

광 위상 공액기의 최적 파라미터를 이용한 1,000km NZ-DSF를 갖는 0.96 Tbps WDM 시스템의 유연한 설계

정회원 이성렬*, 도규봉**

The Flexible Design of 0.96 Tbps WDM System over 1,000km NZ-DSF by Using Optimal Parameters of Optical Phase Conjugator

Seong-Real Lee*, Kyu-Bong Doh** *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 광 위상 공액기 (OPC ; Optical Phase Conjugator)를 이용하여 WDM 채널들의 광 신호의 왜곡을 보상하는 MSSI (Mid-Span Spectral Inversion) 기술에서 OPC를 중심으로 한 광 전력과 색 분산 비대칭에 의한 한계를 OPC의 위치 변동과 그에 따른 광섬유 구간의 최적 분산 계수들의 적용만으로도 극복할 수 있다는 것을 살펴보았다. 즉 전송로로 1,000 km의 비영 분산 천이 광섬유를 이용한 24 채널 × 40 Gbps WDM 시스템에 본 논문에서 제안한 방법으로 도출된 최적 파라미터 값들을 적용하면 결정할 수 없을 정도로 매우 크게 나타났던 채널 간 전력 페널티를 약 3.5 dB의 양호한 품질로 보상할 수 있는 것을 확인하였다. 또한 본 논문에서 제안한 방법으로 얻은 최적 파라미터들을 이용하면 500 km로부터 ±15 km 범위 내의 다양한 위치에 OPC를 두고 모든 채널들을 양호하게 보상할 수 있는 WDM 시스템의 유연한 설계가 가능하다는 것을 확인하였다.

Key Words : Optical Phase Conjugator, OPC position offset, Dispersion offset, MSSI, WDM System

ABSTRACT

In this paper, it is investigated that the limitation due to the asymmetry of optical power and chromatic dispersion with respect to optical phase conjugator (OPC) for compensating optical signal distortion of WDM channels in mid-span spectral inversion (MSSI) technique is overcome by using OPC position offset and optimal dispersion coefficients of fiber sections, which depend on OPC position offset. It is confirmed that overall WDM channels are efficiently compensated by applying the optimal parameter values obtained from the proposed method into 24 channels × 40 Gbps WDM system with non zero - dispersion shifted fiber (NZ-DSF) of 1,000 km, such as power penalties of inter-channel are reduce to almost 3.5 dB from the infinite value. It is also confirmed that the flexible design of WDM system with OPC is possible by using the optimal parameters, in which OPC is placed at ±15 km from 500 km for efficiently compensating overall channels.

I. 서 론

20 Gbps 이상의 진폭 변조를 기초로 한 광 전송

시스템에서 전송 성능을 저하시키는 주요 원인들 중 하나는 색 분산 (chromatic dispersion)과 비선형성(nonlinearity)의 상호 작용에 의한 신호 왜곡이다

* 국립목포해양대학교 해양전자통신공학부 조교수 (reallee@mmu.ac.kr)

** 한국항공대학교 항공전자 및 정보통신공학부 교수

논문번호 : KICS2007-02-080, 접수일자 : 2007년 2월 22일, 최종논문접수일자 : 2007년 7월 9일

[12]. 이러한 한계를 극복하기 위하여 제안된 광이나 전기적인 부가 처리를 이용한 다양한 기술들^{[3]-[6]} 중 전체 전송로의 중간에 광 위상 공액기 (OPC ; optical phase conjugator)를 두어 전송되는 광 신호의 스펙트럼을 반전시켜 신호 왜곡을 보상하고자 하는 MSSI(mid-span spectral inversion) 기술은 색 분산에 의한 왜곡뿐만 아니라 비선형 효과에 의한 왜곡도 보상할 수 있다^[7,8]. 그러나 MSSI 기술을 통한 효과적 보상을 위해서는 전체 전송 거리 중간에 대하여 색 분산량과 광 전력의 대칭이 필요하지만 광섬유에 존재하는 손실 때문에 대칭을 만들기가 매우 어렵다.

MSSI 기술을 대용량 WDM 시스템에 적용하는데 있어 이러한 대칭화 문제 외에 OPC에 입력되는 광 신호를 공액파 (phase conjugate)로 만들어 스펙트럼 반전을 하는데 있어 모든 WDM 파장들이 균일한 효율로 반전되어야 한다. 즉 OPC의 변환 효율 (conversion efficiency : OPC로 입력된 신호 전력 대 OPC의 비선형 매질에서 4-광파 혼합 (FWM ; four-wave mixing)에 의해 변환된 공액파 전력의 비) 특성이 광대역이어야 한다. 다행스럽게도 OPC의 비선형 매질로 분산 천이 광섬유 (DSF ; dispersion shifted fiber) 대신에 HNL-DSF (highly-nonlinear-DSF)를 사용하면 변환 효율을 광대역에 걸쳐 균일하게 할 수 있다^[9].

그러나 OPC의 비선형 매질로 HNL-DSF가 적용되더라도 실제 광 전송로의 본질적 특성에 기인하는 비대칭성은 여전히 해결해야 할 문제로 남는다. 더욱이 광대역 WDM 시스템 구현을 위해 이 문제를 특정한 한 파장이 아닌 모든 WDM 채널 파장들에 적용할 수 있도록 해결해야 한다.

