.

그림 4(b)는 그림 4(a)에서 구한 결과에 따라 소광비가 10 dB인 경우 496 km에 OPC가 위치하고 소광비가 20 dB인 경우 495 km에 OPC가 위치했을 때 분산 계수 오프셋 ΔD_{1x} ($x=1,2$)에 따른 동일한 입사 전력의 채널 1과 16 사이의 Q-factor 차이를 나타낸 것이다. 우선 두 번째 광섬유 구간의 분산 계수가 3.5 ps/nm/km로 고정된 경우에서 채널 1과 16 사이의 Q-factor 차이를 최소로 하는 첫 번째 광섬유 구간의 최적 분산 계수 오프셋은 소광비가 10 dB인 경우 +0.005 ps/nm/km로, 소광비가 20 dB인 경우 -0.005 ps/nm/km로 얻어졌다. 반면 첫 번째 광섬유 구간의 분산 계수가 3.5 ps/nm/km로 고정된 경우에서 두 번째 광섬유 구간의 최적 분산 계수 오프셋은 앞선 경우와는 달리 분산 계수를 고정한 광섬유 구간을 바꾸었기 때문에 소광비가 10 dB인 경우 -0.005 ps/nm/km로, 소광비가 20 dB인 경우 +0.005 ps/nm/km로 얻어졌다.

그림 4의 결과를 종합해 보면, 소광비가 10 dB인 경우에서 모든 채널들을 최상으로 보상할 수 있는 OPC의 위치는 496 km이고, OPC가 이 위치에 존재할 때 두 번째 광섬유 구간의 분산 계수는 첫 번째 광섬유 구간의 분산 계수보다 0.005 ps/nm/km만큼 커야 한다. 물론 두 번째 광섬유 구간의 분산 계수보다 첫 번째 광섬유 구간의 분산 계수가 0.005 ps/nm/km만큼 적어도 된다. 반면 소광비가 20 dB인 경우에서 OPC가 495 km에 위치하고 두 번째 광섬유 구간의 분산 계수는 첫 번째 광섬유 구간의 분산 계수보다 0.005 ps/nm/km만큼 작게 설정되면 모든 채널들을 최상으로 보상할 수 있을 것이다.



(a) dependence on the $\Delta D_{1,x}$ in the case of assuming $\Delta z = 0$ km

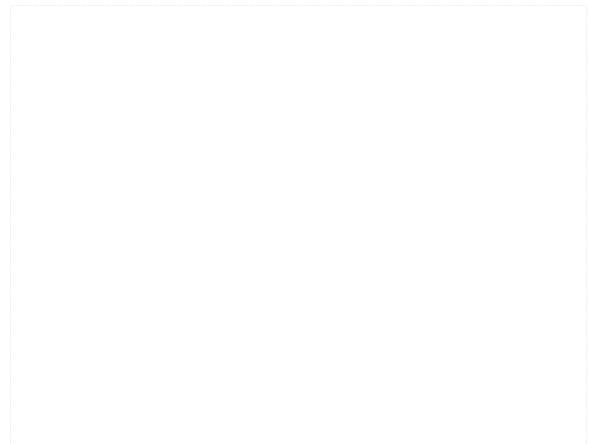


(b) depends on the Δz when dispersion offsets of each fiber sections $D_{1,x}$ are selected to the optimal values, which are obtained from Fig. (a)

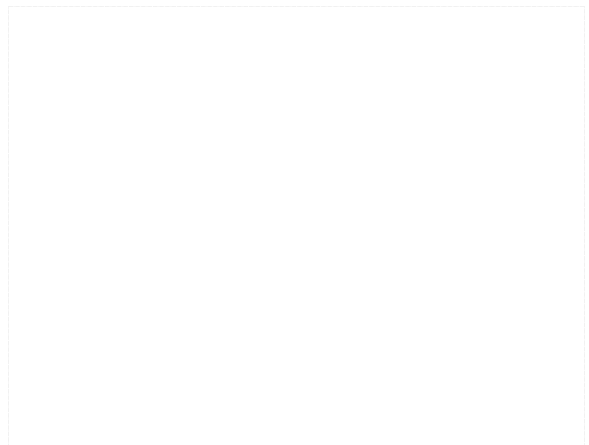
그림 5. 채널 1과 16 사이의 Q-factor 차이
Fig. 5. Q-factor differences between channel 1 and 16.

