

# WDM 채널수에 따른 최적의 OPC 위치 및 광섬유 분산 계수

## Optimal OPC Position and Fiber Dispersion Coefficients depending on WDM Channel Numbers

이성렬\*, 정재필\*\*

Seong-Real Lee\*, Jae-Pil Chung\*\*

### 요 약

본 논문에서는 광 위상 공액기(OPC ; optical phase conjugator)를 중심으로 광 전력과 색 분산량을 대칭화 하는 방법을 대체할 수 있는 OPC의 최적 위치 편차와 그에 따른 광섬유 구간의 최적 분산 계수 편차를 WDM 시스템의 채널수에 따라 살펴보았다. 본 논문에서 고려한 WDM 시스템의 채널수는 8, 12, 16, 20, 24로 가정하였고, 각 채널의 비트율은 40 Gbps로 가정하였다. 모든 WDM 채널의 보상을 위한 최적 OPC 위치 편차와 광섬유 구간의 최적 분산 계수 편차는 채널수가 증가할수록 커져야 한다는 것을 확인하였다. 그러나 최적 OPC 위치 편차와 광섬유 구간의 최적 분산 계수 편차가 동시에 증가하기 때문에 OPC 위치 이동 1 km 당 최적 분산 계수 값은 WDM 채널수에 크게 의존하지 않는다는 것을 알 수 있었다. 그리고 이들 최적 파라미터 값들은 WDM 채널수가 적은 시스템에서보다 채널수가 많은 시스템에 더욱 효과적이라는 것을 알 수 있었다.

### Abstract

In this paper, the optimal position offset of optical phase conjugator (OPC) and the optimal dispersion offsets of fiber sections, which are alternating with the method for the symmetry of optical power and chromatic dispersion with respect to OPC, are numerically investigated as a function of the WDM channel numbers. The WDM channel numbers are assumed to be 8, 12, 16, 20 and 24. The bit-rate of each channel is assumed to be 40 Gbps for all cases. It is confirmed that the optimal position offset of OPC and optimal dispersion offset of fiber section are gradually increased as the WDM channel numbers are gradually increased. But, the optimal dispersion values of fiber sections per OPC position offset of 1 km are independent on WDM channel numbers, because the optimal position offset of OPC and optimal dispersion offset of fiber section are simultaneously increased as the WDM channel numbers are increased. It is also confirmed that the applying of these optimal parameter values is efficient to WDM system with many channels rather than WDM with small channels.

Key words : Optical Phase Conjugator, OPC position offset, dispersion offset, WDM channel numbers

### I. 서 론

초고속 광 전송 시스템에서 전송 성능을 저하시키는 주요 원인들 중 하나인 색 분산(chromatic dispersion)과

비선형성(nonlinearity)의 상호 작용에 의한 신호 왜곡 [1], [2]을 극복하기 위한 기술들 중 전체 전송로의 중간에 광 위상 공액기(OPC ; optical phase conjugator)를 두어 전송되는 광 신호의 스펙트럼을 반전시켜 신호 왜곡

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

\*\* 가천의과학대학교 정보기술학과 (Dep. of Inform. Techno. Eng., Gachon University of Medicine and Science)

· 제1저자 (First Author) : 이성렬

· 접수일자 : 2007년 5월 14일

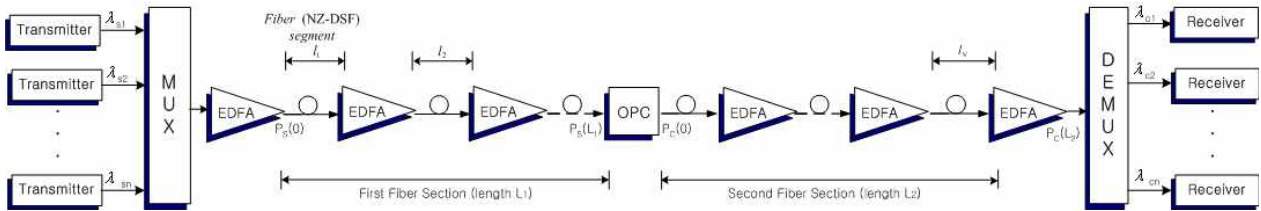


그림 1. OPC를 갖는 WDM 시스템  
Fig. 1. WDM system with OPC.

을 보상하고자 하는 MSSI(mid-span spectral inversion) 기술이 있다[3],[4]. 그러나 이 MSSI 기술을 실제 광 전송 시스템에 구현하는데 있어 광섬유에 존재하는 손실에 기인하는 전체 전송 거리 중간에 대한 색 분산량과 광 전력의 비대칭은 해결해야 할 문제이다. 즉 전체 전송 거리 중간에 위치한 OPC에 대하여 색 분산량과 광 전력을 대칭으로 만들든가, 아니면 이를 대체할 수 있는 기술을 부가적으로 결합시켜야만 MSSI 기술을 WDM 시스템에 적용할 수 있다.