WDM 전 대역에 대한 색 분산량과 광 전력의 대칭화를 대체할 수 있는 새로운 기술을 지난 연구를 통해 제안하였다^[10]. 이 기술은 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 적용하여 모든 WDM 채널들이 비슷한 정도로

보상되는지를 확인하여 이루어졌다. 선행 연구에서 가정한 WDM 시스템은 변조 방식이 NRZ인 40Gbps의 비트율의 16 채널 전송 시스템이었다.

본 논문에서는 선행 연구에서 제안한 방법이 NRZ가 아닌 RZ 전송에도 적용될 수 있는지, 그리고 채널수를 확장하여 24 채널 방식 (총 전송률 = 0.96Gbps)에도 적용될 수 있는지를 확인해 보고자 한다. 아울러 이들 최적 파라미터들을 이용하면 OPC를 채택한 WDM 시스템의 융통적 설계와 구현이 가능한지, 가능하다면 그 유효 범위가 어디까지인지를 확인해 보고자 한다.

II. WDM 시스템의 모델링

수치적 분석은 식 (1)에 주어진 비선형 슈뢰딩거 방정식을 통해 이루어진다. 즉 WDM의 j-번째 채널의 포락선 A_j 는 식 (1)에 따라 광섬유의 z 방향으로 진행해 간다. 식 (1)의 수치적 분석은 단계 분할 푸리에 (SSF ; split-step Fourier) 기법을 이용하여 이루어진다^[11].

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

여기서 $j, k = 1, 2, \dots, 24(j \neq k)$, α 는 광섬유의 손실 계수, λ_j 는 j-번째 채널의 신호 파장, β_{2j} 는 색 분산 파라미터, β_{3j} 는 3차 색 분산 파라미터, γ_j 는 비선형 계수, $T = t - z/v_j$ 이다. 식 (1) 우변의 마지막 세 항은 각각 비선형 효과 중 자기 위상 변조 (SPM ; self phase modulation), 상호 위상 변조 (XPM ; cross phase modulation)와 4-광파 혼합 (FWM ; Four-Wave Mixing)를 유도한다. WDM 신호에 대한 XPM과 FWM의 영향은 WDM 시스템의 광섬유 분산 계수가 클수록 감소한다^[12]. 본 논문에서 가정한 광섬유는 표 1과 같이 비 영 분산 천이 광섬유 (NZ-DSF ; non zero - DSF)로 하였고, 그 분산 계수 값은 XPM에 의한 왜곡이 미미하게 나타나는 3ps/nm/km로 하였고기 때문에 이들의 영향은 무시하였다.

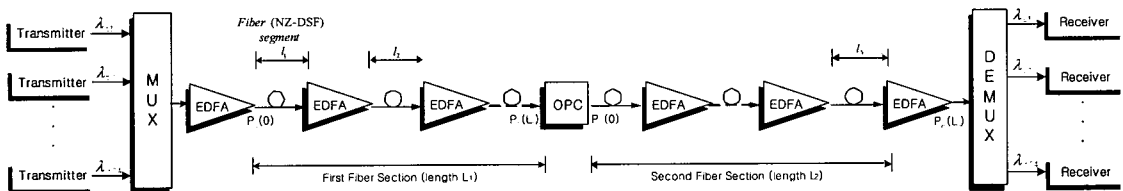


그림 1. 24 채널 x 40 Gbps WDM 시스템

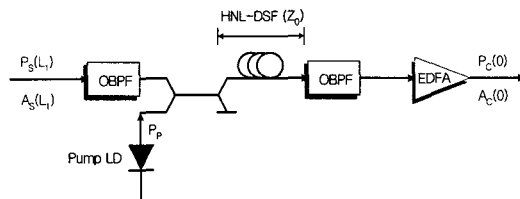
그림 1은 OPC가 전체 전송 거리의 중간에 위치한 강도 변조/ 직접 검파 (IM/DD ; Intensity Modulation / Direct Detection) WDM 시스템의 전체 구성을 나타낸 것이다 (즉 MSSI). 총 전송 거리는 상대적인 길이 $L_1(= L/2)$ 과 L_2 의 두 전송 구간(section)으로 나뉜다. 각 전송 구간은 50km 간격(l)을 갖는 에르븀 첨가 광섬유 증폭기 (EDFA ; erbium-doped fiber amplifier) 10개로 연결되는 것으로 가정하였다.

표 1. 광섬유 파라미터

Parameter	Symbol & Value
Type	NZ-DSF
Chromatic dispersion	$D_{1x} = 3 \text{ ps/nm/km}$
Nonlinear refractive index	$n_2 = 2.5 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$
Attenuation	$\alpha = 0.2 \text{ dB/km}$
Effective core area	$A_{\text{eff}} = 72 \mu\text{m}^2$

그림 1의 송신부에서의 각 레이저 다이오드는 서로 독립적인 40Gbps 128($=2^7$) PRBS(pseudo random bit sequence)에 의해 강도 변조되는 것으로 가정하였다. 이 때 외부 광 변조기로부터 발생하는 출력 전계 강도는 RZ 형식의 2차 가우시안 펄스로 모델링하였다. 또한 수신부는 5dB의 잡음 지수를 갖는 전치 증폭기, 1nm 대역폭의 광 필터, PIN 다이오드, 버터워스 형태의 펄스 정형 필터와 판별 회로로 구성된 직접 검파 (direct detection) 방식의 수신기로 가정하였다[14]. 그리고 수신 대역폭은 $0.65 \times$ 비트율로 가정하였다.

그림 2는 HNL-DSF를 이용한 OPC의 구조와 파라미터 값들을 나타낸 것이다. 그림 2에 나타난 OPC에 대한 변환 효율의 3-dB 대역폭은 그림 3과 같이 48nm (1,526~1,574nm)로 얻어진다.