그림 5는 앞서 구한 최적 파라미터의 상관성을 알아보기 위해 그림 4의 반대 과정으로 살펴본 $\Delta D_{1,x}$ 와 Δz 에 대한 두 채널의 Q-factor 차이이다. 즉 그림 5 (a)는 $\Delta z=0$ km에서 각각 소광비가 10 dB와 20 dB인 경우 한 쪽 광섬유의 $\Delta D_{1,x}$ 가 0 ps/nm/km (즉 $D_{1,x} = 3.5$ ps/nm/km)일 때 나머지 광섬유 구간의 분산 계수 편차에 따른 채널 1과 16 사이의 Q-factor 차이를 나타낸 것으로, 소광비가 10 dB인 경우에서 $\Delta D_{12}=0$ ps/nm/km일 때 채널 1과 16 사이의 Q-factor 차이를 최소로 하는 첫 번째 광섬유 구간의 최적 분산 계수 오프셋은 -0.06 ps/nm/km이고, $\Delta D_{11}=0$ ps/nm/km일 때 두 번째 광섬유 구간의 최적 분산 계수 오프셋은 +0.06 ps/nm/km인 것을 알 수 있다. 반면 소광비가 20

dB인 경우에서 $\Delta D_{12}=0$ ps/nm/km일 때의 첫 번째 광섬유 구간의 최적 분산 계수 오프셋은 -0.065 ps/nm/km이고, $\Delta D_{11}=0$ ps/nm/km일 때의 두 번째 광섬유 구간의 최적 분산 계수 오프셋은 +0.065 ps/nm/km인 것을 알 수 있다. 그림 5(b)는 한 쪽 광섬유 구간의 분산 계수가 그림 5(a)에서 구한 최상의 $\Delta D_{1,x}$ 에 의해 $3.5+\Delta D_{1,x}$ ps/nm/km로 설정되고 나머지 광섬유 구간의 분산 계수가 3.5 ps/nm/km로 고정된 경우의 Δz 에 따른 채널 1과 16 사이의 Q-factor 차이를 소광비별로 나타낸 것으로, 소광비에 관계없이 모든 경우에서 최적 Δz 는 0 km이어야 한다는 것을 알 수 있다 (즉 최적 OPC 위치 = 500 km).



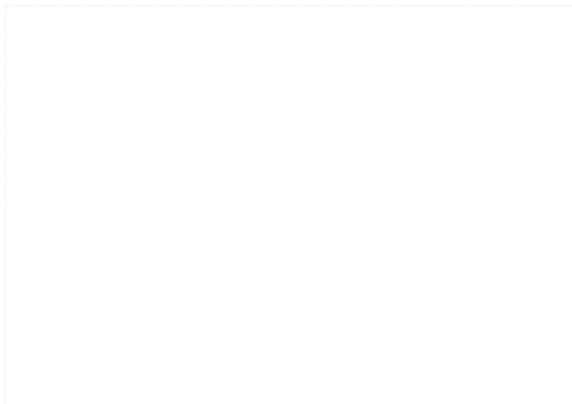
(a) ER = 10 dB @ $P_s = -16.5$ dBm



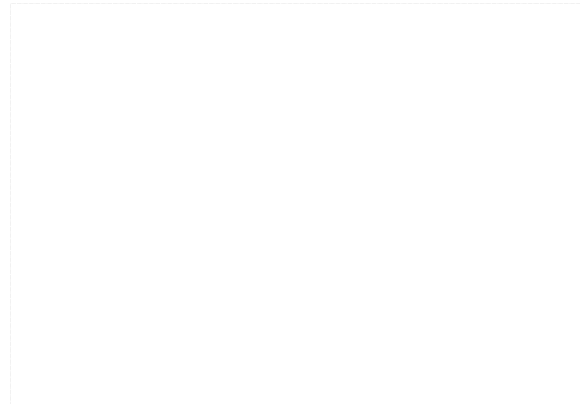
(b) ER = 20 dB @ $P_s = -22.0$ dBm

그림 6. 채널 신호 파장에 따른 Q-factor의 비교.
Fig. 6. The comparison of Q-factor as a function of channel signal wavelengths.