WDM 전 대역에 대한 색 분산량과 광 전력의 대칭화를 대체할 수 있는 새로운 기술을 지난 연구들을 통해 제안하였다[5]-[9]. 이 기술은 WDM 채널 중 파장이 가장 작은 채널과 가장 큰 채널을 동시에 최적으로 보상할 수 있는 OPC의 위치와 광섬유 구간의 분산 계수 값을 WDM 시스템에 적용하는 것으로 이루어졌다.

본 논문에서는 선행 연구에서 제안한 방법에서 얻을 수 있는 최적 OPC 위치와 광섬유 구간의 분산 계수 값을 WDM 채널수에 따라 도출해 보고자 한다. 본 논문에서 WDM 채널의 변조 형식은 NRZ으로 하였고 WDM 채널수는 8, 12, 16, 20, 24로 하였다. 그리고 모든 경우 각 채널의 비트율은 40 Gbps로 가정하였다.

## II. WDM 시스템의 모델링

수치적 분석은 식 (1)에 주어진 비선형 슈뢰딩거 방정식의 해석을 통해 얻어진다[10]. WDM의  $j$ -번째 채널의 포락선  $A_j(z, t)$ 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[10].

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

여기서  $j, k = 1, 2, \dots, N$  ( $j \neq k$ ,  $N=8, 12, 16, 20$  or  $24$ ),  $\alpha$  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,  $\gamma_j$ 는 비선형 계수,  $T=t-z/v_g$ 이다. 식 (1) 우변의 마지막 두 항은 각각 비선형 효과 중 자기위상 변조 (SPM ; self phase modulation)와 상호 위상 변조 (XPM ; cross phase modulation)를 유도한다. WDM 신호에 대한 XPM의 영향은 WDM 시스템의 광섬유 분산 계수가 클수록 감소한다[11]. 본 논문에서 가정한 광섬유는 비 영 분산 천이 광섬유 (NZ-DSF ; non zero DSF)로 하였고, 그 분산 계수 값은 XPM에 의한 왜곡이 미미하게 나타나는 2 ps/nm/km로 하였기 때문에 XPM의 영향은 무시하였다. 본 연구에서의 분석과 수치 해석을 위해 가정한 광섬유 파라미터와 그 값들[12]을 표 1에 정리해 놓았다.

표 1. 광섬유 파라미터

Table. 1. Fiber parameter assumptions.

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

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  $L_2$ 두 전송 구간(section)으로 나뉜다. 각 전송 구간은 50 km 간격(1)을 갖는 에르븀 첨가 광섬유 증폭기 (EDFA erbium-doped fiber amplifier) 10개로 연결되는 것으로 가정하였다.

그림 1의 송신부에서의 각 레이저 다이오드는 서로 독립적인 40 Gbps 128(=2<sup>7</sup>) PRBS(pseudo random bit sequence)에 의해 강도 변조되는 것으로 가정하였다. 이때 외부 광 변조기로부터 발생하는 출력 전계 강도는 NRZ 형식의 2차 가우시안 펄스로 모델링하였다. 또한 수신부는 5 dB의 잡음 지수를 갖는 전치 증폭기, 1 nm 대역폭의 광 필터, PIN 다이오드, 버터워스 형태의 펄스 정형 필터와 판별 회로로 구성된 직접 검파(direct detection) 방식의 수신기로 가정하였다[13]. 그리고 수신 대역폭은 0.65 x 비트율로 가정하였다.

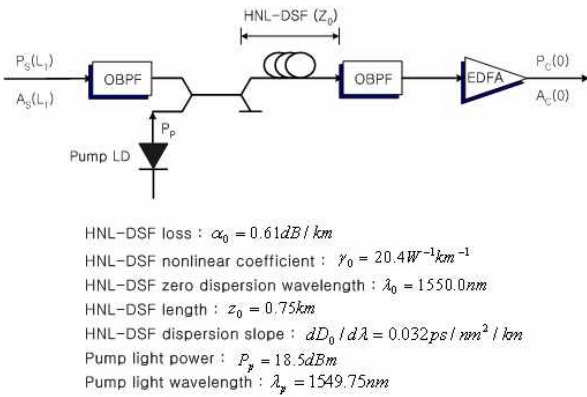


그림 2. HNL-DSF를 이용한 OPC.  
 Fig. 2. OPC with HNL-DSF.

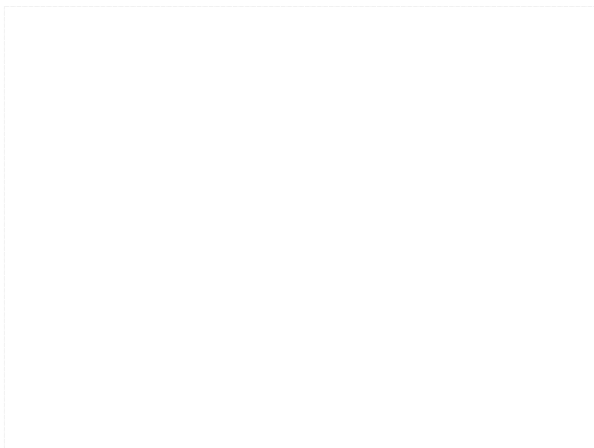


그림 3. 변환 효율 값.  
 Fig. 3. Conversion efficiency value.

