

# 채널 간격이 일정한 WDM 전송에서의 Mid-Span Spectral Inversion을 이용한 보상 특성

## Characteristics of Compensation for WDM Transmission with Equally Spaced Channels using Mid-Span Spectral Inversion

이 성 렬 · 임 황 빈\*

Seong-Real Lee · Hwang-Bin Yim\*

### 요 약

채널 간격이 100 GHz로 일정하고 채널 비트율이 40 Gbps인 16-채널 WDM 시스템에 MSSI(Mid-Span Spectral Inversion) 기법을 적용한 경우의 4-광파 혼합(FWM: Four-Wave Mixing)에 의해 왜곡된 채널 신호의 보상 특성을 살펴보았다. MSSI를 통한 광대역 보상을 위해 광 위상 공액기(OPC: Optical Phase Conjugator)의 비선형 매질로 HNL-DSF(Highly-Nonlinear Dispersion Shifted Fiber)를 사용하였다. 우선 MSSI 기법을 이용하면 FWM에 의한 채널 간섭의 영향을 모든 채널에 걸쳐 특정 입력 전력 범위 내에서 비슷한 특성으로 줄일 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 OPC에 의해 생성되는 공액파 전력이 입력 신호파 전력에 비해 작은 장파장 채널들은 광섬유의 분산 계수가 커질수록 보상의 정도가 줄어드는 것도 알 수 있었다. 즉 분산 계수가 비교적 적은 광섬유를 통해 채널 간격이 일정한 WDM 채널들을 특정 전력 이내에서 양호한 품질로 전송하는데 HNL-DSF를 이용한 MSSI 보상 기법이 효과적이라는 것을 확인할 수 있었다.

### Abstract

In this paper, we investigated the compensation characteristics of distorted 16-channel WDM signal due to chromatic dispersion, self phase modulation(SPM) and four-wave mixing(FWM). The bit rate and uniform frequency spacing of WDM channels are assumed to be 40 Gbps and 100 GHz, respectively. The compensation method used in this approach is mid-span spectral inversion(MSSI). Highly-nonlinear dispersion shifted fiber(HNL-DSF) is used as a nonlinear medium of optical phase conjugator(OPC) in order to widely compensate WDM signal band. We confirmed that applying MSSI in WDM channels within special input power level compensates overall interferenced channels mainly due to FWM. But, for long wavelength WDM channels having lower conjugated light power with respect to signal light power, compensation quality is deteriorated as dispersion coefficient of fiber becomes higher. Consequently, we confirmed that it is effective to apply MSSI with HNL-DSF as a nonlinear medium of OPC to WDM transmission link with relative small dispersion, in order to compensate equally spaced WDM channels.

Key words : Optical Phase Conjugator(OPC), Highly-Nonlinear Dispersion Shifted Fiber(HNL-DSF), Four-Wave Mixing(FWM), Mid-Span Spectral Inversion(MSSI), Inter-channel Interference(ISI)

### I. 서 론

장거리 초고속 광 전송 시스템에서 Kerr 효과와 그룹 속도 분산(GVD: Group Velocity Dispersion)의

· 목포해양대학교 해양전자·통신공학부(Div. of Marine Electro. and Comm. Eng., Mokpo National Maritime University)

\* 강원도립대학 정보통신과(Dept. of Inform. & Comm. Eng., Gangwon Provincial University)

· 논문 번호 : 20040422-052

· 수정완료일자 : 2004년 5월 25일

상호 작용에 의한 파형의 왜곡은 시스템의 전송 능력을 제한한다<sup>[1]</sup>. 이러한 한계를 극복하기 위하여 과거 수년 동안 진행된 여러 방법 중<sup>[2]-[4]</sup>에서도 광 솔리톤 전송에 필적할만한 방법으로 전송로 중간에 광 위상 공액기(OPC: Optical Phase Conjugator)를 사용하는 MSSI(Mid-Span Spectral Inversion)<sup>[5],[6]</sup>가 있다.

파장 분할 다중(WDM: Wavelength Division Multiplexing) 시스템을 이용하여 다수의 채널을 장거리 전송하기 위해서는 매우 높은 입사 전력과 낮은 분산 계수를 갖는 광섬유가 필수적이어야 한다. OPC의 비선형 매질로 HNL-DSF(Highly Nonlinear Dispersion Shifted Fiber)를 사용하고, OPC에 의해 생성되는 공액파 전력이 신호와 전력과 같아지도록 OPC의 펌프 신호 전력을 결정하면 분산 천이 광섬유(DSF: Dispersion Shifted Fiber)로 구성된 전송 링크를 통해 대용량 WDM 채널들의 고전력 전송이 가능하다는 것을 앞선 연구들을 통해 확인하였다<sup>[7],[8]</sup>.