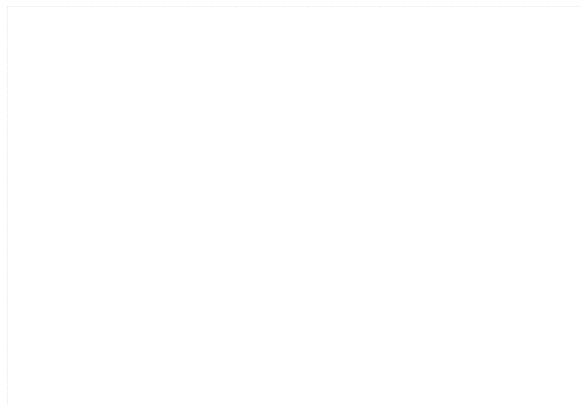
그림 4와 5를 통해 구한 최적 파라미터 값들이 WDM 시스템의 시스템 성능에 미치는 영향을 살펴 볼 필요가 있다. 그림 6은 전통적 MSSSI 기술이 적용된 WDM 시스템과 그림 4와 5에서 구한 최적 파라미터 값들이 적용된 WDM 시스템에서 소광비가 10 dB인 경우 입사 전력이 -16.5 dBm, 소광비가 20 dB인 경우 입사 전력이 -22.0 dBm인 16 개 채널의 신호 파장에 따른 Q-factor를 나타낸 것이다. 우선 전통적 MSSSI 기술이 적용된 WDM 시스템에서 16.9 dB 이상의 Q-factor 값이 나타나는 채널들은 소광비가 10 dB인 경우에는 채널 1부터 채널 11까지 (즉 파장 범위 1550.0~1558.0 nm)이고, 소광비가 20 dB인 경우에는 채널 1부터 채널 13까지 (즉 파장 범위 1550.0~1559.6 nm 파장)이지만 그림 4와 6의 최적 파라미터 값들이 적용된 WDM 시스템에서는 소광비에 상관없이 모든 채널들의 Q-factor 값이 16.9 dB 이상인 것을 확인할 수 있다. 그리고 최적 파라미터 값들이 적용된 경우 이들을 구하는 절차에 관계없이 신호 파장에 대한 Q-factor 값의 편차가 1 dB 이내로 얻어지는 것을 알 수 있다. 그림 6의 결과가 의미하는 것은 우선 OPC를 이용하여 WDM 채널들을 보상하는 기술에서 OPC에 대한 광 신호 전력과 국부 분산량의 대칭이 어려웠기 때문에 발생한 기술적 한계는 본 논문에서 제안한 방법에 의한 최적 파라미터 값들의 도출과 이의 적용으로 해소될 수 있다는 것이다. 또한 이들 최적 파라미터의 구체적인 값들은 그것을 구하는 절차에 따라 달라지지만 전체 채널들의 시스템 성능 향상에 미치는 정도는 매우 동일하다는 것이다.



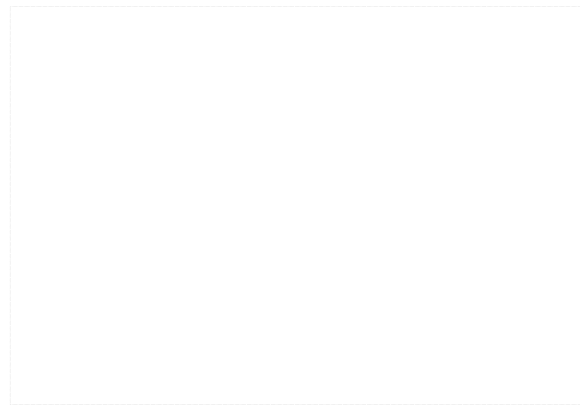
(a) ER = 10 dB ; D_{11} =3.495 & D_{12} =3.5 ps/nm/km



(b) ER = 10 dB ; D_{11} =3.5 & D_{12} =3.56 ps/nm/km



(c) ER = 20 dB ; D_{11} =3.5 & D_{12} =3.495 ps/nm/km



(d) ER = 20 dB ; D_{11} =3.435 & D_{12} =3.5 ps/nm/km

그림 7. 최적 파라미터들이 채택된 WDM 시스템의 BER 특성

Fig. 7. BER characteristics in WDM system with the optimal parameters.

그림 7은 그림 4와 5로부터 얻은 최적 파라미터 값들이 적용된 WDM 시스템에서의 전체 채널의 수신 전력에 따른 BER 특성을 나타낸 것이다. 그림 7(a)와 (b)는 소광비가 10 dB인 WDM 시스템에서의 BER 특성으로 그림 7 (a)는 그림 4에서 얻은 최적 파라미터

값들 중에서 $\Delta z = -4$ km, $D_{11} = D_{1x} + \Delta D_{11} = 3.5 - 0.005$ ps/nm/km = 3.495 ps/nm/km, $D_{12} = D_{1x} = 3.5$ ps/nm/km 가 적용된 경우이고 그림 (b)는 그림 5에서 얻은 최적 파라미터 값들 중에서 $\Delta z = 0$ km, $D_{11} = D_{1x} = 3.5$ ps/nm/km, $D_{12} = D_{1x} + \Delta D_{12} = 3.5 + 0.06$ ps/nm/km = 3.56 ps/nm/km가 적용된 경우이다.