- 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

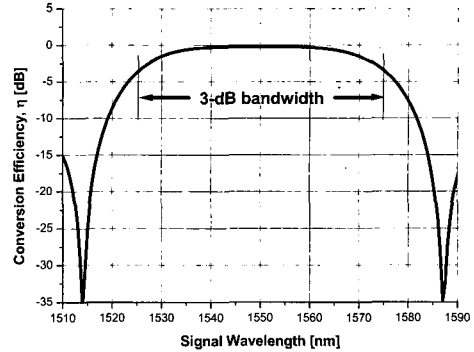


그림 3. HNL-DSF를 이용한 OPC의 변환 효율

WDM 채널들의 중심 주파수들을 ITU-T 권고에 따라 100GHz (즉 0.8nm)의 등간격으로 분할하였다 [15]. 24 채널 중 첫 번째 채널의 중심 주파수는 1550.0nm로 가정하였다. 따라서 24개의 신호 파장들(1550.0~1568.4nm)과 이들의 공액파와 파장들(1531.1~1549.5nm) 모두 그림 3의 변환 효율 3-dB 대역폭 안에 포함된다.

III. 최적 파라미터의 도출 방법

Watanabe와 Shirasaki는 MSSI에서 완벽한 보상 조건을 아래와 같이 거리 z 의 함수로 일반화하였다[16].

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

이 관계식은 위치 $-z_1'$ 와 z_2' 에서 분산과 비선형성이 동일한 비율로 형성되지만 하면 완벽한 보상이 이루어진다는 것을 의미한다. 달리 말해, 완벽한 보상을 위해서는 신호 파장과 관련하여 OPC가 전체 전송 거리 중간에 반드시 위치할 필요가 없고, 두 광섬유 구간의 분산 계수들도 서로 반드시 같을 필요가 없음을 의미한다. 그러나 WDM 시스템에서 채널들의 파장이 다양하기 때문에 모든 파장에 적용 가능한 공통의 OPC 위치와 광섬유 구간의 분산 계수 값을 찾는 것이 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 수치적 분석을 통해 모든 WDM 채널을 최선으로 보상할 수 있는 OPC의 최적 위치와 광섬유 구간들의 분산 계수 값을 도출해 보고자 한다.

최적 OPC 위치는 OPC 위치 오프셋 Δz 에 따른 두 채널 사이의 파장 차이가 가장 큰 채널 1과 24의 식 (3)의 눈 열림 페널티 (EOP ; eye opening penalty)를 비교 분석하여 찾는다.

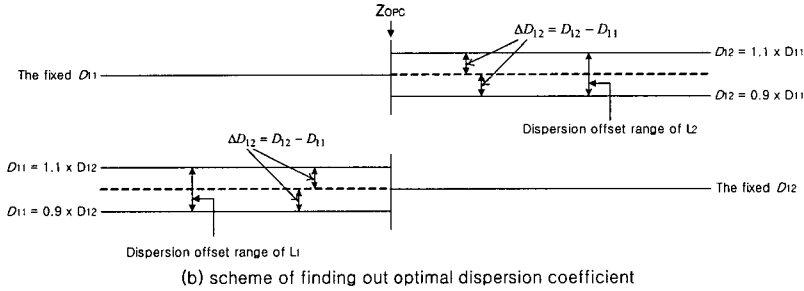
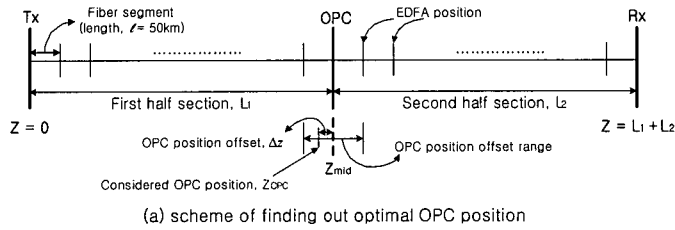


그림 4. 최적 파라미터 도출 개념도

$$EOP(dB) = 10\log_{10}(EO_{rec}/EO_{btb}) \quad (3)$$

내에서 변화시킨다.

여기서 EO_{rec} 는 수신 신호의 눈 열림 (EO ; eye opening) 정도이고 EO_{btb} 은 광섬유 전송 링크에 입사되는 송신 신호의 눈 열림 정도로 EO는 아래와 같이 정의된다.

$$EO = 2P_{av}/(P_{1,min} - P_{0,max}) \quad (4)$$

여기서 P_{av} 는 광 신호의 평균 전력, $P_{1,min}$ 과 $P_{0,max}$ 은 각각 펄스 '1'에서의 최소 전력과 '0'에서의 최대 전력이다.

Δz 는 OPC 위치(z_{opc})와 전체 전송 거리의 중간 위치 (z_{mid})의 차이, 즉 $\Delta z = z_{opc} - z_{mid}$ 로 정의된다. 여기서 그림 4(a)에서처럼 z_{mid} 는 500 km이고 z_{opc} 는 z_{mid} 을 중심으로 증폭기의 한 간격 (즉 ± 50 km) 내에서 변화시킨다.