그러나 WDM 채널들은 4-광파 혼합(FWM: Four-Wave Mixing) 현상을 통해 새로운 주파수의 광 신호를 발생시켜 원 신호 채널에 간섭을 일으킨다. 특히 DSF처럼 분산 값이 적은 광섬유에서는 FWM 효과가 WDM 시스템의 전송 품질 저하에 영향을 주는 주된 요인이 되고 있다. 따라서 대용량 WDM 전송을 위해서는 채널 간 FWM의 영향을 최소화시키는 방법이 필요한데, 현재 채널 간 파장 간격을 다르게 하는 방법(UECS: Unequal Channel Spacing)이 제안되었다<sup>[9]</sup>. 그러나 이 방법은 채널 간격을 일정하게 한 방법에 비해 필요 대역폭이 커져야 한다는 단점을 갖고 있다.

참고문헌 [7]과 [8]은 UECS가 적용된 WDM 시스템에서, 즉 FWM이 고려되지 않고 색 분산, 자기 위상 변조(SPM: Self Phase Modulation), 상호 위상 변조(XPM: Cross Phase Modulation) 등이 MSSI에 미치

는 영향을 분석한 것이다. 본 논문에서는 FWM에 의한 채널 간섭이 존재하는 채널 비트율이 40 Gbps인 16-채널 WDM 시스템에 MSSI 기법이 적용된 경우의 보상 특성을 채널 입력 전력, 광섬유 분산 계수, 전송 거리 변화에 따라 살펴보고자 한다. 수신 성능 평가 파라미터로 눈 열림 패널티(EOP: Eye Opening Penalty)를 이용했고, 비선형 쉬퍼딩저 방정식을 단계 분할 푸리에(SSF: Split-Step Fourier) 기법<sup>[10]</sup>에 따라 수치적으로 분석하였다.

## II. PAIA MSSI 기법을 채택한 16×40 Gbps WDM 시스템 모델

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  $j$ 번째 신호파의 포락선  $A_j$ 는 아래 방정식을 따라 전파한다<sup>[10]</sup>.

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

여기서  $\alpha$ 는 광섬유의 손실 계수,  $\lambda_j$ 는  $j$ 번째 채널 신호 파장,  $\beta_{2j}$ 는 광섬유의 색 분산 파라미터,  $\beta_{3j}$ 는 3차 색 분산 파라미터,  $\gamma_j$ 는 비선형 계수,  $T = t - z/v_j$ 이다. 식 (1)의 우변의 마지막 두 번째 항은 SPM을, 첫 번째 항은  $k$ 번째 채널과의 XPM을 각각 초래한다. 본 논문에서는 시뮬레이션 과정을 간략화시키기 위하여 식 (1)의 우변의 마지막 항을 무시하였다.

WDM 전송 링크인 광섬유(DSF)에서의 분산 계수 값( $D_{1i}$ , 여기서  $i=1, 2$ 로 각각 DSF 1과 2를 의미)은 분산 계수 크기에 따른 보상 특성을 확인하고자 우선 1,550 nm 파장에서 아래의 표 1과 같이 0.4

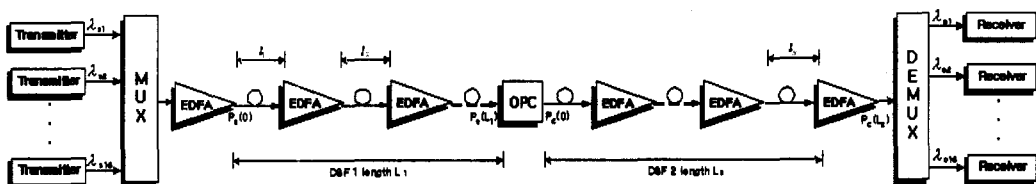


그림 1. 16×40 Gbps WDM 시스템 시뮬레이션 모델  
Fig. 1. Simulation model of 16×40 Gbps WDM system.

ps/nm/km와 1.6 ps/nm/km 두 가지로 가정하였고, 각 채널의 분산 파라미터는 채널이 갖는 파장에 따라 식 (2)와 같이 되도록 가정하였다.

$$\beta_{2j} = -\frac{\lambda_j^2}{2\pi c} D_{1j},$$

$$\beta_{3j} = \frac{\lambda_j^3}{(2\pi c)^2} \left( D_{1j} + \lambda_j \frac{\partial D}{\partial \lambda} \right) \quad (2)$$

여기서,  $\partial D/\partial \lambda$ 는 분산 기울기로 본 논문에서는 DSF의 전형적인 값인 0.08 ps/nm<sup>2</sup>/km로 하였다.