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

WDM 채널들의 중심 주파수들을 ITU-T 권고에 따라 100 GHz (즉 0.8 nm)의 등간격으로 분할하였다[14]. 24

채널 중 첫 번째 채널의 중심 주파수는 1550.0 nm로 가정하였다. 따라서 본 논문에서 고려한 WDM 시스템의 최대 용량인 24개의 신호 파장들(1550.0 ~ 1568.4 nm)과 이들의 공액파 파장들(1531.1 ~ 1549.5 nm) 모두 그림 3의 변환 효율 3-dB 대역폭 안에 포함된다.

### III. 최적 파라미터의 도출

Watanabe와 Shirasaki는 MSSI에서 완벽한 보상 조건을 아래와 같이 거리 z의 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<sub>1</sub>'과 z<sub>2</sub>'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 광섬유 구간들의 분산 계수도 반드시 서로 같을 필요가 없음을 의미한다. 그러나 식 (2)는 WDM 채널들의 파장이 다양하기 때문에 모든 파장에 적용 가능한 공통의 OPC 위치와 광섬유 구간들의 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.

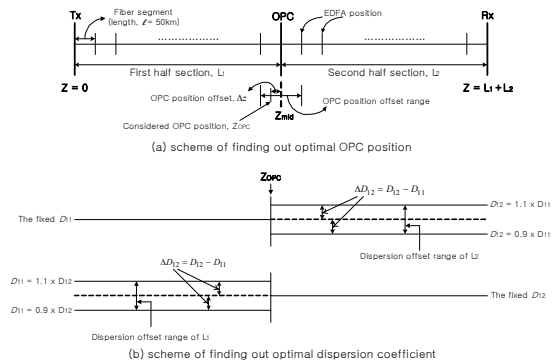
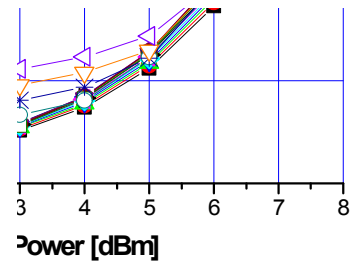


그림 4. 최적 파라미터 도출 개념도  
 Fig. 4. Schemes of finding out optimal parameters.

최적 OPC 위치는 그림 4(a)에서와 같이 OPC의 위치를 MSSI 기술에서 전체 전송 거리 중간에 앞과 뒤에 있는 증폭기 위치까지 (즉 ±50 km) 변화시키면서 이 변화



(a) 8-channels

(b) 12-channels

(c) 16-channels

(d) 20-channels

(e) 24-channels

그림 5. MSSl 기법이 채택된 WDM 시스템에서 다양한 채널수에 대한 입사 광 전력에 따른 EOP.  
 Fig. 5. EOP as a function of the launching power for various channel numbers in WDM system with MSSl.

되는 OPC 위치( $z_{OPC}$ )에 대한 특정 채널들의 보상 특성을 분석해서 찾는다. 여기서 OPC 위치와 전체 전송 거리의 중간 위치 ( $z_{mid}$ )의 차이를 OPC 위치 편차  $\Delta z$ 라고 정의하였다 (즉  $\Delta z = z_{OPC} - z_{mid}$ ). 또한 각 광섬유 구간의 최적 분산 계수 값 ( $D_{1x}, x=1,2$ )은 그림 4(b)에서와 같이 한 쪽 광섬유 구간의 분산 계수를 2 ps/nm/km로 고정해 놓은 상태에서 나머지 광섬유 구간의 분산 계수를 2 ps/nm/km의 10% 내에서 변화시키면서 이에 대한 특정 채널들의 보상 특성을 분석해서 찾는다. 여기서 각 광섬유 구간의 분산 계수 값의 차이를 분산 계수 편차 ( $\Delta D_{1x}$ )로 정의하였다. 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 정의하였다.

IV. 시뮬레이션 결과 및 검토

그림 5는 전통적 MSSl 기술이 적용된 WDM 시스템에서 다양한 채널수에 대한 입사(입력) 광 전력에 따른 전체 채널들의 눈 열림 페널티 (EOP ; eye opening penalty)를 나타낸 것이다. WDM 채널 수가 증가할수록 신호 파장이 OPC의 영 분산 파장

(zero dispersion wavelength)으로부터 멀어지는 파장들이 많아지므로 EOP 특성이 나빠지는 것을 알 수 있다. 따라서 MSSl 기술을 WDM 시스템에 직접 적용하는데 있어 채널수가 많은 시스템일수록 한계가 커지는 것을 확인할 수 있다.