또한 각 광섬유 구간의 최적 분산 계수 값은 분산 계수 오프셋 ΔD_{1x} 에 따른 채널 1과 24의 EOP를 비교 분석하여 찾는다. ΔD_{1x} 는 그림 4(b)에서 보여지듯이 두 광섬유 구간의 분산 계수 차이로 정의된다. 즉 첫 번째 광섬유 구간의 분산 계수 오프셋은 $\Delta D_{11} = D_{11} - D_{12}$ 로 정의되는데, 여기서 D_{12} 는 3ps/nm/km로 고정시키지만 D_{11} 는 고정된 D_{12} 값의 90~110 % 범위 내에서 변화시킨다. 그리고 두 번째 광섬유 구간의 분산 계수 오프셋은 $\Delta D_{12} = D_{12} - D_{11}$ 로 정의되는데, 여기서 D_{11} 는 3ps/nm/km로 고정시키지만 D_{12} 는 고정된 D_{11} 값의 90~110 % 범위

IV. 시뮬레이션 결과 및 검토

그림 5는 전통적 MSSI 기술이 적용된 24 채널 WDM 시스템에서의 입사(입력) 광 전력에 따른 전체 채널들의 EOP를 나타낸 것이다. WDM 채널의 신호 파장이 OPC의 영 분산 파장 (zero dispersion wavelength)으로부터 멀어질수록 (즉, 채널 번호가 증가할수록) EOP 특성이 나빠지는 것을 알 수 있다. 따라서 MSSI 기술을 WDM 시스템에 직접 적용하여 WDM 채널수를 증가시키는 것에는 한계가 있는 것을 확인할 수 있다.

그림 6(a)는 두 광섬유 구간의 분산 계수가 3ps/nm/km로 고정되었을 때 OPC 위치 편차 Δz 에 따른 채널 1과 24의 EOP 차이를 나타낸 것이고

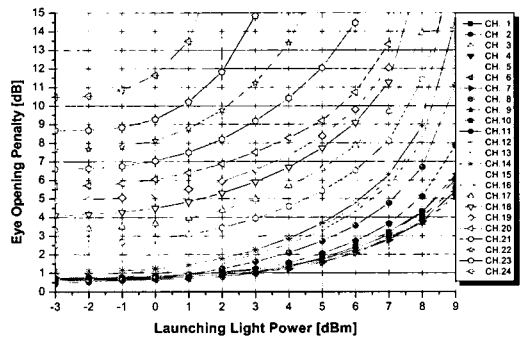


그림 5. MSSI 기술이 적용된 WDM 시스템에서 입사 전력에 따른 EOP

그림 6(b)는 그림 6(a)에서 구한 최상의 Δk 에 OPC가 위치했을 때 분산 계수 편차 ΔD_{1x} 에 따른 채널 1과 24의 EOP 차이를 나타낸 것이다. 여기서 EOP 차이를 채널 1과 24에 대해서만 살펴보는 것은 이 두 채널의 파장 차이가 가장 크기 때문에 EOP 차이를 최소로 하는 최적 파라미터 값들이 24 채널 모두에도 영향을 미칠 수 있다는 이유 때문이다. 채널 1과 24의 EOP 차이를 최소로 하는 최적 OPC 위치는 494km (즉, $\Delta k = -6\text{km}$) 이고 이 위치에서 각각의 광섬유 구간의 최적 분산 계수 편차는 모두 0 ps/nm/km인 것을 그림 6을 통해 알 수 있다. 즉 OPC가 496km에 위치한 경우 첫 번째 광섬유 구간의 분산 계수와 두 번째 광섬유 구간의 분산 계수 모두 3ps/nm/km이어야 한다는 것을 알 수 있다.

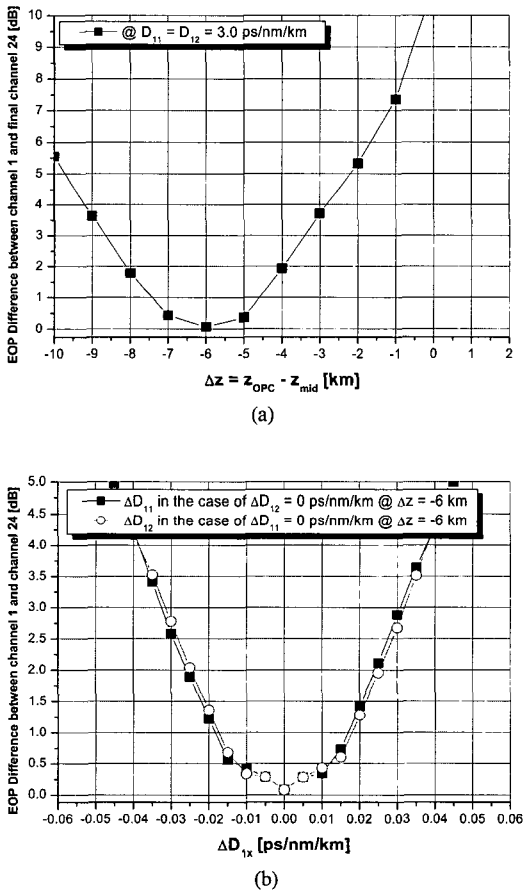


그림 6. 채널 1과 24의 EOP 차이. (a) $D_{11} = D_{12} = 3$ ps/nm/km에서 Δz 에 의존하는 경우, (b) 그림 (a)에서 구한 최상 Δz 에 OPC가 위치하고 ΔD_{1x} 에 의존하는 경우