송신부에서의 각 레이저 다이오드는 서로 독립적인 40 Gbps 128(=2<sup>7</sup>) PRBS(Pseudo Random Bit Sequence)에 의해 강도 변조되는 것으로 가정하였다. 이 때 외부 광 변조기로부터 발생하는 출력 전계 강도는 아래 식으로 표현되는 2차 가우시안 펄스로 모델링 하였다.

$$A(0, t) = \sqrt{P_0} \exp \left[ -\frac{(1+iC)}{2} \left( \frac{t}{t_0} \right)^{2m} \right] \quad (3)$$

여기서  $P_0$ 는 입력 광 전력,  $m$ 은 광 펄스의 차수,  $t_0$ 는 반치폭이다<sup>[10]</sup>. 본 논문에서는 변조 파형의 형식을 펄스의 반치폭이  $1/1.825 \times R_b$ 인 NRZ로 하였다. 또한 주파수 칩(frequency chirp) 파라미터  $C$ 는 0으로 설정하였다.

수신부는 역다중화 장치에서 필터링 되어 입력되는 채널 신호를 5 dB 잡음 지수의 EDFA를 통해 증폭한 후 PIN 다이오드로 광 신호 전력을 전류로 변환하고 1 nm의 대역폭으로 펄스를 정형하는 버터워스 필터(Butterworth filter), 클럭 재생기(clock recovery), 판별 회로(decision circuit)를 거쳐 '0'과 '1'의 전기적 신호를 검출하는  $0.65 \times R_b$ 의 수신 대역폭을 갖는 직접 검파 방식의 수신기로 모델링 하였다<sup>[11]</sup>.

그림 1의 WDM 시스템에서 광대역 채널 보상을 위해서는 OPC가 시스템 전체 대역폭에 걸쳐 평탄한 변환 특성을 가져야 한다. 전통적인 DSF 대신에 적은 분산 기울기(dispersion slope)를 갖는 HNL-DSF를 사용함으로써 넓은 대역에 걸치는 각기 다른 파장의 신호들이 같거나 거의 비슷한 변환 효율(conversion efficiency)의 공액파로 변환되고, 그 결과 고품질 광대역 WDM 시스템 구현이 가능하다는 것을 참고문헌 [12]를 통해 확인하였다.

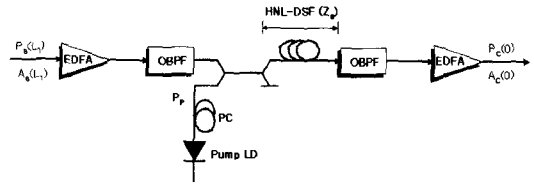


그림 2. HNL-DSF를 이용한 광 위상 공액기 구조  
Fig. 2. Optical phase conjugator using highly-nonlinear dispersion shifted fiber.

그림 2는 HNL-DSF를 이용한 OPC의 구조를 나타낸 것이다. 첫 번째 광 링크를 전파해 OPC에 입력된 파장  $\lambda_s$ 를 갖는 신호 광  $A_s$ 는 첫 번째 EDFA에 의해 증폭되고, 파장  $\lambda_p$ 의 펌프 광과 결합된다. 결합된 광파는  $\lambda_0$ 의 ZDW를 갖는 HNL-DSF로 들어가고 결과적으로 FWM 현상을 통해 공액파가 생성된다. 이렇게 얻어진 위상 공액파의 파장은  $\lambda_c = 1/(2/\lambda_p - 1/\lambda_s)$ 이다. 이 광파는 대역 통과 필터

표 1. 광섬유와 HNL-DSF를 이용한 OPC의 시뮬레이션 파라미터

Table 1. Simulation parameters of fiber and OPC using HNL-DSF.