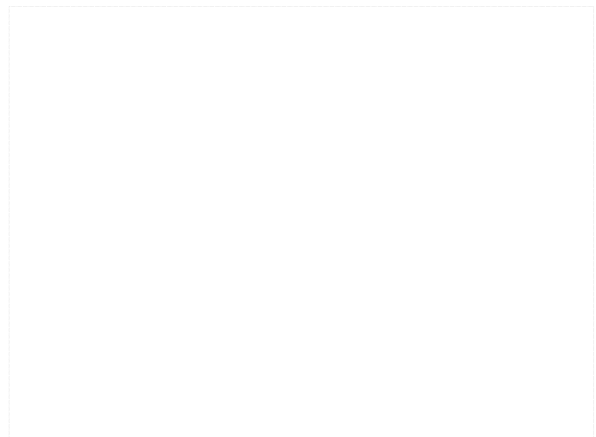


그림 6.  $\Delta D_{1x} = 0$  ps/nm/km인 경우  $\Delta z$ 에 따른 채널 1과 마지막 채널의 EOP 차이.  
 Fig. 6. EOP differences between channel 1 and final channel as a function of  $\Delta z$  for  $\Delta D_{1x} = 0$  ps/nm/km.

그림 7. 최적  $\Delta z$ 에서  $\Delta D_{12} = 0$  ps/nm/km인 경우  $\Delta D_{11}$ 에 따른 채널 1과 마지막 채널의 EOP 차이.

Fig. 7. EOP differences between channel 1 and final channel as a function of  $\Delta D_{11}$  in the case of  $\Delta D_{12} = 0$  ps/nm/km at the optimal  $\Delta z$ .

그림 8. 최적  $\Delta z$ 에서  $\Delta D_{11} = 0$  ps/nm/km인 경우  $\Delta D_{12}$ 에 따른 채널 1과 마지막 채널의 EOP 차이.

Fig. 8. EOP differences between channel 1 and final channel as a function of  $\Delta D_{12}$  in the case of  $\Delta D_{11} = 0$  ps/nm/km at the optimal  $\Delta z$ .

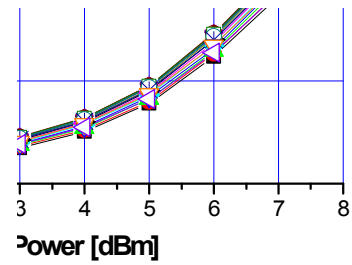
그림 6은 두 광섬유 구간의 분산 계수가 2 ps/nm/km로 고정되었을 때 OPC 위치 편차  $\Delta z$ 에 따른 채널 1과 마지막 채널의 EOP 차이를 WDM 채널수별로 나타낸 것이다. 여기서 EOP 차이를 채널 1과 마지막 채널에 대해서만 살펴보는 것은 이 두 채널의 파장 차이가 가장 크기 때문에 EOP 차이를 최소로 하는 최적 파라미터 값들이 나머지 모든 채널에도 영향을 미칠 수 있다는 이유 때문이다. 채널 1과 마지막 채널의 EOP 차이를 최소로 하는 최적 OPC 위치는 8-채널 WDM 시스템에서는 498 km (즉,  $\Delta z = -2$  km) 이고, 채널수가 4개씩 증가할

수록 1 km씩 감소하는 것을 알 수 있다.

그림 7과 8은 각각 그림 6에서 구한 최상의  $\Delta z$ 에 OPC가 위치했을 때 두 번째 광섬유 구간의 분산 계수가 2 ps/nm/km(즉,  $\Delta D_{12} = 0$  ps.nm/km)로 고정된 경우에서 첫 번째 광섬유 구간의 분산 계수 편차  $\Delta D_{11}$ 에 따른 채널 1과 마지막 채널의 EOP 차이와 첫 번째 광섬유 구간의 분산 계수가 2 ps/nm/km(즉,  $\Delta D_{11} = 0$  ps.nm/km)로 고정된 경우에서 두 번째 광섬유 구간의 분산 계수 편차  $\Delta D_{12}$ 에 따른 채널 1과 마지막 채널의 EOP 차이를 나타낸 것이다. WDM 채널수가 24개인 경우를 제외하면 OPC가 그림 6에서 구한 위치에 존재하는 경우 두 광섬유 구간의 최적 분산 계수 편차는 모두 0 ps/nm/km가 되는 것을 알 수 있다. 즉 두 광섬유 구간의 분산 계수는 서로 차이가 없어야 한다. 그러나 채널수가 24개인 WDM 시스템에서는 OPC가 494 km에 존재하는 경우 첫 번째 광섬유 구간의 최적 분산 계수 편차  $\Delta D_{11}$ 는 -0.005 ps/nm/km, 두 번째 광섬유 구간의 최적 분산 계수  $\Delta D_{12}$ 는 +0.005 ps/nm/km로 얻어졌다. 즉 두 광섬유 구간의 분산 계수는 0.005 ps/nm/km로 차이가 있어야 한다.

