

# 상호 위상 변조에 의해 왜곡된 WDM 신호의 Mid-Span Spectral Inversion을 이용한 보상

## Compensation of Distorted WDM signals due to Cross Phase Modulation Effects using Mid-Span Spectral Inversion

이 성 렬\*

Seong-Real Lee\*

### 요 약

광섬유의 색 분산과 자기 위상 변조 외에 상호 위상 변조 효과에 의해 왜곡된 WDM 채널 신호가 MSSSI (Mid-Span Spectral Inversion) 기법을 통해 전송 거리에 따라 보상되는 정도를 다양한 광섬유 분산 계수를 고려하여 분석해 보았다. 본 연구에서 고려된 시스템은 전체 전송로의 중간에 비선형 매질로 HNL-DSF (Highly nonlinear dispersion shifted fiber)를 갖는 광 위상 공액기를 두고, 광 위상 공액기를 중심으로 첫 번째 전송 구간에서의 평균 강도와 두 번째 전송 구간에서의 평균 강도를 같게 하는 PAIA (Path Averaged Intensity Approximation) 방식의 MSSSI 기법을 채택한 3×40 Gbps 강도 변조 직접 검파 방식의 WDM 시스템이다. XPM에 의한 왜곡의 보상 측면에서 광섬유의 분산 계수가 비교적 큰 WDM 시스템일수록 MSSSI 기법이 더욱 효과적으로 적용되어 전송 거리를 신장시킬 수 있는 것을 확인할 수 있었다. 또한 색 분산, SPM 외에 XPM의 영향을 받아 왜곡된 채널 신호는 MSSSI 기법을 통해 광섬유의 분산 계수가 큰 시스템에서 더욱 안정되게 보상된다는 것을 알 수 있었다.

### ABSTRACT

In this paper, we investigated the degree of compensation for WDM channel signal distortion due to chromatic dispersion, self phase modulation (SPM) and cross phase modulation (XPM) as a function of transmission length using mid-span spectral inversion (MSSSI) compensation method. The considered system is 3×40 Gbps intensity modulation direct detection (IM/DD) WDM transmission system. This system has highly nonlinear dispersion shifted fiber (HNL-DSF) as a nonlinear medium in optical phase conjugator (OPC). We confirmed that the transmission length is more increased by applying MSSSI to distorted signal due to chromatic dispersion, SPM and XPM as dispersion coefficient of fiber becomes higher. And the compensation degree of distorted WDM channels due to chromatic dispersion, SPM and XPM becomes better stable as dispersion coefficient of fiber becomes higher.

Key words : mid-span spectral inversion, cross phase modulation, self phase modulation, highly nonlinear dispersion shifted fiber, optical phase conjugator

---

\* (주)에이티엔 (ATN Co. Ltd.) 기술연구소  
 · 논문번호 : 2003-2-4  
 · 접수일자 : 2003년 6월 2일

## I. 서 론

강도 변조 직접 검파 (IM/DD : Intensity Modulation / Direct Detection) 파장 분할 다중 (WDM : Wavelength Division Multiplexing) 시스템에서 상호 위상 변조 (XPM : Cross Phase Modulation) 현상은 WDM 시스템의 채널 용량이 클수록 시스템 성능을 더욱 저하시킨다<sup>[1]-[3]</sup>. 따라서 장거리 대용량 WDM 시스템의 설계와 구현을 위해서는 XPM이 채널 왜곡에 미치는 영향과 이를 보상하는 방법이 반드시 고찰되어야 한다. 그러나 XPM에 의한 시스템 성능 저하 메커니즘이 복잡하기 때문에 한 채널은 변조된 형태의 신호 채널 (probe channel)로, 나머지 한 채널은 신호 채널에 XPM을 인가시키는 연속파 (continuous wave) 형태의 펌프 채널로 가정된 2-채널 IM/DD WDM 시스템에서의 XPM에 의한 성능 저하에 대해서만 연구되고 있는 실정이다<sup>[4],[5]</sup>.