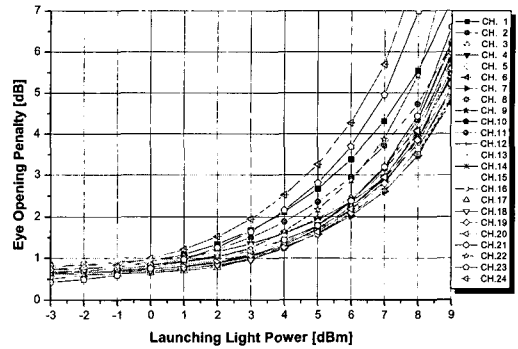


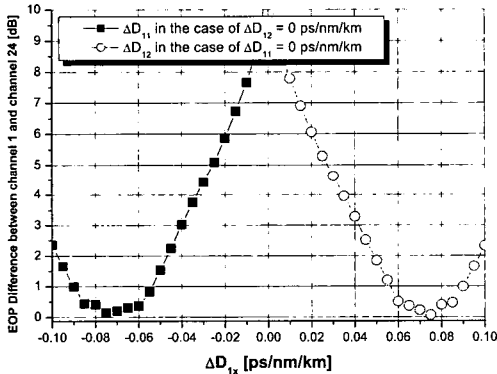
그림 7. 그림 6의 최적 파라미터들이 채택된 WDM 시스템에서 입사 광 전력에 따른 EOP

그림 7은 그림 6의 결과가 실제 WDM 시스템에 미치는 영향을 알아보기 위하여 그림 6의 결과, 즉 $\Delta k = -6 \text{ km}$, $D_{11} = D_{12} = 3 \text{ ps/nm/km}$ 로 설정된 WDM 시스템에서의 전체 채널에 대한 입사 광 전력에 따른 EOP를 나타낸 것이다. 그림 6으로부터 얻은 최적 파라미터들이 WDM 시스템에 적용되면 MSS (그림 5의 경우)에 비해 파장이 큰 채널들의 EOP가 크게 좋아져서 WDM 시스템 전반의 수신 성능이 큰 폭으로 개선되는 것을 알 수 있다. 즉 1dB EOP를 전송 성능의 기준으로 한다면 MSS에서의 정할 수 없었던 전력 페널티가 3.5dB 정도로 감소되는 것을 확인할 수 있다. 이것은 OPC를 이용한 WDM 시스템에서 색 분산량과 광 전력을 대칭시키지 않더라도 OPC의 최적 위치와 그에 의존하는 광섬유 구간의 최적 분산 계수 값의 적용만으로도 전체 채널의 성능을 개선시킬 수 있다는 것을 의미한다.

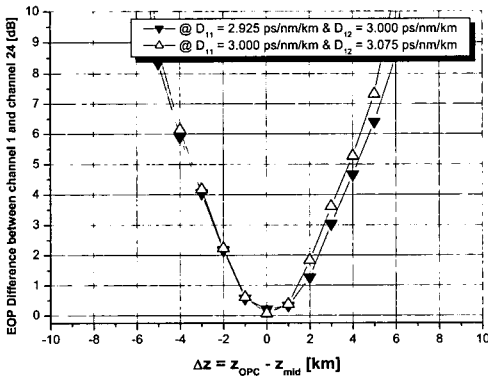
본 논문에서 모든 경우 OPC의 펌프 광 전력을 그림 2에서 언급했듯이 18.5dBm으로 가정하였다. 그러나 OPC의 위치가 그림 6(a)의 결과에 따라 500km에서 494km로 변화된 경우의 최적 펌프 광 전력은 시뮬레이션 결과 18.7dBm으로 0.2dB 정도 상승해야 하는 것을 확인하였다. 그리고 이 펌프 광 전력에서의 24 채널 전체의 EOP 특성도 그림 7의 결과보다 다소 개선되는 것을 확인하였다. 그러나 본 논문에서 모든 채널의 양호한 보상을 위해 고려하는 파라미터는 최적 OPC 위치와 최적 분산 계수 값이기 때문에 OPC 위치 변동에 따른 최적 펌프 광 전력 값과 그의 적용에 따른 EOP 특성은 제외시켰다.

최적 파라미터들을 구하는데 있어 그림 6은 우선 Δk 값을 먼저 구하고 그 값에서 ΔD_{11} 또는 ΔD_{12} 를 구하는 순서를 따랐다. 이 두 파라미터들의 상관성

을 알아보기 위하여 구하는 순서를 바꿔볼 필요가 있다. 그림 8(a)는 $\Delta z = 0\text{km}$ 라고 가정한 경우 한 쪽 광섬유의 ΔD_{1x} 가 0ps/nm/km 일 때 나머지 광섬유의 분산 계수 편차에 따른 채널 1과 24의 EOP 차이를 나타낸 것이고, 그림 8(b)는 한 쪽 광섬유 구간의 분산 계수가 그림 8(a)에서 구한 최상의 ΔD_{1x} 에 의해 $D_{1x} + \Delta D_{1x}$ 로 설정되고 나머지 광섬유 구간의 분산 계수가 3ps/nm/km 로 고정된 경우에서 Δz 에 따른 채널 1과 24의 EOP 차이를 나타낸 것이다. 그림 8(a)에서 ΔD_{11} 과 ΔD_{12} 에 대한 EOP 차이 특성이 서로 대칭적으로 나타난다. 즉 $\Delta D_{1x} = 0\text{ps/nm/km}$ 일 때의 최적 ΔD_{12} 값은 $+0.075\text{ps/nm/km}$ 인 반면 $\Delta D_{12} = 0\text{ps/nm/km}$ 일 때의 최적 ΔD_{11} 값은 -0.075ps/nm/km 임을 알 수 있다. 즉 한 쪽 광섬유 구간의 분산 계수 값이 3ps/nm/km 로 고정되어 있는 경우 나머지 광섬유 구간의 분산 계수는 이에 대해 0.075ps/nm/km 만큼 차이가 있어야 채널 1과 채널 24의 EOP 차이를 최소화 할 수 있다.