이 두 그림들을 비교해 보면 그림 6의 Q-factor 특성의 결과를 통해 예상할 수 있듯이 각기 다른 절차에 의해 구한 최적 파라미터 값들이 적용되었지만 BER 특성이 서로 일치하고 10-12의 BER에서의 전력 패널티가 모두 약 0.7 dB인 것을 확인할 수 있다.

그림 7(c)와 (d)는 소광비가 20 dB인 WDM 시스템에서의 BER 특성으로 그림 (c)는 그림 4에서 얻은 최적 파라미터 값들이, 그림 (d)는 그림 5에서 얻은 최적 파라미터 값들이 적용된 것으로 BER 특성이 서로 일치하고 10^{-12} 의 BER에서의 전력 패널티가 모두 약 0.35 dB인 것을 확인할 수 있다.

앞서 살펴본 그림 4의 결과는 OPC가 전체 전송 거리의 중간이 아닌 다른 곳에 위치하여야 모든 채널들을 효과적으로 보상할 수 있다는 것을 의미한다. 그러나 이 경우 광섬유 구간들의 최적 분산 계수 값들이 OPC 위치와 관련하여 더불어서 결정되어야 한다. 다행히도 전체 전송 거리의 중간이 아닌 OPC의 다양한 위치에 따른 최적 분산 계수 값들을 본 논문의 결과들로부터 도출할 수 있다. 이를 소광비가 10 dB인 경우에 대해 설명하면 아래와 같다. 그림 4(a)와 (b)로부터 OPC가 496 km에 위치한 경우 첫 번째 광섬유 구간들의 분산 계수가 3.5 ps/nm/km로 고정되어 있으면 두 번째 광섬유 구간들의 최적 분산 계수 오프셋은 +0.005 ps/nm/km이어야 한다. 그리고 그림 5(a)와 (b)로부터 OPC가 500 km에 위치한 경우 첫 번째 광섬유 구간들의 분산 계수가 3.5 ps/nm/km로 고정되어 있으면 두 번째 광섬유 구간들의 최적 분산 계수 오프셋은 +0.06 ps/nm/km이어야 한다. 두 경우

에 대한 WDM 전체 채널의 Q-factor 특성은 그림 6과 8을 통해 거의 일치함을 알 수 있다. 이 두 결과들을 비교해보면 OPC가 496 km에서 500 km로 4 km 이동해야 하는 경우 두 번째 광섬유 분산 계수 오프셋은 +0.055 ps/nm/km 증가해야 한다. 즉 OPC를 수신기 쪽으로 1 km씩 이동시켜 설계하고자 한다면 이에 상응하여 두 번째 광섬유 구간들의 분산 계수를 +0.01375(=(0.06-0.005)/4) ps/nm/km씩 변화를 주어야 WDM 채널에 대해 최적의 보상을 할 수 있다. 물론 OPC를 송신기 쪽으로 1 km씩 이동시키고자 한다면 이에 상응하여 -0.01375(=(0.005-0.06)/4) ps/nm/km씩 변화를 주어야 한다. 즉 만일 첫 번째 광섬유 구간들의 분산 계수를 3.5 ps/nm/km로 고정시키고 OPC를 510 km에 위치시키고자 한다면 두 번째 광섬유 구간들의 분산 계수는 3.56 ps/nm/km (OPC가 500 km에 위치한 경우의 두 번째 광섬유 구간들의 최적 분산 계수)에 0.1375(=0.01375×10) ps/nm/km를 더한 3.6975 ps/nm/km로 설정되어야 한다. 이 값은 3.505 ps/nm/km (OPC가 496 km에 위치한 경우의 두 번째 광섬유 구간들의 최적 분산 계수)에 0.1925(=0.01375×14) ps/nm/km를 더해서 얻을 수도 있다. 위와는 반대로 두 번째 광섬유 구간들의 값을 3.5 ps/nm/km로 고정해 놓고 OPC의 위치를 다양하게 하고자 하는 경우에는 지금까지 언급한 방법에서 부호만 반대로 하면 된다. 즉 OPC를 수신기 쪽으로 1 km씩 이동시켜 설계하고자 한다면 이에 상응하여 첫 번째 광섬유 구간들의 분산 계수는 -0.01375 ps/nm/km씩, 송신기 쪽으로 1 km씩 이동시켜 설계하고자 한다면 이에 상응하여 첫 번째 광섬유 구간들의 분산 계수는 +0.01375 ps/nm/km씩 오프셋을 주어야 한다.