장거리 WDM 시스템에 MSSI (Mid-Span Spectral Inversion)를 적용하면 왜곡된 채널 신호의 보상을 통해 WDM 채널들이 고품질로 전송된다는 것을 앞선 연구들을 통해 확인하였다. 즉 전체 전송로 중간에 공액파 (conjugated wave) 발생을 위한 비선형 매질로 HNL-DSF (Highly Nonlinear Dispersion Shifted Fiber)를 이용한 광 위상 공액기 (OPC : Optical Phase Conjugator)를 두고 OPC의 펌프 전력을 전송 거리에 따라 적절히 선택하면 광섬유의 분산 계수가 비교적 적은 WDM 시스템에서는 SPM에 의한 왜곡이 더욱 효과적으로 보상되고, 광섬유의 분산 계수가 비교적 큰 WDM 시스템에서는 XPM에 의한 왜곡이 더욱 효과적으로 보상되어 고품질 대용량 전송이 이루어지는 것을 확인하였다<sup>[6],[7]</sup>.

본 논문에서는 전송로에 존재하는 색 분산, SPM 외에 XPM에 의해 왜곡된 WDM 채널 신호를 MSSI를 적용하여 보상하는 경우 전송 거리에 따른 보상 정도를 색 분산과 SPM만에 의해 왜곡된 WDM 채널을 보상하는 정도와의 비교를 통해 고찰해 보고자 한다.

채널 전송률이 40 Gbps인 3-채널 IM/DD WDM 시스템의 전체 전송로 중간에 HNL-DSF의

OPC를 두고 위상 공액기를 중심으로 첫 번째 전송 구간에서의 평균 강도와 두 번째 전송 구간에서의 평균 강도를 같게 하는 PAIA (Path Averaged Intensity Approximation) 방식의 MSSI 기법을 통해 채널 왜곡이 보상되도록 모델링 하였다. 또한 OPC 펌프 전력 등의 기본 파라미터는 참고 문헌 [4]와 같이 하였고, 3-채널 WDM 신호는 모두 실제 WDM 전송 시스템에서와 같이 '0'과 '1'의 정보에 의해 직접 변조된 형태의 신호 채널 (probe channel)로 모델링 하였다. 그러나 수치적 분석을 간단히 하고 MSSI에서의 XPM 영향만을 고찰하고자 채널 간 파장 간격을 다르게 하는 방법[8]을 적용하여 4-광파 혼합 (FWM : Four Wave Mixing)에 의한 채널 간섭 영향은 무시하였다.

## II. WDM 시스템의 모델링

광섬유를 동시에 전파하는 동일한 편광(polarization)을 갖는 3-채널 WDM 시스템에서  $A_j(z, t)$ 를  $|A_j|^2$ 의 순간 광 전력에 의해 정규화된 천천히 변하는  $j$ -번째 복소 포락선이라 하면  $A_j(z, t)$ 는 아래의 비선형 슈뢰딩거 방정식을 만족하며 전파한다<sup>[9]</sup>.

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_j(t, z)}{\partial z} + \frac{\alpha}{2} A_j(t, z) + \frac{1}{v_j} \frac{\partial A_j(t, z)}{\partial t} \\ + \frac{i}{2} \beta_{2j} \frac{\partial^2 A_j(t, z)}{\partial t^2} = i \gamma_j P_j(t, z) A_j(t, z) \\ + 2i \gamma_j \left[ P_k(t - \frac{z}{v_k}, z) + P_l(t - \frac{z}{v_l}, z) \right] A_j(t, z) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $j, k, l = 1, 2, 3$  ( $j \neq k \neq l$ )이고,  $\alpha$ 는 감쇄 정수,  $v_j$ 는 군 속도 (group velocity),  $\gamma_j = n_2 \omega_j / c A_{eff}$ 는 비선형 계수,  $n_2$ 는 비선형 굴절 계수,  $\omega_j$ 는 각 주파수,  $A_{eff}$ 는 유효 코어 직경이다. 식 (1)의 우변의 첫 번째 항은 SPM을, 두 번째 항은 XPM을 각각 초래한다. 식 (1)은 단순히 군 속도에 의해 광 신호가 광섬유를 통과하면서 걸리는