(a)

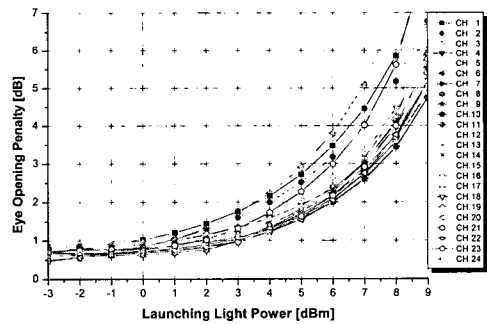


(b)

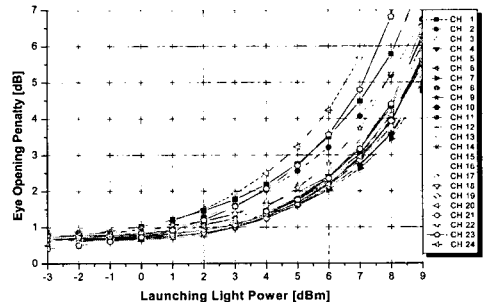
그림 8. 채널 1과 24 사이의 EOP 차이 (a) $\Delta z = 0\text{ km}$ 에서 ΔD_{1x} 에 의존하는 경우 (b) 그림 (a)에서 구한 최상 ΔD_{1x} 에서 Δz 에 의존하는 경우

그림 8(b)를 통해 첫 번째 광섬유 구간의 분산 계수가 그림 8(a)의 결과에 따라 $D_{11} = D_{1x} + \Delta D_{11} = (3-0.075)\text{ps/nm/km} = 2.925\text{ps/nm/km}$ 로 설정되고 두 번째 광섬유 구간의 분산 계수가 $D_{12} = D_{1x} = 3\text{ps/nm/km}$ 로 설정된 경우와 첫 번째 광섬유 구간의 분산 계수가 $D_{11}=D_{1x}=3\text{ps/nm/km}$ 로 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 0km 이어야 한다는 것을 알 수 있다 (즉 최적 OPC 위치 = 500km).

그림 9는 그림 8의 결과에서 얻어진 최적 파라미터들이 적용된 WDM 시스템에서의 전체 채널에 대한 입사 광 전력에 따른 EOP 특성을 나타낸 것이다. 우선 그림 9(a)와 9(b)의 EOP 특성이 서로 비슷하게 나타나고, 그리고 이들은 이와 반대의 절차로 구해진 최적 파라미터들이 적용된 WDM 전체 채널들의 EOP 특성을 나타낸 그림 7의 결과들과도 매우 비슷한 것을 알 수 있다. 즉 그림 7과 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.



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



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

그림 9. 그림 8의 최적 파라미터들이 채택된 WDM 시스템에서 입사 광 전력에 따른 EOP

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 3ps/nm/km로 그대로 두고 OPC 위치만을 494km로 이동시켜 개선시킬 수도 있고 (그림 7), OPC 위치를 500km로, 한 쪽 광섬유 구간의 분산 계수를 3ps/nm/km로 둔 채 나머지 광섬유 구간의 분산 계수만에 편차를 주어서 개선시킬 수도 있다 (그림 9의 (a) 또는 (b)).

그러나 단순한 분석에 의한 이러한 결과들보다 더욱 중요한 것은 그림 6과 8로부터 얻은 이들 최적 파라미터 값들을 이용하면 OPC를 이용한 WDM 시스템을 융통적으로 설계할 수 있다는 것이다. 이러한 내용을 첫 번째 광섬유 구간의 분산 계수 값이 3ps/nm/km로 고정된 경우에 국한하여 설명하면 아래와 같다. 그림 6에서 OPC의 위치가 494km인 경우 두 번째 광섬유 구간의 최적 ΔD_{12} 은 0ps/nm/km로, 그림 8에서 OPC의 위치가 500 km인 경우 두 번째 광섬유 구간의 최적 ΔD_{12} 은 +0.075

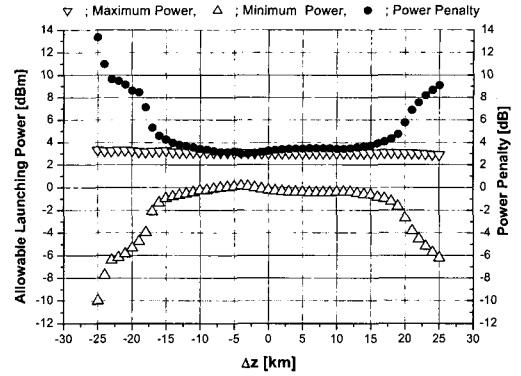
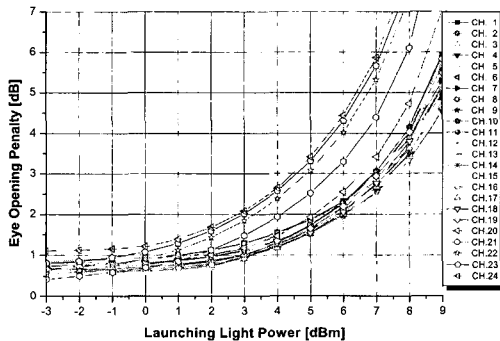
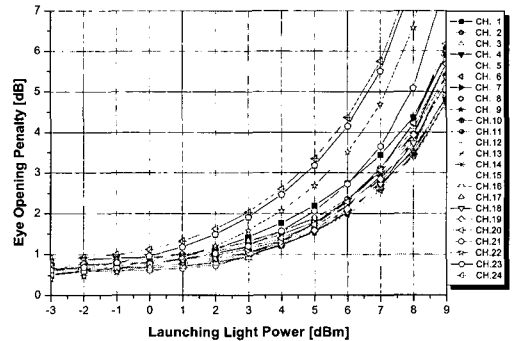