파라미터		기호 및 값
광 섬 유	형태	conventional DSF
	DSF1의 손실	$\alpha_1 = 0.2$ dB/km
	DSF2의 손실	$\alpha_2 = 0.2$ dB/km
	전체 전송 길이	variable ( $L_1 = L_2$ )
	DSF1과 DSF2의 분산 계수	$D_{11} = D_{12} = 0.4, 1.6$ ps/nm/km
	비선형 굴절 계수	$n_2 = 2.36 \times 10^{-26}$ km <sup>2</sup> /W
	유효 코어 직경	$A_{eff} = 50$ $\mu$ m <sup>2</sup>
	EDFA의 개수	variable
	EDFA 간격(광섬유 간격)	$l = 50$ km
광 위 상 공 액 기	HNL-DSF 손실	$\alpha_o = 0.61$ dB/km
	HNL-DSF 비선형 계수	$\gamma_o = 20.4$ W <sup>-1</sup> km <sup>-1</sup>
	HNL-DSF 길이	$z_o = 0.75$ km
	HNL-DSF의 영 분산 파장	$\lambda_0 = 1550.0$ nm
	HNL-DSF 분산 기울기	$dD_o/d\lambda = 0.032$ ps/nm <sup>2</sup> /km
	펌프 광 파장	$\lambda_p = 1549.5$ nm
펌프 광 전력	$P_p = 18.5$ dBm	

(OBPF: Optical Band Pass Filter)에 의해 특정 대역으로 여파되고, EDFA에 의해 증폭된 후 나머지 전송 링크로 입력된다.

표 1에 본 논문에서 사용한 HNL-DSF OPC 파라미터 값들<sup>[12]</sup>을 나타냈다. 표 1에서 펌프 광 전력을 18.5 dBm으로 선택한 것은 이 값에서 광대역에 걸쳐 있는 채널들이 매우 양호하게 보상되기 때문이다<sup>[7,8]</sup>. OPC의 비선형 매질에서 생성된 FWM 광의 전력과 입력 신호 전력의 비는 변환 효율로 정의된다<sup>[13]</sup>. 표 1의 파라미터를 사용하여 계산한 결과 최대 변환 효율 값은 0.18 dB이고, HNL-DSF OPC의 3-dB 대역폭은 34 nm(1532.5~1566.5 nm)로 얻어졌다<sup>[14]</sup>.

### III. 4-광파 혼합

FWM 현상은 실리카 광섬유에서의 3차 비선형 현상의 대표적인 것으로 전자 시스템의 상호 변조 현상과 유사하다. 즉 FWM 과정을 통해  $f_i$ ,  $f_j$ ,  $f_k$  ( $\neq f_j$ )의 주파수를 갖는 3 채널의 광 신호들이 서로 혼합하여

$$f_F = f_{ijk} = f_i + f_j - f_k \quad (4)$$

의 관계로 새로운 4번째 광 신호를 발생시킨다.

그림 3은 채널 간격( $\Delta f$ )이 일정한  $i, j, k=1, 2, 3$ 의 3 채널 전송 시 FWM 과정에 의해 발생된 FWM 광의 신호를 나타낸 것이다. 이 경우 9개의 새로운 신호가 발생되지만 이들 중  $f_{223}$ ,  $f_{132}$ ,  $f_{312}$  그리고  $f_{221}$ 의 4개의 신호가 원래의 정보 채널에 간섭을 일으키고, 항상 중간 채널에서 간섭의 영향이 가장 심한 것을 알 수 있다.

채널 간격이 일정한 WDM 채널의 개수가  $N$ 이고,  $f_m$ 을  $m$ -번째 채널의 주파수라고 하면  $m$ -번째 채널

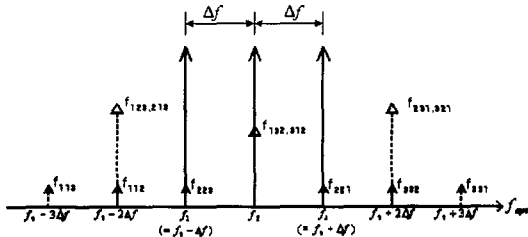


그림 3. 3-채널 입력 신호에 의한 FWM 광  
Fig. 3. FWM light from the 3-channel input signal.

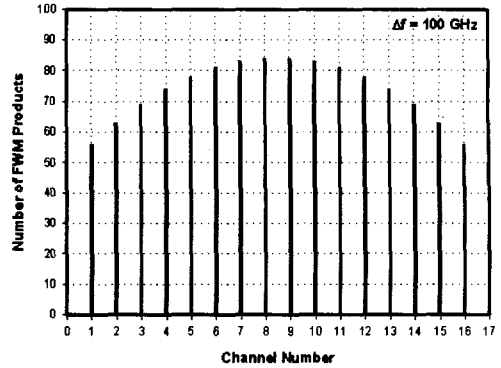


그림 4. 16-채널 WDM 시스템에서 FWM 광의 개수  
Fig. 4. Number of FWM products in 16-channel WDM system.