그림 9는 그림 6~8의 결과가 실제 WDM 시스템에 미치는 영향을 알아보기 위하여 이들 결과, 즉 최적 파라미터 값들이 적용된 WDM 시스템에서의 전체 채널에 대한 입사 광 전력에 따른 EOP를 나타낸 것이다. 앞서 구한 최적 파라미터들이 WDM 시스템에 적용되면 MSSI(그림 5의 경우)에 비해 파장이 큰 채널들의 EOP가 크게 좋아져서 WDM 채널수가 증가되더라도 전반적으로 수신 성능이 큰 폭으로 개선되는 것을 알 수 있다. 즉 1 dB EOP를 전송 성능의 기준으로 한다면 20-채널까지는 전력 페널티가 1 dB 이내가 되고 24-채널 시스템에서는 약 3 dB 정도로 감소되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 MSSI에 비교한 전력 페널티 개선 정도는 WDM 채널수가 증가할수록 더욱 커지는 것을 알 수 있다. 그러나 12-채널까지 채널수가 비교적 적은 WDM 시스템에서는 앞서 구한 최적 파라미터들의 적용에 의한 성능 개선 효과가 크지 않다는 것을 알 수 있다. 즉 본 논문에서 제안한 방법으로 구한 최적 파라미터들은 채널수가 많은 WDM 시스템에서 더욱 효과적이라는 것을 확인할 수 있다.

지금까지는 최적 파라미터들을 구하는데 있어 우선  $\Delta z$ 값을 먼저 구하고 그 값에서  $\Delta D_{11}$  또는  $\Delta D_{12}$ 를 구하



(a) 8-channels

(b) 12-channels

(c) 16-channels

(d) 20-channels

(e) 24-channels

(f) 24-channels

그림 9. 최적 파라미터들이 적용된 WDM 시스템에서 다양한 채널수에 대한 입사 광 전력에 따른 EOP.  
 Fig. 9. EOP as a function of the launching power for various channel numbers in WDM system with the optimal parameters.

그림 10.  $\Delta z = 0$  km에서  $\Delta D_{12} = 0$  ps/nm/km인 경우  $\Delta D_{11}$ 에 따른 채널 1과 마지막 채널의 EOP 차이.  
 Fig. 10. EOP differences between channel 1 and final channel as a function of  $\Delta D_{11}$  in the case of  $\Delta D_{12} = 0$  ps/nm/km at the optimal  $\Delta z = 0$  km.

는 순서를 따랐다. 이 두 파라미터들의 상관성을 알아보기 위하여 구하는 순서를 바꿔볼 필요가 있다. 그림 10과 11은 각각  $\Delta z = 0$  km라고 가정한 경우 두 번째 광섬유 구간의 분산 계수가 2 ps/nm/km(즉,  $\Delta D_{12} = 0$  ps.nm/km)로 고정된 경우에서 첫 번째 광섬유 구간의

그림 11.  $\Delta z = 0$  km에서  $\Delta D_{11} = 0$  ps/nm/km인 경우  $\Delta D_{12}$ 에 따른 채널 1과 마지막 채널의 EOP 차이.  
 Fig. 11. EOP differences between channel 1 and final channel as a function of  $\Delta D_{12}$  in the case of  $\Delta D_{11} = 0$  ps/nm/km at the optimal  $\Delta z = 0$  km.

분산 계수 편차  $\Delta D_{11}$ 에 따른 채널 1과 마지막 채널의 EOP 차이와 첫 번째 광섬유 구간의 분산 계수가 2 ps/nm/km(즉,  $\Delta D_{11} = 0$  ps.nm/km)로 고정된 경우에서 두 번째 광섬유 구간의 분산 계수 편차  $\Delta D_{12}$ 에 따른 채널 1과 마지막 채널의 EOP 차이를 나타낸 것이다. 이

두 결과를 비교해 보면,  $\Delta D_{11}$ 과  $\Delta D_{12}$ 에 대한 EOP 차이 특성이 서로 대칭적으로 나타나는 것을 알 수 있다. 즉 8-채널 WDM 시스템의 경우  $\Delta D_{12} = 0$  ps/nm/km일 때의 최적  $\Delta D_{11}$  값은 -0.015 ps/nm/km인 반면  $\Delta D_{11} = 0$  ps/nm/km일 때의 최적  $\Delta D_{12}$  값은 +0.015 ps/nm/km이고, 12-채널 WDM 시스템의 경우  $\Delta D_{12} = 0$  ps/nm/km일 때의 최적  $\Delta D_{11}$  값은 -0.020 ps/nm/km인 반면  $\Delta D_{11} = 0$  ps/nm/km일 때의 최적  $\Delta D_{12}$  값은 +0.020 ps/nm/km, 16-채널 WDM 시스템의 경우  $\Delta D_{12} = 0$  ps/nm/km일 때의