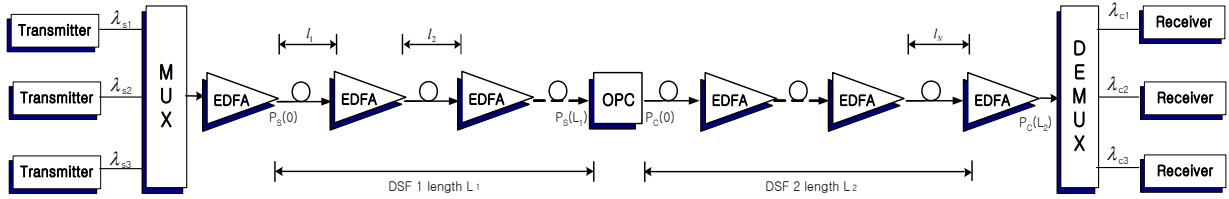


그림 1. 3×40 Gbps WDM 시스템 시뮬레이션 모델

Fig. 1. 3×40 Gbps WDM system simulation model

시간 지연만을 의미하므로  $T = t - z/v_j$ 로 식 (1)을 변환하면

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_j}{\partial z} + \frac{\alpha}{2} A_j + \frac{i}{2} \beta_{2j} \frac{\partial^2 A_j}{\partial T^2} \\ = i \gamma_j P_j A_j + 2i \gamma_j [P_k(T - d_{jk}z, 0) - \\ + P_l(T - d_{jl}z, 0)] A_j \end{aligned} \quad (2)$$

으로 표현된다. 여기서  $d_{jk}$ 와  $d_{jl}$ 는 아래 식으로 정의되는 walk-off 파라미터이다.

$$d_{jk} = \frac{1}{v_j} - \frac{1}{v_k}, \quad d_{jl} = \frac{1}{v_j} - \frac{1}{v_l} \quad (3)$$

영 분산이 아닌 영역에서  $d_{jk}$ 와  $d_{jl}$ 는 각각  $D\Delta\lambda_{jk}$ ,  $D\Delta\lambda_{jl}$ 로 근사화된다. 여기서 D는 분산 계수,  $\Delta\lambda_{jk}$ 와  $\Delta\lambda_{jl}$ 은 두 채널간 파장 간격이다.

그림 1은 색 분산과 비선형 효과에 의해 왜곡된 신호를 보상하기 위하여 MSSl 기법이 적용된 비트율이 40 Gbps인 채널을 송신부에서 각각 다른 반송파 파장으로 강도 변조한 후 하나의 전송로로 전송시키는 3-채널 WDM 시스템의 전체적인 구조를 나타낸 것이다.

그림 1에서 우선, 송신부는 128 비트의 PRBS (pseudo random bit sequence)를 각각 1550.0 nm, 1551.6 nm와 1553.0 nm의 중심 파장에서 2차 수퍼가우시안 NRZ 형태로 출력하는 강도 변조기로 모델링 하였다.

수신부는 역다중화 장치에서 필터링되어 입력되는 채널 신호를 5 dB의 잡음 지수를 갖는 EDFA (erbium-doped fiber amplifier)를 통해 증폭한 후

PIN 다이오드로 광 신호 전력을 전류로 변환하고 펄스 정형 필터(pulse shaping filter), 클럭 재생기 (clock recovery), 판별 회로(decision circuit)를 거쳐 '0'과 '1'의 전기적 신호를 검출하는 직접 검파 방식의 수신기로 모델링 하였다<sup>[10]</sup>. 광학적 대역폭 (optical bandwidth)은 1 nm, 수신 대역폭은 0.65×비트율로 설정하여 시뮬레이션 하였다.

광 전송로는 전통적 분산 천이 광섬유 (DSF : Dispersion Shifted Fiber)가 50 km 간격의 EDFA 선로 증폭기를 통해 연결된 구조로 모델링 하였다. DSF의 손실 계수는 0.2 dB/km로, 비선형 굴절 계수는  $2.36 \times 10^{-26}$  km<sup>2</sup>/W, 유효 코어 직경은 50 μm<sup>2</sup>, 분산 계수는 0.1, 0.4, 0.8, 1.6 ps/nm/km 등으로 설정하였다.

표 1. HNL-DSF OPC 파라미터

Table 1. HNL-DSF OPC parameters

parameter	symbol	value
HNL-DSF loss	$\alpha_o$	0.61 dB/km
HNL-DSF nonlinear coefficient	$\gamma_o$	20.4 W <sup>-1</sup> km <sup>-1</sup>
Pump light power	$P_p$	18.7 dBm
HNL-DSF length	$z_o$	0.75 km
HNL-DSF ZDW	$\lambda_0$	1550 nm
Pump light wavelength	$\lambda_p$	1549.5 nm, 1547.0 nm
HNL-DSF dispersion slope	$\frac{dD_o}{d\lambda}$	0.032 ps/nm <sup>2</sup> /km

전체 전송로 중간에 위치한 HNL-DSF를 이용한 OPC의 파라미터 (표 1)는 참고 문헌 [6]에서와 같이 하였다.