과 같은 주파수의 FWM 광의 전체 개수( $S$ )는 아래 식과 같이 구할 수 있다<sup>[15]</sup>.

$$S = \frac{N^2}{4} + \frac{Nm}{2} - \frac{m^2}{2} - N + \frac{m}{2} \quad (5)$$

(when  $N$  is even)

$$S = \frac{N^2-1}{4} + \frac{Nm}{2} - \frac{m^2}{2} - N + \frac{m}{2} \quad (6)$$

(when  $N$  is odd and  $m$  is even)

$$S = \frac{N^2+1}{4} + \frac{Nm}{2} - \frac{m^2}{2} - N + \frac{m}{2} \quad (7)$$

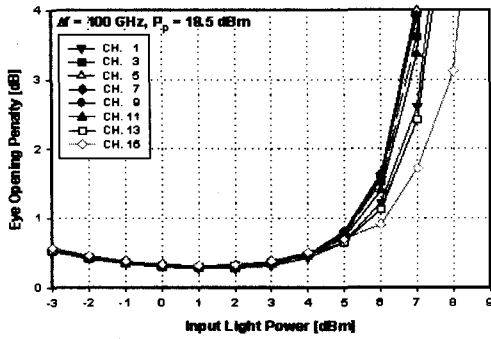
(when  $N$  is odd and  $m$  is odd)

그림 4는 16-채널 WDM 시스템에서 각 채널과 같은 주파수의 FWM 광의 개수를 나타낸 것이다. 8번째 채널과 9번째 채널에 간섭을 발생시키는 FWM 광 신호의 개수가 84개로 가장 많은 것을 알 수 있다.

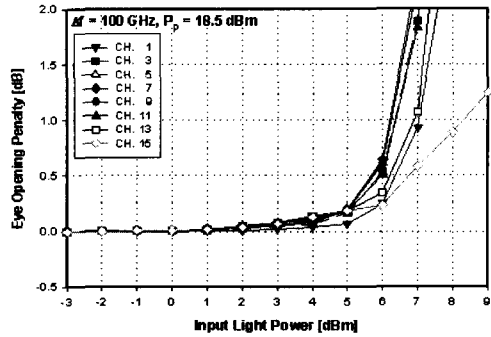
본 논문에서는 16개의 WDM 채널 파장이 1550.0 nm부터 1562.0 nm까지 0.8 nm( $\Delta f=100$  GHz) 간격으로 채널 순서대로 분포하도록 설정하여 시뮬레이션 하였다.

### IV. 시뮬레이션 결과 및 검토

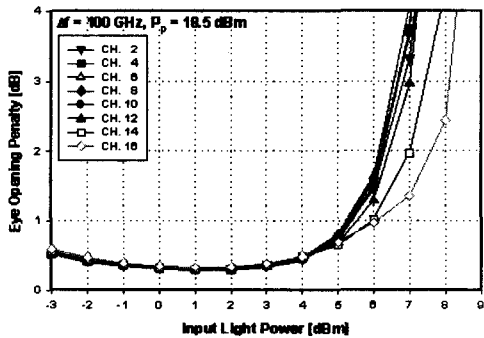
그림 5는 광섬유의 분산 계수가 0.4 ps/nm/km이고, 전송 거리가 1,000 km인 MSSJ 기법이 적용된 16-채널 WDM 시스템에서 색 분산, SPM에 의한 채널 왜곡 외에 FWM에 의한 채널 간섭이 존재하는 경우 입력 신호 전력 변화에 따른 눈 열림 패널티로, 그림 5(a)와 (c)는 back-to-back 시스템에서의 눈 열림 값을 기준으로 나타낸 것이고, 그림 5(b)와 (d)는 동일한



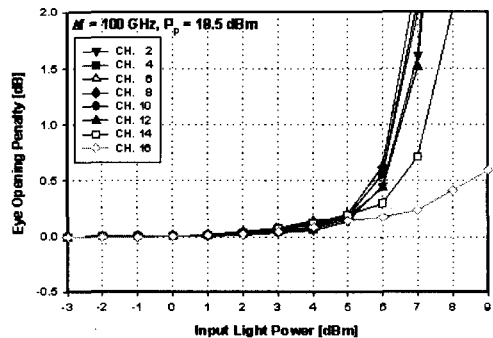
(a) Back-to-back 기준 EOP: 홀수번째 채널  
(a) EOP comparing with back-to-back: odd channels



(b) FWM이 없는 경우 기준 EOP: 홀수번째 채널  
(b) EOP comparing with FWM-free: odd channels



(c) Back-to-back 기준 EOP: 짝수번째 채널  
(c) EOP comparing with back-to-back: even channels



(d) FWM이 없는 경우 기준 EOP: 짝수번째 채널  
(d) EOP comparing with FWM-free: even channels

그림 5. 광섬유의 분산 계수가 0.4 ps/nm/km인 경우 입력 전력 변화에 따른 눈 열림 페널티  
Fig. 5. Eye opening penalty as a function of the input signal light power for  $D = 0.4$  ps/nm/km.