ps/nm/km일 때의 최적  $\Delta D_{12}$  값은 +0.030 ps/nm/km, 20-채널 WDM 시스템의 경우  $\Delta D_{12} = 0$  ps/nm/km일 때의 최적  $\Delta D_{11}$  값은 -0.040 ps/nm/km인 반면  $\Delta D_{11} = 0$  ps/nm/km일 때의 최적  $\Delta D_{12}$  값은 +0.040, 24-채널 WDM 시스템의 경우  $\Delta D_{12} = 0$  ps/nm/km일 때의 최적  $\Delta D_{11}$  값은 -0.050 ps/nm/km인 반면  $\Delta D_{11} = 0$  ps/nm/km일 때의 최적  $\Delta D_{12}$  값은 +0.050 ps/nm/km으로 얻어졌다. 즉 WDM 채널수가 증가할수록 광섬유 구간의 최적 분산 계수 편차가 증가해야 하는 것을 알 수 있다.

그림 12와 13은 각각 첫 번째 광섬유 구간의 최적 분산 계수가 그림 10에서 구한  $\Delta D_{11}$ 로, 두 번째 광섬유 구간의 분산 계수는 2 ps/nm/km로 고정된 경우의  $\Delta z$ 에 따른 채널 1과 마지막 채널의 EOP 차이와 두 번째 광섬유 구간의 최적 분산 계수가 그림 11에서 구한  $\Delta D_{12}$ 로, 첫 번째 광섬유 구간의 분산 계수는 2 ps/nm/km로 고정된 경우의  $\Delta z$ 에 따른 채널 1과 마지막 채널의 EOP 차이를 나타낸 것이다. 한 쪽 광섬유 분산 계수를 나머지 광섬유 분산 계수에 대해 그림 10과 11의 결과들과 같이 편차를 둔 경우 최적 OPC 위치는 WDM 채널수에 상관없이 모두 500 km(즉,  $\Delta z=0$ km)인 것을 그림 12와 13을 통해 알 수 있다.

그림 12. 최적  $\Delta D_{11}$ 에서  $\Delta D_{12} = 0$  ps/nm/km인 경우  $\Delta z$ 에 따른 채널 1과 마지막 채널의 EOP 차이  
Fig. 12. EOP differences between channel 1 and final channel as a function of  $\Delta z$  in the case of  $\Delta D_{12} = 0$  ps/nm/km under the optimal  $\Delta D_{11}$ .

그림 14는 그림 10~13의 결과들로부터 얻어진 최적 파라미터 값들이 적용된 WDM 시스템에서의 전체 채널에 대한 입사 광 전력에 따른 EOP 특성을 나타낸 것이다. 그림 14 (a), (c), (e), (g), (i)는 두 번째 광섬유 구간의 분산 계수는 2 ps/nm/km로 고정되고 첫 번째 광섬유 구간의 최적 분산 계수는 그림 10에서 구한  $\Delta D_{11}$ 로, OPC는 그림 12에서 구한  $\Delta z$ 에 위치한 경우의 EOP 특성이고, 그림 14(b), (d), (f), (h), (j)는 첫 번째 광섬유 구간의 분산 계수는 2 ps/nm/km로 고정되고 두 번째 광섬유 구간의 최적 분산 계수는 그림 11에서 구한  $\Delta D_{12}$ 로, OPC는 그림 13에서 구한  $\Delta z$ 에 위치한 경우의 EOP 특성이다. 우선 그림 14 (a), (c), (e), (g), (i)의 EOP 특성이 그림 14(b), (d), (f), (h), (j)의 EOP 특성과 비슷하게 나타나고, 그리고 이들은 이와 반대의 절차로 구해진 최적 파라미터 값들이 적용된 WDM 전체 채널들의 EOP 특성을 나타낸 그림 9의 결과들과도 매우 비슷한 것을 알 수 있다. 즉 그림 9와 14의 비교를 통해 구하는 순서가 바뀌게 되면 구체적인 최적 값들에서는 차이가 있지만

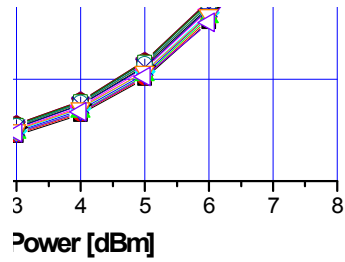
그림 13. 최적  $\Delta D_{12}$ 에서  $\Delta D_{11} = 0$  ps/nm/km인 경우  $\Delta z$ 에 따른 채널 1과 마지막 채널의 EOP 차이  
Fig. 13. EOP differences between channel 1 and final channel as a function of  $\Delta z$  in the case of  $\Delta D_{11} = 0$  ps/nm/km under the optimal  $\Delta D_{12}$ .