이러한 분석을 소광비가 20 dB인 경우까지 적용하여 구한 OPC 위치 편차(Δz) ± 1 km (여기서 +는 OPC가 500 km에서 수신기 쪽으로 이동되는 것을, -는 송신기 쪽으로 이동되는 것을 의미한다) 당 최적

표 1. OPC 위치 편차 ± 1 km 당 최적 ΔD_{12} 값
Table 1. Optimal ΔD_{12} values per OPC position offset by ± 1 km.

ER	경우 1		경우 2		최상 Δz 의 차이	최상 ΔD_{12} 의 차이	OPC 위치 이동 ± 1 km 당 최적 ΔD_{12} 값
	최상 Δz	최상 ΔD_{12}	최상 Δz	최상 ΔD_{12}			
10 dB	-4	+0.005	0	+0.060	4	0.055	± 0.01375 (=0.055/4)
20 dB	-5	-0.005	0	+0.065	5	0.070	± 0.014 (=0.070/5)

ΔD_{12} 값들을 표 1에 정리해 놓았다. 표 1에서 경우 1의 데이터들은 그림 4로부터 얻은 것들이고, 경우 2의 데이터들은 그림 5로부터 얻은 것들이다.

위에서 유도된 OPC 위치 편차 ± 1 km 당 두 번째 광섬유 구간 of 최적 분산 계수 값을 이용한 WDM 시스템의 융통적 설계를 위해 OPC의 위치 이동 한계 범위를 확인해 볼 필요가 있다.

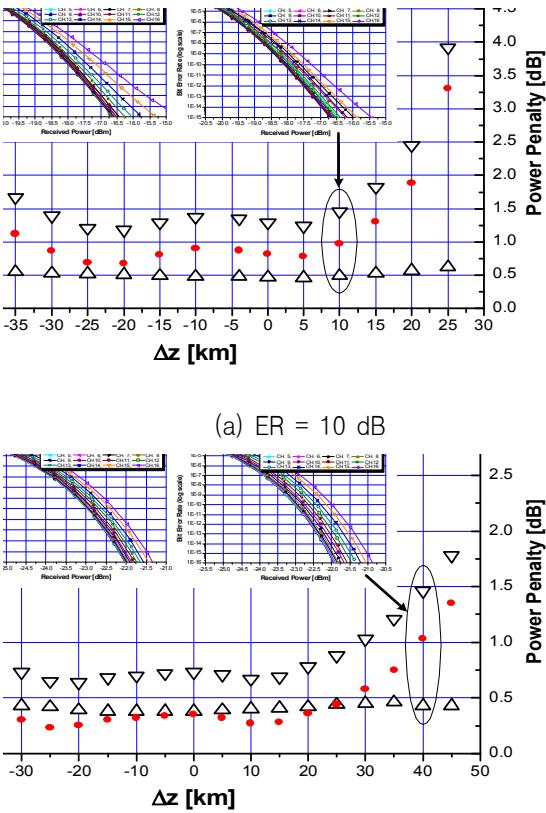


그림 8. 허용 가능한 수신 전력들과 전력 페널티
 Fig. 8. Allowable launching powers and power penalties

그림 8은 D_{11} 가 3.5 ps/nm/km로 고정된 경우 다양한 Δz 에서의 10-12 BER이 되는 채널의 최대 감도와 최소 감도, 그리고 이 두 전력의 차인 전력 페널티를 보인 것이다. 각 그림 안에 삽입된 그림은 특정 OPC 위치에서의 BER 특성 그래프이다. 이 그림은 x-축에 Δz 만 나타냈지만 D_{12} 도 3.5 ps/nm/km로부터 OPC 위치 편차 ± 1 km 당 그림 (a)와 (b)는 각각 ± 0.01375 ps/nm/km와 ± 0.014 ps/nm/km만큼 함께 변동시킨 경

우를 나타낸 것이다. 시스템 설계의 허용 전력 페널티 값을 1 dB로 한다면 OPC 위치의 유효 범위는 소광비가 10 dB인 경우 약 40km (470 km부터 510 km까지), 소광비가 20 dB인 경우 약 65 km (460 km부터 525 km까지)인 것을 알 수 있다. 즉 최적 분산 계수 값을 이용한 WDM 시스템의 설계에서 소광비가 20 dB인 채널들을 전송하는 경우가 OPC 위치의 융통적 범위가 더욱 큰 것을 알 수 있다.