전송 거리에서 FWM에 의한 채널 간섭은 없다고 가정된 경우의 눈 열림 값을 기준으로 나타낸 것이다. 그림 5(a)와 (c)를 통해 FWM에 의한 채널 간섭이 존재하더라도 MSSI 기법이 적용되면 입력 전력 5 dBm 이하의 모든 채널을 1 dB EOP의 양호한 품질로 전송시킬 수 있는 것을 확인할 수 있다.

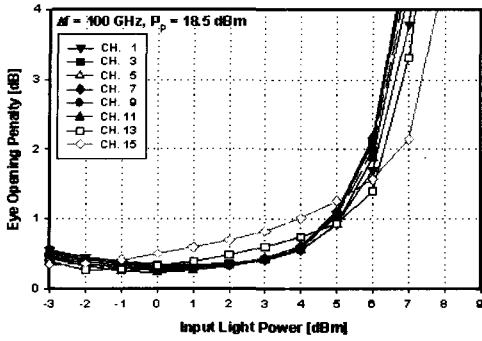
FWM에 의한 간섭이 존재하는 채널들에 대한 MSSI 보상 특성 분석은 그림 5(b)와 (d)를 통해 가능한데 채널들의 입력 전력이 매우 커지면 FWM에 의한 채널 간섭 정도가 증가하여 왜곡된 채널들을 보상하는 데 있어, 특히 간섭을 일으키는 같은 주파수의 FWM 광의 개수가 상대적으로 많은 중간 채널들에서 MSSI가 큰 효과를 나타내지 못하는 것을 알 수 있다.

즉 그림 5의 결과는 장거리 대용량 WDM 시스템에서 광섬유의 색 분산, SPM에 의한 신호 왜곡 외에

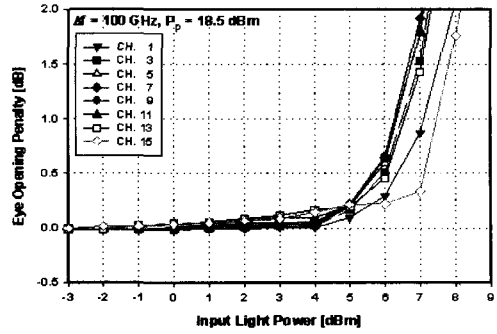
FWM에 의한 채널 간섭이 존재하더라도 모든 채널들의 입력 전력이 WDM 채널 수에 관계해 특정 레벨 이하로 제한된다면 MSSI에 의한 보상을 통해 고품질 전송이 가능하다는 것을 의미한다.

그림 6은 광섬유의 분산 계수가 1.6 ps/nm/km이고, 나머지 파라미터는 그림 5와 같은 경우에서 입력 신호 전력 변화에 따른 눈 열림 페널티를 나타낸 것이다. 우선 그림 5(b)와 (d)의 결과와 마찬가지로 MSSI가 적용되더라도 채널들의 입력 전력이 5 dBm 이상으로 커지면 FWM에 의한 채널 간섭의 보상은 큰 효과가 없는 것을 그림 6(b)와 (d)를 통해 알 수 있다.

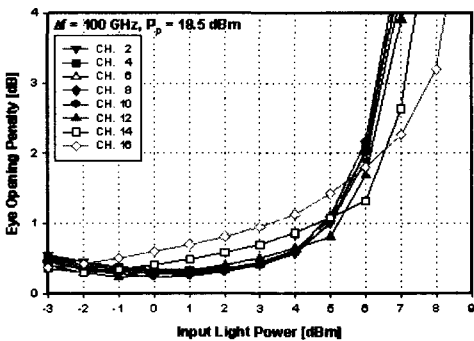
그러나 1 dB EOP를 나타낼 수 있는 입력 전력의 크기는 그림 5(a)와 (c)의 결과에 비해 2 dB 정도 감소되는 것을 알 수 있다. 이는 앞선 연구에서의 결과와 같이 WDM 채널들이 HNL-DSF OPC의 3-dB 대역