최적  $\Delta D_{11}$  값은 -0.030 ps/nm/km인 반면  $\Delta D_{11} = 0$

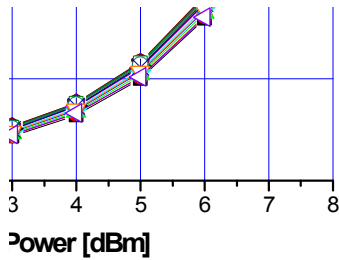
(a)  $D_{11} = 1.985 \text{ ps/nm/km}$   
&  $D_{12} = 2.0 \text{ ps/nm/km}$

(b)  $D_{11} = 2.0 \text{ ps/nm/km}$  &  
 $D_{12} = 2.015 \text{ ps/nm/km}$

(c)  $D_{11} = 1.980 \text{ ps/nm/km}$   
&  $D_{12} = 2.0 \text{ ps/nm/km}$



(d)  $D_{11} = 2.0 \text{ ps/nm/km}$  &  
 $D_{12} = 2.020 \text{ ps/nm/km}$



(e)  $D_{11} = 1.970 \text{ ps/nm/km}$   
&  $D_{12} = 2.0 \text{ ps/nm/km}$

(f)  $D_{11} = 2.0 \text{ ps/nm/km}$  &  
 $D_{12} = 2.030 \text{ ps/nm/km}$

(g)  $D_{11} = 1.960 \text{ ps/nm/km}$   
&  $D_{12} = 2.0 \text{ ps/nm/km}$

(h)  $D_{11} = 2.0 \text{ ps/nm/km}$  &  
 $D_{12} = 2.040 \text{ ps/nm/km}$

(i)  $D_{11} = 1.950 \text{ ps/nm/km}$   
&  $D_{12} = 2.0 \text{ ps/nm/km}$

(j)  $D_{11} = 2.0 \text{ ps/nm/km}$  &  
 $D_{12} = 2.050 \text{ ps/nm/km}$

그림 14. 최적 파라미터들이 적용된 WDM 시스템에서 다양한 채널수에 대한 입사 광 전력에 따른 EOP.  
Fig. 14. EOP as a function of the launching power for various channel numbers in WDM system with the optimal parameters.

이들 최적 파라미터 값들이 적용된 WDM 시스템에서 의 전체 채널의 보상 특성에는 큰 영향이 없음을 확인



할 수 있다.

표 2. 채널수별 OPC 위치 편차 1 km 당 광섬유 구간의 최적 분산 계수 값

Table. 2. Optimal dispersion coefficient values of fiber sections per OPC position offset of 1 km for various channel numbers.

채널수	km 당 최적 $\Delta D_{1x}$ 값
8	$\pm 0.0075$ ps/nm/km
12	$\pm 0.0067$ ps/nm/km
16	$\pm 0.0075$ ps/nm/km
20	$\pm 0.0080$ ps/nm/km
24	$\pm 0.0075$ ps/nm/km

지금까지 구한 결과들을 종합 분석하여 얻을 수 있는 중요한 사실은 두 가지 서로 다른 순서로 구한 최적 파라미터 값들을 이용하면 OPC를 이용한 WDM 시스템을 융통적으로 설계할 수 있다는 것이다. 이러한 내용을 첫 번째 광섬유 구간의 분산 계수 값이 2 ps/nm/km로 고정된 경우의 16-채널 WDM 시스템의 예를 가지고 설명하면 아래와 같다. 그림 8에서 OPC가 496 km에 존재하고 첫 번째 광섬유 구간의 분산 계수가 2 ps/nm/km로 고정된 경우 두 번째 광섬유 구간의 최적  $\Delta D_{12}$ 은 0 ps/nm/km인 반면 그림 13에서 OPC가 500 km에 존재하고 첫 번째 광섬유 구간의 분산 계수가 2 ps/nm/km로 고정된 경우 두 번째 광섬유 구간의 최적  $\Delta D_{12}$ 은 +0.03 ps/nm/km로 얻어졌다. 그리고 이 두 경우에서의 전체 WDM 채널의 EOP 특성이 비슷하게 얻어졌다. 이 두 경우를 관련지어 보면, OPC를 500 km가 아닌 다양한 위치에 두고 16-채널 WDM 시스템을 설계하고자 할 때, OPC를 500 km에서  $\pm 1$  km만큼 이동시키면 두 번째 광섬유 구간의 최적 분산 계수 값을 그에 상응하여 2.03 ps/nm/km로부터  $\pm 0.0075$  ( $=0.03/4$ ) ps/nm/km만큼 변화시켜야 한다는 사실을 얻을 수 있다. 즉 예를 들어, OPC를 490 km ( $\Delta z = -10$  km)에 위치시켜 모든 WDM 채널에 대한 최상의 보상을 얻고자 한다면 두 번째 광섬유 구간의 분산 계수를  $1.955$  ( $=2.03+(0.0075 \times (-10))$ ) 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  $2.1415$  ( $=2.03+(0.0075 \times 15)$ ) ps/nm/km로 설정하면 WDM 채널 모두를 그림 9 (c), 그림 14 (e)와 그림 14 (f)에서와 같이 양호하게 보상할 수 있을 것이다. 물론 두 번째 광섬유

분산 계수 값이 2 ps/nm/km로 고정된 경우 OPC 위치 변화에 따른 첫 번째 광섬유 구간의 최적 분산 계수 값을 구하는 것에도 이러한 사실은 성립한다.