위와 같은 파라미터들이 적용된 식 (2)의 비선형

파동 방정식을 단계 분할 푸리에 (SSF : Split-Step Fourier) 방법<sup>[11]</sup>을 이용하여 수치적으로 분석·고찰하였다.

### III. 시뮬레이션 결과 및 검토

MSSI를 통한 보상 정도의 평가 지표로 눈 열림 페널티 (EOP : Eye Opening Penalty)를 사용하였다. WDM 채널 왜곡의 원인으로 색 분산과 SPM만 존재하는 경우와 색 분산과 SPM 외에 XPM까지 존재하는 경우의 눈 열림 페널티는 back-to-back 시스템에서의 눈 열림 값을 기준으로 계산된 값이다. 그러나 색 분산과 SPM 외에 XPM이 존재하는 경우에서의 보상 정도를 색 분산과 SPM만에 의한 왜곡을 보상하는 정도와의 비교를 위한 눈 열림 페널티는 색 분산과 SPM에 의한 채널 왜곡을 보정한 경우의 눈 열림 정도에 대한 색 분산, SPM과 XPM에 의한 채널 왜곡을 보정한 경우의 눈 열림 정도의 비로 정의하여 계산하였다.

$$EOP = \frac{EOP_{dispersion + SPM + XPM}}{EOP_{dispersion + SPM}}$$

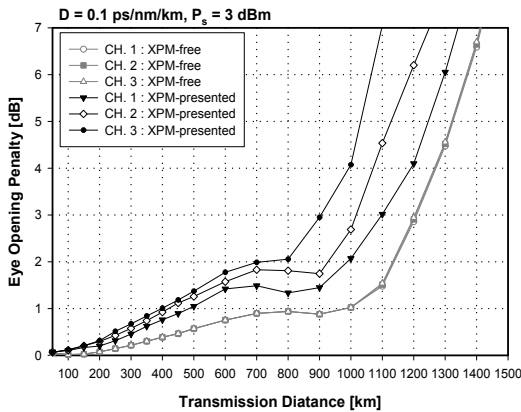


그림 2. MSSI 기법이 적용되지 않은 경우의 전송 거리에 따른 눈 열림 페널티

Fig. 2. Eye opening penalty as a function of transmission length when MSSI is not applied in WDM systems

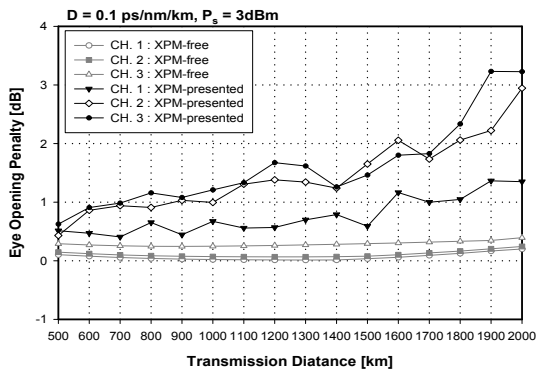
그림 2는 광섬유의 분산 계수가 0.1 ps/nm/km이

고 채널 송신 전력이 3 dBm인 MSSI가 적용되지 않은 WDM 시스템에서 채널 왜곡의 원인으로 색 분산과 SPM만 존재하는 경우 (XPM-free)와 색 분산과 SPM 외에 XPM까지 존재하는 경우 (XPM-presented)의 전송 거리에 따른 눈 열림 페널티를 나타낸 것이다. 우선 채널 왜곡의 요인으로 XPM까지 존재하는 경우, SPM만 존재하는 경우와는 달리 각 채널별로 전송 거리에 따른 눈 열림 페널티에 차이가 생기는데 이는 앞선 연구에서의 결과, 즉 각 채널별 비트 패턴의 차이, 신호 파장에 따른 광섬유에서의 전송 속도 차이 등에 의해 인접한 채널에서 비롯된 XPM에 의한 강도 변동의 정도가 서로 다르기 때문이다.