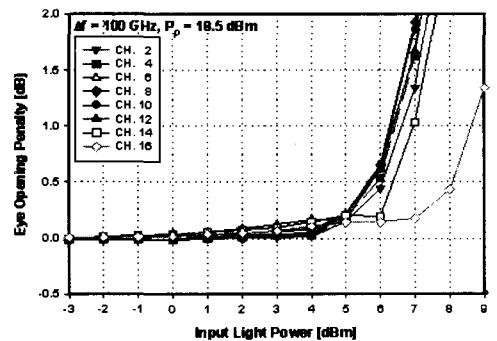
(a) Back-to-back 기준 EOP: 홀수번째 채널  
(a) EOP comparing with back-to-back: odd channels



(b) FWM이 없는 경우 기준 EOP: 홀수번째 채널  
(b) EOP comparing with FWM-free: odd channels

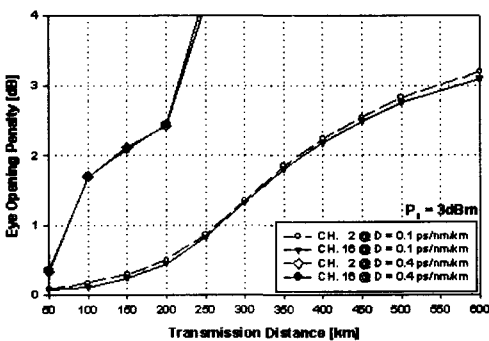


(c) Back-to-back 기준 EOP: 짝수번째 채널  
(c) EOP comparing with back-to-back: even channels

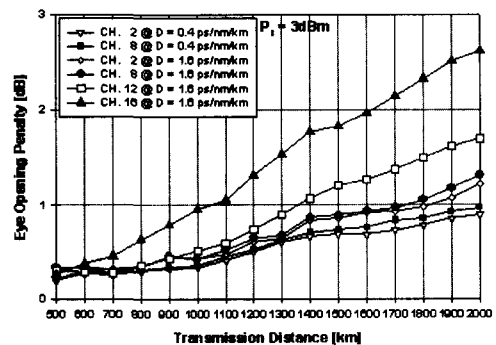


(d) FWM이 없는 경우 기준 EOP: 짝수번째 채널  
(d) EOP comparing with FWM-free: even channels

그림 6. 광섬유의 분산 계수가 1.6 ps/nm/km 인 경우 입력 전력 변화에 따른 눈 열림 패널티  
Fig. 6. Eye opening penalty as a function of the input signal light power for  $D = 1.6$  ps/nm/km.



(a) OPC가 없는 경우  
(a) Without OPC



(b) OPC가 적용된 경우  
(b) With OPC

그림 7. 전송 거리에 따른 눈 열림 패널티  
Fig. 7. Eye opening penalty as a function of transmission length.

폭 내에 속하는 파장을 갖지만 채널 번호가 높을수록 OPC를 통해 변환되어 두 번째 광섬유로 입사되

는 공액파의 전력이 다른 채널에 비해 상대적으로 낮아지기 때문에 발생한 것이다<sup>[15]</sup>. 즉 각기 다른 채

널 파장에 의한 HNL-DSF OPC에서의 공액파 변환 효율 변동에 기인하는 MSSI 본연의 한계 때문에 발생한 것이다.

그림 7은 MSSI 기법이 적용되지 않은 경우와 MSSI 기법이 적용된 경우에서 전송 거리에 따른 특정 채널의 눈 열림 패널티이다. MSSI를 적용하지 않은 경우 1 dB EOP 기준으로 분산 계수가 0.1 ps/nm/km인 광섬유에서는 250 km까지 전송이 가능하고, 분산 계수가 0.4 ps/nm/km인 광섬유에서는 수십 km 정도 전송이 가능하다. 반면 WDM 전송 링크에 MSSI가 적용되면 분산 계수가 1.6 ps/nm/km인 광섬유에서도 1,000 km까지 전송시킬 수 있다.

MSSI가 적용된 경우(그림 7(b)) 분산 계수가 비교적 낮은 WDM 시스템에서의 모든 채널에 대한 전송 거리에 따른 보상 정도와 분산 계수가 높은 WDM 시스템에서 HNL-DSF OPC가 두 번째 광섬유로 입사시키는 공액파 전력의 크기를 첫 번째 광섬유에 입사된 신호파 전력의 크기와 거의 비슷하게 생성시키는 채널들(채널 2와 8)에 대한 보상 정도는 거의 비슷하다. 그러나 분산 계수가 높은 WDM 시스템에서 HNL-DSF OPC에 의해 생성되는 공액파 전력이 상대적으로 작은 채널들의 보상의 정도는 감소되어 결과적으로 1 dB EOP를 얻을 수 있는 전송 거리가 짧아지는 것을 알 수 있다.