그림 10. 채널의 허용 가능한 입사 전력들과 전력 페널티

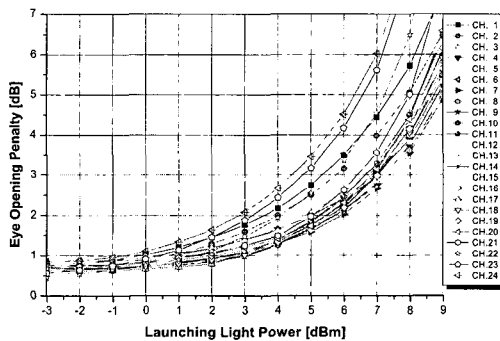
ps/nm/km로 얻어졌다. 그리고 이 두 경우에서의 전체 WDM 채널의 EOP 특성이 비슷하게 얻어졌다. 이 두 경우를 관련지어 보면, OPC를 500km가 아닌 다양한 위치에 두고 설계하고자 할 때, 500km에서 ± 1 km만큼 이동시키면 두 번째 광섬유 구간의 최적 분산 계수 값을 그에 상응하여 3.075 ps/nm/km로부터 ± 0.0125 ($=0.075/6$)ps/nm/km만큼 변화시켜야 한다는 사실을 얻을 수 있다. 즉 예를 들어, OPC를 490km ($\Delta z = -10$ km)에 위치시켜 모든



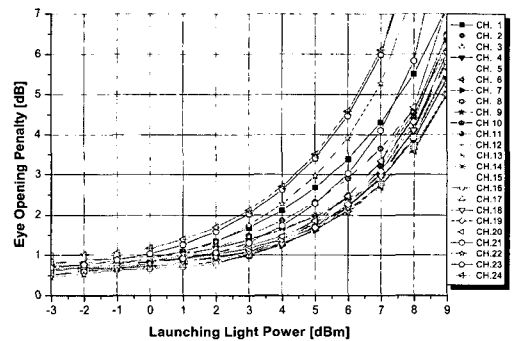
(a) $\Delta z = -20$ km, $D_{11} = 3.0$ & $D_{12} = 2.825$ ps/nm/km



(b) $\Delta z = -15$ km, $D_{11} = 3.0$ & $D_{12} = 2.88775$ ps/nm/km



(c) $\Delta z = +15$ km, $D_{11} = 3.0$ & $D_{12} = 3.2625$ ps/nm/km



(d) $\Delta z = +20$ km, $D_{11} = 3.0$ & $D_{12} = 3.325$ ps/nm/km

그림 11. 다양한 OPC 위치에서의 WDM 시스템의 EOP

WDM 채널에 대한 최상의 보상을 얻고자 한다면 두 번째 광섬유 구간의 분산 계수를 $2.95 (=3.075 + (0.0125 \times (-10)))$ ps/nm/km로 설정하고, OPC를 515 km ($\Delta z=15$ km)에 위치시켜 모든 WDM 채널에 대한 최상의 보상을 얻고자 한다면 두 번째 광섬유 구간의 분산 계수를 $3.2625 (=3.075 + (0.0125 \times 15))$ ps/nm/km로 설정하면 WDM 채널 모두를 그림 7과 9에서와 같이 양호하게 보상할 수 있을 것이다. 그러면 이렇게 도출된 최적 값의 적용이 모든 OPC 위치에서 가능한지 확인해 볼 필요가 있다.

1 dB EOP를 수신단에서 허용 가능한 품질 기준으로 한다면, 그림 10은 D_{11} 가 3ps/nm/km로 고정된 경우 다양한 Δz 에서의 1 dB EOP를 얻을 수 있는 채널의 최대 입사전력과 최소 입사 전력, 그리고 이 두 전력의 차인 전력 패널티를 보인 것이다. 이 그림은 x -축에 Δz 만 나타냈지만 D_{12} 도 3ps/nm/km에서 OPC 위치 변동에 따라 ± 0.0125 ps/nm/km만큼 함께 변동시킨 경우를 나타낸 것이다. 즉, 예를 들어, 그림 10에서 $\Delta z = +10$ km의 데이터들은 OPC의 위치가 510km이고 $D_{11} = 3$ ps/nm/km, $D_{12} = 3.2 (=3.075 + (0.0125 \times 10))$ ps/nm/km에서 얻은 1 dB EOP가 되는 입사 전력들과 전력 패널티이다. 또한 그림 11은 그림 10의 결과를 구체적으로 확인하기 위하여 $\Delta z = -20, -15, +15$, 그리고 $+20$ km에서의 24개 전체 채널의 EOP 특성을 나타낸 것이다.