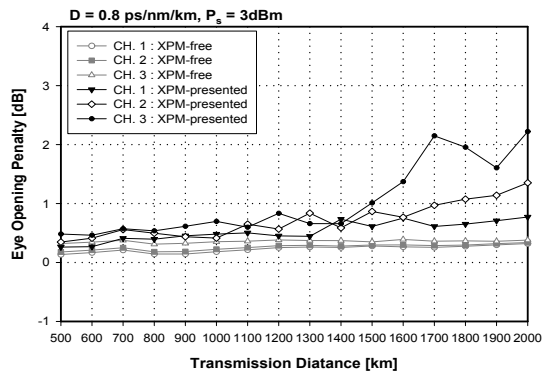
그림 2를 통해 MSSI가 적용되지 않은 WDM 시스템에서 색 분산과 SPM에 의한 채널 왜곡이 발생된 경우 1 dB EOP 기준으로 최대 800 km까지 전송 가능하지만, 색 분산과 SPM 외에 XPM에 의한 채널 왜곡이 발생된 경우에는 최대 전송 거리가 2배 정도 감소하는 것을 알 수 있다.

그림 3은 그림 2와 동일한 파라미터를 갖지만 전송로 중간에 HNL-DSF의 OPC를 두어 MSSI 기법을 적용시킨 WDM 시스템의 전송 거리에 따른 눈 열림 페널티를 각기 다른 광섬유 분산 계수별로 나타낸 것이다. 우선 광섬유의 분산 계수가 0.1 ps/nm/km인 그림 3의 (a)를 그림 2와 비교해 보면, 색 분산, SPM 외에 XPM에 의해 왜곡된 채널 신호에 MSSI 기법을 적용하면 전송 거리를 2배 가까이 신장시킬 수 있음을 알 수 있다. 또한 색 분산과 SPM에 의해서만 왜곡된 WDM 채널들을 보정한 경우에서도 전송 거리를 수 천 km 이상으로 증가시킬 수 있음을 알 수 있다. 하지만 그림 3의 눈 열림 페널티는 back-to-back 시스템에서의 눈 열림 정도와의 상대적 평가이기 때문에 참고 문헌 [5]의 결과를 근거로 분석해 본다면 광섬유의 분산 계수가 증가할수록 색 분산과 SPM에 의해서만 왜곡된 채널 신호의 보상을 통한 최대 전송 거리는 감소할 것이라고 예상할 수 있다.

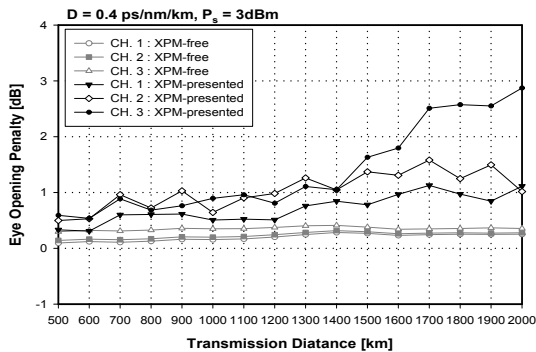
그림 3을 전체적으로 분석해 보면, 색 분산, SPM 외에 XPM까지 영향을 끼쳐 왜곡된 WDM 채널들을 MSSI 기법을 통해 보상하는 경우 광섬유의 분산 계수 값이 큰 시스템일수록 1 dB EOP를 유지할 수