즉 FWM에 의한 간섭이 존재하더라도 WDM 채널들이 레벨 제한되어 있기 때문에(그림 7은 채널 입력 전력을 3 dBm이라고 설정한 경우의 결과이다) MSSI에 의해 이를 보상할 수 있지만 공액파 전력이 신호파 전력보다 매우 낮은 채널들은 MSSI의 본질적 한계에 의해 최대 전송 거리가 짧아질 수밖에 없다는 것을 알 수 있다.

## V. 결 론

지금까지 FWM에 의한 채널 간섭이 존재하는 채널 비트율이 40 Gbps인 16-채널 WDM 시스템에서의 MSSI의 보상 특성을 채널 입력 전력, 광섬유 분산 계수, 전송 거리 변화에 따라 살펴보았다.

우선 광섬유의 색 분산, SPM에 의한 신호 왜곡 외에 FWM에 의한 채널 간섭이 존재하더라도 모든 채널들의 입력 전력이 WDM 채널 수에 관계해 특정

레벨 이하로 제한되어 있다면 광섬유의 분산 계수 값에 크게 상관없이 MSSI에 의한 보상을 통해 고품질 전송이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

하지만 광섬유의 분산 계수가 큰 WDM 시스템에서 OPC에 의해 생성되는 공액파 전력이 신호파 전력에 비해 작은 채널들은 MSSI의 본질적 한계 때문에 공액파 전력이 신호파 전력과 거의 비슷한 채널들에 비해 보상의 정도가 줄어들어 최대 입력 전력의 크기와 최대 전송 거리가 제한되어야 한다는 것을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- [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] T. L. Koch, R. C. Alfarness, "Dispersion compensation by active predistorted signal synthesis", *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-3, pp. 800-805, 1985.
- [3] A. M. Vengsakar, W. A. Reed, "Dispersion-compensating single-mode fibers: Efficient designs for first- and second-order compensation", *Opt. Lett.*, vol. 18, pp. 924-926, 1993.
- [4] A. Hasegawa, F. Tappert, "Transmission of stationary nonlinear optical pulses in dispersive dielectric fibers I. Anomalous dispersion", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 23, pp. 142-144, 1973.
- [5] 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.
- [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] 이성렬, "200 Gbps WDM 시스템에서 Mid-Span Spectral Inversion 기법을 이용한 채널 왜곡의 보상 특성", 한국전자파학회 논문지, 14(8), pp. 845-854, 2003년 8월.

- [8] 이성렬, 권순녀, 이윤현, "광 펄스 왜곡의 보상을 위해 Mid-Span Spectral Inversion 기법을 채택한 120 Gbps WDM 시스템에서 채널 간 상호 위상 변조 현상의 영향", 한국전자과학회 논문지, 14 (7), pp. 743-751, 2003년 7월.
- [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] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, 1989.
- [11] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, John Wiley & Sons, Inc., 1992.
- [12] M. Onish et al., "Highly nonlinear dispersion shifted fiber and its application to broadband wavelength convertor", *ECOC 97 Conference Publication*, no. 448, pp. 115-118, 1997.
- [13] 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.
- [14] Seong-Real Lee, E. S. Jung, S. E. Cho and Y. H. Lee, "Investigation of pump light power of wide-band optical phase conjugator using highly nonlinear dispersion shifted fiber in WDM systems with mid-span spectral inversion", submitted to *ETRI Journal*.
- [15] S. Song, "The number of four-wave mixing (FWM) waves in WDM systems and its applications", *The 14th Annual Meeting of the IEEE*, vol. 1, Lasers and Electro-Optics Society 2001, Nov. 2001.

## 이 성 렬



1990년 2월: 한국항공대학교 항공통신정보공학과 (공학사)  
 1992년 8월: 한국항공대학교 대학원 항공통신정보공학과 (공학석사)  
 2002년 2월: 한국항공대학교 대학원 항공통신정보공학과 (공학박사)  
 1996년 1월~2002년 5월: (주)세영

통신 전파기술연구소 책임연구원  
 2002년 6월~2004년 2월: (주)에이티엔 기술연구소 연구소장  
 2004년 3월~현재: 국립목포해양대학교 해양전자통신공학부 전임강사  
 [주 관심분야] 솔리톤 전송 시스템, 광 파장 분할 다중화, 광의 비선형 현상 분석

## 임 황 빈



1983년 2월: 명지대학교 전자공학과 (공학사)  
 1985년 2월: 건국대학교 전자공학과 (공학석사)  
 2003년 2월: 순천향대학교 전기전자공학과 (공학박사)  
 2003년 3월~현재: 강원도립대학

정보통신과 교수  
 [주 관심분야] 정보 보호, 광통신