앞서 살펴본 그림 7과 9의 결과와 비슷한 결과가 나타나는 OPC의 유효 위치는 500km를 중심으로 ± 15 km까지인 것을 그림 10과 11을 통해 알 수 있다. 즉 OPC를 이용하여 채널 왜곡을 보상하는 1,000km의 RZ 형식의 WDM 시스템에서 OPC를 500km가 아닌 485 km와 515 km 사이의 어떤 곳에 위치시키고, 두 광섬유 구간의 분산 계수를 OPC 위치 변동 정도에 상응하는 크기만큼 차이하게 설계한다면 전통적 MSSI 기술만 적용된 WDM 시스템에서보다 더욱 개선된 성능이 보장되는 WDM 시스템 구현이 가능한 것을 확인할 수 있다.

V. 결론

전체 전송 거리 중간에 위치한 OPC를 이용하여 광 신호의 왜곡을 보상하는 MSSI 기술에서 OPC를 중심으로 광 전력과 색 분산이 대칭화될 수 없어 특히 장파장 영역의 WDM 채널의 보상에 문제가 있었던 한계는 OPC의 이동과 그에 따른 광섬유 구간의 최적 분산 계수 값의 적용으로 극복될 수 있

다는 것을 확인하였다. 즉 광 전력과 색 분산을 OPC에 대해 대칭시키지 않더라도 1,000km의 NZ-DSF의 분산 계수가 3ps/nm/km로 설계된 RZ 형식을 채택한 24 채널 \times 40Gbps WDM 시스템에서 OPC의 위치를 500km로 하는 경우 두 광섬유 구간의 분산 계수 차가 0.075ps/nm/km가 되어야 하고, 만일 OPC를 500km가 아닌 다른 위치에 두고 보상하고자 하는 경우 OPC 위치 편차 ± 1 km 당 두 광섬유 구간의 분산 계수의 편차가 ± 0.0125 ps/nm/km가 되도록 하면 OPC에 의한 모든 채널들의 보상 효과가 양호하게 나타난다는 것을 확인하였다. 이 때 모든 채널의 최상의 보상을 위한 OPC의 유효 위치 범위는 1,000km의 전체 전송 거리에서 485km부터 515km 사이인 것을 알 수 있었다. 이 결과는 OPC를 사용하여 왜곡 보상을 수행할 수 있는 기술에서 OPC가 전체 전송 거리 중간이 아닌 다른 곳에서도 위치할 수 있다는 것을 의미하기 때문에 본 논문에서 제안한 방법으로 도출되는 최적 파라미터 값들을 이용하면 OPC의 위치에 크게 종속받지 않는 WDM 시스템의 유연한 설계가 가능할 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] A. Mecozzi, C. B. Clausen, and M. Shtaif, "System impact of intra-channel nonlinear effects in highly dispersed optical pulse transmission", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, no. 12, pp.1633-1635, 2000.
- [2] J. P. Gordon and L. F. Mollenauer, "Phase noise in photonic communications system using linear amplifiers", *Opt. Lett.*, vol. 15, pp.1351-1353, 1990.
- [3] T. L. Koch Alferness, "Dispersion compensation by active predistorted signal synthesis", *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-3, pp.800-805, 1985.
- [4] A. H. Gnauck et al., "8-Gb/s-130 km transmission experiment using Er-doped fiber preamplifier and optical dispersion equalization", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 3, pp.1147-1149, 1991.
- [5] N. Takachio, K. Iwashita, K. Nakanishi, and S. Koike, "Chromatic dispersion equalization in an 8 Gbit/s 202 km optical CPFSK transmission experiment", in *Proc. IOOC*

- '89, Kobe, Japan, 1989, Paper 20PDA-13.
- [6] A. M. Vengsarkar and W. A. Reed, "Dispersion-compensating single-mode fibers : Efficient designs for first- and second-order compensation", *Opt. Lett.*, vol. 18, pp.924~926, 1993.
- [7] 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.
- [8] D. M. Pepper and A. Yariv, "Compensation for phase distortions in nonlinear media by phase conjugation", *Opt. Lett.*, vol. 5, pp.59~60, 1979.
- [9] 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.
- [10] Seong-Real Lee, "Compensation for the Distorted 16×40 Gbps NRZ Channels in 1,000 km NZ-DSF WDM System using MSS1 with Optimal Parameters". *한국통신학회논문지*, 제 31권 11A호, pp.1044~1052, 2006.
- [11] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, 2001.
- [12] 이성렬, 김지웅, 손성찬, "320 Gbps 강도 변조 직접 검파 WDM 채널 보상에서 상호 위상 변조의 영향", *한국해양정보통신학회논문지*, 제 8권 6호, pp.1134~1140, 2004.
- [13] 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.
- [14] G. P. Agrawal, *Fiber-optic communication systems*, John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [15] ITU Recommendation "Spectral grids for WDM applications : DWDM frequency grid" G.694.1, 2006.
- [16] 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.

이 성 렬 (Seong-Real Lee)

정회원



1990년 2월 한국항공대학교 항공통신정보공학과 졸업

1992년 8월 한국항공대학교 대학원 항공통신정보공학과 석사

2002년 2월 한국항공대학교 대학원 통신정보공학과 박사

2002년 6월~2004년 2월 (주)에이티엔 부설연구소 연구소장

2004년~현재 국립목포해양대학교 해양전자통신공학부 조교수

<관심분야> WDM 전송 시스템, 광 솔리톤 전송

도 규 봉 (Kyu-Bong Doh)

정회원



1989년 버지니아공대 전기공학과 졸업

1991년 버지니아공대 대학원 전기공학과 석사

1996년 버지니아공대 대학원 전기공학과 박사

1997년 3월~현재 한국항공대학교 항공전자 및 정보통신공학부 교수

<관심분야> 광 정보처리, 전자 홀로그램, 광센서, 광통신