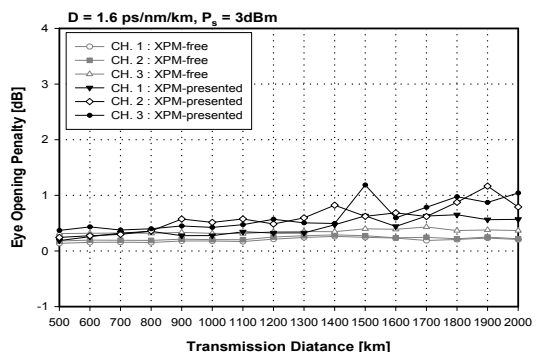
(a)  $D = 0.1$  ps/nm/km에서의 눈 열림 패널티



(c)  $D = 0.8$  ps/nm/km에서의 눈 열림 패널티



(b)  $D = 0.4$  ps/nm/km에서의 눈 열림 패널티



(d)  $D = 1.6$  ps/nm/km에서의 눈 열림 패널티

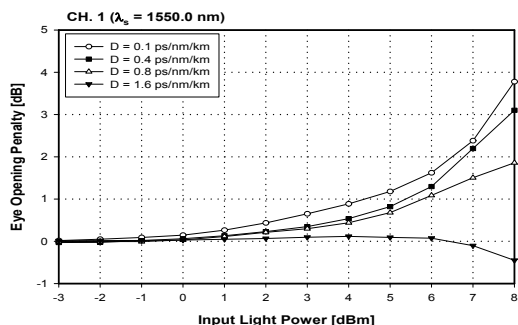
그림 3. 다양한 광섬유 분산 계수에서의 전송 거리에 따른 눈 열림 패널티

Fig. 3. Eye opening penalty as a function of transmission length for various fiber dispersion coefficient

있는 최대 전송 거리가 증가한다는 것을 확인할 수 있다. 이는 광섬유의 분산 계수가 커질수록 임의의 신호 채널 펄스와 인접 채널 펄스의 전송 속도 차이가 전송 거리에 따라 증가됨으로써 신호 채널 펄스에 위상 변동과 강도 변동을 일으키는 인접 채널 펄스가 신호 채널 펄스와 중첩(간섭)되는 부분이 점차 감소되고, 중첩된 부분에 의한 파형 왜곡도 MSI 기법에 의해 보상되었기 때문이다.

그림 3에서 한가지 주목해야 할 결과는 색 분산과 SPM에 의해서만 왜곡된 채널 신호의 보상 특성은 전송 거리에 따라 일정한 반면, XPM까지 영향을 끼쳐 왜곡된 채널 신호의 보상 특성은 전송 거리에 따라, 특히 광섬유의 분산 계수가 작을수록 더욱 불규칙적이라는 것이다. 이는 신호 채널의 비트 패턴과 인접 채널들의 비트 패턴이 서로 독립적이고

랜덤하기 때문에 인접 채널들의 펄스가 신호 채널 펄스와 중첩되는 부분이 전송 거리에 따라 불규칙하게 나타나게 되는데, 광섬유의 분산 계수가 작은 시스템일수록 이러한 현상이 채널들의 적은 전송 속도 차이에 의해 더욱 증가되기 때문이다.



(a) 채널 1의 눈 열림 패널티

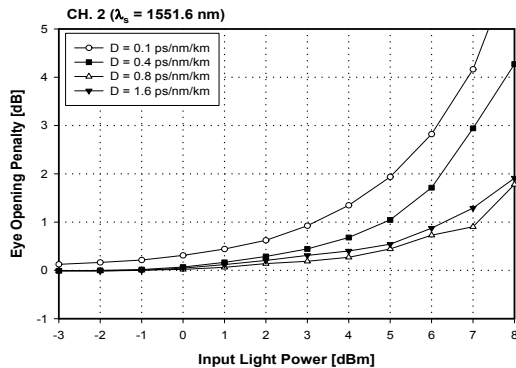
IV. 결 론

지금까지 광섬유의 색 분산과 SPM 외에 XPM 효과에 의해 왜곡된 채널 신호를 보상하기 위한 방법으로 OPC의 비선형 매질로 HNL-DSF를 이용한 PAIA MSSI가 채택된 40 Gbps의 3-채널 프로브 채널의 IM/DD WDM 시스템에서 XPM에 의해 왜곡된 채널 신호의 전송 거리에 따른 보상 정도를 다양한 광섬유 분산 계수를 고려하여 분석해 보았다.