이러한 분석을 16-채널 WDM 시스템 외에 다른 채널수의 WDM 시스템에 적용했을 때 OPC 위치 편차 1 km 당 그에 상응하는 최적 광섬유 분산 계수 값들을 표 2에 정리해 놓았다. 표 2에서 ‘+’는 첫 번째 광섬유 구간의 분산 계수가 2 ps/nm/km로 고정된 경우 두 번째 광섬유 구간의 최적 분산 계수 편차 값이고, ‘-’는 두 번째 광섬유 구간의 분산 계수가 2 ps/nm/km로 고정된 경우 첫 번째 광섬유 구간의 최적 분산 계수 편차 값이다.

## V. 결 론

WDM 시스템에서 발생된 신호 왜곡을 OPC를 이용하여 보상하는 기술에서 OPC를 중심으로 광 전력과 색 분산을 대칭화시키는 방법은 WDM 채널수에 상관없이 OPC의 이동과 그에 따른 광섬유 구간의 최적 분산 계수 값의 적용을 통해 대체될 수 있다는 것을 확인하였다.

본 논문에서 도출된 결과들을 통해 모든 채널의 효과적 보상을 수행하기 위한 최적 OPC 위치 편차와 광섬유 구간의 최적 분산 계수 값은 WDM 채널수에 비례하여 증가해야 한다는 것을 확인하였다. 그러나 최적 OPC 위치 편차와 광섬유 구간의 최적 분산 계수 값들이 동시에 증가해야 하기 때문에 OPC 위치 이동 km 당 그에 상응하는 최적 광섬유 분산 계수 값은 채널수에 관계없이  $\pm 0.0075$  ps/nm/km 정도로 거의 비슷하다는 것을 확인하였다.

본 논문에서 도출한 WDM 채널수에 따른 OPC 위치 이동 km 당 그에 상응하는 최적 광섬유 분산 계수 값은 OPC가 전체 전송 거리 중간이 아닌 다른 곳에서 위치시켜도 모든 채널의 왜곡을 최상으로 보상할 수 있다는 것을 의미하기 때문에 위치에 크게 종속받지 않는 OPC를 이용한 유연한 WDM 시스템 설계를 가능하게 할 것이다.

## 참 고 문 헌

- [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] 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] 이성렬, "비영 분산 천이 광섬유를 갖는 WDM 시스템에서 광위상 공액기에 의한 왜곡된 광 신호의 보상", *한국전자과학회논문지*, 제 17권 6호, pp. 546~555, 2006. 6. 30
- [6] 이성렬, 임황빈, "비영 분산 천이 광섬유를 갖는 320 Gbps WDM 시스템에서 최적화를 통한 비트 에러율 개선", *한국항행학회논문지*, 제 10권 2호, pp. 103~112, 2006. 6. 30
- [7] 이성렬, "광 위상 공액기를 이용한 최적화된 640 Gbps WDM 시스템의 보상 특성", *한국항행학회논문지*, 제 10권 2호, pp. 159~166, 2006. 6. 30
- [8] 이성렬, "비 영 분산 천이 광섬유를 갖는 8×40 Gbps WDM 시스템에서 개량된 MSSI 기법을 이용한 왜곡된 RZ 신호의 보상", *한국항행학회논문지*, 제 10권 3호, pp. 205~212, 2006. 9. 30
- [9] 이성렬, "비영 분산 천이 광섬유를 갖는 WDM 시스템에서 광위상 공액기의 최적 파라미터를 이용한 비트 에러율 개선", *한국해양정보통신학회논문지*, 제 10권 10호, pp. 1854~1862, 2006. 10. 30
- [10] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, 2001.
- [11] 이성렬, 김지웅, 손성찬, "320 Gbps 강도 변조 직접 검파 WDM 채널 보상에서 상호 위상 변조의 영향", *한국해양정보통신학회논문지*, 제 8권 6호, pp. 1134~1140, 2004.
- [12] 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.

- [13] G. P. Agrawal, *Fiber-optic communication systems*, John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [14] ITU Recommendation "Spectral grids for WDM applications : DWDM frequency grid" G.694.1, 2006.

### 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

### 정 재 필 (鄭在弼)



1985년 2월 : 단국대학교 전자공학과 졸업 (공학사)

1989년 8월 : 단국대학교 대학원 전자공학과 졸업 (공학석사)

2000년 8월 : 한국항공대학교 대학원 통신정보공학과 졸업 (공학박사)

1989년~1990년 : (주)동양전자통신 중앙연구소

1990년 - 1992년 : (주)KEFICO 기술연구소

1994년 - 현재 : 가천의과학대학교 IT학과 부교수

관심분야 : 이동 및 무선통신, 영상통신, WDM시스템