지금까지 도출된 결과를 ER에 따른 최적 파라미터 도출을 EOP 비교를 통해서 이루어졌던 지난 연구인 [6]의 결과와 비교해보면, 동일한 조건에서의 0 dBm 이상의 대신호 전송에 미치는 색 분산과 비선형 현상의 보상을 위한 EOP 분석에 의해 도출되는 최적 파라미터들은 ER에 영향을 받지 않지만 (고려한 모든 ER 값에서 최적 OPC 위치와 최적 분산 계수가 동일하게 얻어졌다), 시스템 전력 마진 신장을 위한 최소의 신호 전력을 고려하는 BER 분석을 통해 얻어진 최적 파라미터들은 ER 값에 의존해야 하는 것을 알 수 있다. 이는 색 분산과 비선형에서 민감한 장거리 초고속 WDM 전송 시스템 설계를 위한 성능 분석에서 소신호 분석, 즉 BER 분석에 좀 더 신중을 기해야 한다는 것을 의미한다.

V. 결 론

최적 파라미터 값들이 적용된 MSSl 기술을 광 펄스의 소광비에 따라 살펴보았다. Q-factor 및 BER 특성 개선에 영향을 미치는 최적 파라미터 값들은 WDM 채널 신호의 소광비가 클수록 MSSl 기술에서의 파라미터 값들에 대해서 OPC의 최적 위치 편차와 광섬유 구간의 최적 분산 계수가 편차가 커져야 하는 것을 확인하였다. 본 논문에서 도출된 최적 분산 계수 값을 이용한 OPC의 위치에 크게 종속받지 않는 유연한 시스템 설계 관점에서 보면 광 펄스의 소광비가 현재의 10 dB에서 20 dB로 증가하면 OPC 위치의 탄력성이 2배 가까이 증가되어 향후 광 소자 기술의 발전으로 소광비가 더욱 증가된 WDM 전송 시스템에 본 논문에서 살펴본 방법을 적용하면 채널들의 전송 품질이 더욱 개선되면서 다양한 구조의 시스템 구

현이 가능할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] G. Mohs et al., "Optimized inline dispersion compensation for self-phase modulation limited transmission", in *Proc. OECC/IOOC 2001*, pp. 262-262, 2001.
- [2] G. Lehmann and E. Meissner, "Dispersion management for the transmission of mixed data rates of 40 Gb/s and 10 Gb/s in the same fiber", in *Proc. Asian Pacific Optical and Wireless Comm. Conf.*, vol. 4906, pp.253-260, 2002.
- [3] A. Yariv, D. Fekete, and D. M. Pepper, "Compensation for channel dispersion by nonlinear optical phase conjugation", *Opt. Lett.*, vol. 4, pp 52-54, 1979.
- [4] D. M. Pepper and A. Yariv, "Compensation for phase distortions in nonlinear media by phase conjugation", *Opt. Lett.*, vol. 5, pp 59-60, 1979.
- [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] 이성렬, "WDM 채널 신호의 소광비에 따른 광 위상 공액기의 최적 파라미터 값", *한국항행학회논문지*, 제 11권 2호, pp 187~195, 2007.
- [7] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, 2001.
- [8] G. P. Agrawal, *Fiber-optic communication systems*, John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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. 532-535, 1997.

- [12] S. L. Jansen, D. van den Borne, P. M. Krummrich, S. Spälter, G.-D. Khoe, "Long-haul DWDM transmission systems employing optical phase conjugation", *IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electro.*, vol. 12, no. 4, pp. 505-520, 2006.
- [13] H. Kim and A. H. Gnauck, "Experimental investigation of the performance limitation of DPSK systems due to nonlinear phase noise," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 15, no. 2, pp. 320-322, 2003.

이 성 렬 (李成烈)



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

권 순 녀 (權純女)



1991년 2월 : 서울산업공대학교 전자공학과 (공학사)

1995년 8월 : 숭실대학교 정보산업대학원 (공학석사)

2006년 8월 : 한국항공대학교 대학원 통신정보공학과 (공학박사)

2005년 3월~현재 국립한국재활복지대학 컴퓨터게임개발과 조교수

관심분야 : 광통신 시스템, 차세대이동통신, 무선 LAN