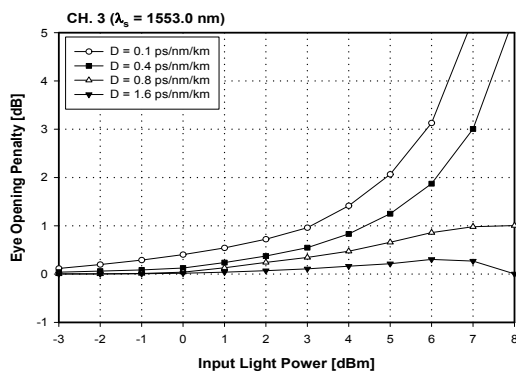
XPM에 의한 왜곡의 보상 측면에서 광섬유의 분산 계수가 비교적 큰 WDM 시스템일수록 MSSI 기법이 더욱 효과적으로 적용되어 전송 거리를 신장시킬 수 있는 것을 확인할 수 있었다. 또한 색 분산, SPM 외에 XPM의 영향을 받아 왜곡된 채널 신호는 MSSI 기법을 통해 광섬유의 분산 계수가 큰 시스템에서 더욱 안정되게 보상된다는 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] N. Kikuchi, K. Sekine and S. Sasaki, "Analysis of cross-phase modulation effect on IM/DD WDM transmission performance", *Electro. Lett.*, vol. 33, no. 8, pp. 653~654, 1997
- [2] R. Hui, K. R. Demarest and C. T. Allen, "Cross-phase modulation in Multispan WDM optical fiber systems", *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-17, no. 6, pp. 1018~1026, 1999
- [3] T. Chiang, N. Kagi, T. k. Fong, M. E. Marhic and L. G. Kozovsky, "Cross-phase modulation in dispersive fibers : theoretical and experimental investigation of the impact of modulation frequency", *IEEE Photon. Techno. Lett.*, vol. 6, no. 6, pp. 733~736, 1994
- [4] N. Kikuchi, K. Sekine and S. Sasaki, "Analysis of cross-phase modulation effect on IM/DD WDM transmission performance", *Electro. Lett.*, vol. 33, no. 8, pp. 653~654, 1997



(b) 채널 2의 눈 열림 패널티



(c) 채널 3의 눈 열림 패널티

그림 4. 색 분산, SPM 외에 XPM에 의해 왜곡된 채널을 보정한 경우의 입력 전력 변화에 따른 눈 열림 패널티 (L = 1,000 km)

Fig. 4. Eye opening penalty as a function of the input signal light power for compensation of distorted signal due to chromatic dispersion, SPM and XPM.

그림 4는 전송 거리 1,000 km의 3-채널 WDM 시스템에서 색 분산, SPM 외에 XPM에 의해 왜곡된 신호를 MSSI 기법에 의해 보정한 경우 입력 신호와 전력 변화에 따른 각 채널의 눈 열림 패널티를 광섬유의 분산 계수별로 나타낸 것이다. 그림 4에 나타낸 눈 열림 패널티는 색 분산과 SPM에 의한 채널 왜곡을 보정한 경우의 눈 열림 정도를 기준으로 평가한 값이다. 앞선 결과의 원인과 마찬가지로 색 분산, SPM 외에 XPM에 의해 왜곡된 신호를 MSSI 기법을 통해 보상하는 정도가 WDM 시스템의 분산 계수가 증가될수록 더욱 효과적이라는 것을 알 수 있다.

- [5] R. Hui, K. R. Demarest and C. T. Allen, "Cross-phase modulation in Multispan WDM optical fiber systems", *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-17, no. 6, pp. 1018~1026, 1999.
- [6] Seong-Real Lee and Y. J. Lee and Y. H. Lee, "Investigation of pump light power of wideband optical phase conjugator using highly nonlinear dispersion shifted fiber in WDM systems with mid-span spectral inversion", submitted to *J. Lightwave Technol.*
- [7] 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*, 제 14 권 7호 게재 예정, 2003
- [8] 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
- [9] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, pp 34~44, 1989
- [10] 이성렬, 김남성, 방효창, "Mid-Span Spectral Inversion 기법을 채택한 장거리 광 전송 시스템에서의 비트 에러율 평가", *한국항공학회 논문지*, 제 6권 제 3호, pp 223 ~ 230, 2002
- [11] G. P. Agrawal and M. J. Potasek, "Nonlinear pulse distortion in single-mode optical fibers at the zero-dispersion wavelength", *Physical Rev. A*, vol. 33, no. 3, pp 1765~1776, 1986

## 이 성 렬(李成烈)



1990년 2월 : 한국항공대학교

통신정보공학과 (공학사)

1992년 8월 : 한국항공대학교 대학

원 통신정보공학과 (공학석사)

2002년 2월 : 한국항공대학교 대

학원 통신정보공학과 (공학박사)

1992년 9월 ~ 1994년 3월 : 한국항공대학교 전자공학과 조교

1996년 1월 ~ 2002년 5월 : (주)세영통신 전파연구소 책임연구원

2002년 6월 ~ 현재 : (주)에이티엔 기술연구소 연구소장

관심분야 : WDM 시스템, 광섬유의 비선형 효과, 광 솔리톤 전송 등