

# HNL-DSF를 이용한 광대역 광 위상 공액기의 펌프 광 전력 계산

정회원 이 성 렬\*, 이 하 철\*\*

## Calculation of Pump Light Power in Wideband Optical Phase Conjugator with Highly-Nonlinear Dispersion Shifted Fiber

Seong-Real Lee\*, Ha-Chul Lee\*\* *Regular Members*

### 요 약

8 채널 × 40 Gbps 파장 분할 다중 (WDM : Wavelength Division Multiplexing) 시스템에서 색 분산과 자기 위상 변조에 의해 왜곡된 광 펄스를 최상으로 보상할 수 있는 광 위상 공액기 (OPC : Optical Phase Conjugator) 의 최적 펌프 광 전력을 채널 입력 전력 변화에 따라 수치 해석적으로 살펴보았다. 또한 OPC의 펌프 전력 변화에 따른 수신단에서 허용 가능한 채널의 최대 입력 전력 크기를 변조 파형 형식, 광섬유 분산 계수에 따라 살펴보았다. 본 논문에서 고찰한 WDM 시스템은 전체 전송 링크 중간에 HNL-DSF (Highly- Nonlinear Dispersion Shifted Fiber)를 비선형 매질로 이용한 OPC를 두어 보상하는 경로 평균 강도 근사 (PAIA : Path-Averaged Intensity Approximation) MSSI (Mid-Span Spectral Inversion) 기법에 기초를 두고 있다. 우선 최소의 눈 열림 패널티를 만드는 HNL-DSF OPC의 특징 펌프 광 전력의 크기는 변조 파형 형식, 초기 채널 입력 전력, 총 전송 거리, 광섬유 분산 등의 복합적인 영향에 따라 다소 변화될 수는 있지만 전력 변환비를 1 근처로 만드는 값에서 결정되어야 한다는 것을 알 수 있었다. 또한 HNL-DSF OPC의 펌프 광 전력이 최소의 EOP를 결과하는 최적의 값이 아닌 다른 값으로 설정되어 있는 경우 양호한 수신을 가능하게 하는 채널의 최대 입력 전력 크기는 광섬유의 분산 계수가 비교적 적은 WDM 시스템에서 변조 파형 형식으로 NRZ보다 RZ를 사용하면 더욱 증가되는 것을 확인할 수 있었다.

Key Words : Optical Phase Conjugator (OPC), Highly Nonlinear Dispersion Shifted Fiber (HNL-DSF), Optimal pump light power, Mid-Span Spectral Inversion (MSSI)

### ABSTRACT

In this paper, we numerically investigated the optimum pump light power best compensating for pulse distortion due to both chromatic dispersion and self phase modulation (SPM) as a function of channel input power in 8 channel × 40 Gbps wavelength division multiplexing (WDM) systems. Also we investigated the allowable maximum channel input power dependence on modulation format and fiber dispersion coefficient in the various pump light power of OPC. The considered WDM transmission system is based on path-averaged intensity approximation (PAIA) mid-span spectral inversion (MSSI) compensation method, which has highly-nonlinear dispersion shifted fiber (HNL-DSF) as nonlinear medium of optical phase conjugator

\* 국립목포해양대학교 해양전자·통신공학부 (reallee@mmu.ac.kr), \*\* 유한대학 정보통신과 (hclee@yuhan.ac.kr)  
논문번호 : 030556-1215, 접수일자 : 2003년 12월 16일

(OPC) in the mid-way of total transmission line. We confirmed that optimal pump light power of HNL-DSF OPC depend on modulation format, initial channel input power, total transmission length and fiber dispersion. But optimal pump light power of HNL-DSF OPC must be selected to make power conversion ratio to almost unity. And we confirmed that, if we allow a 1 dB eye opening penalty (EOP), the tolerable maximum channel input power is increased by using RZ than NRZ as modulation format when pump light power of HNL-DSF OPC is not optimal value but another values.

### I. 서 론

EDFA(Erbium-Doped Fiber Amplifier)를 이용한 장거리 고속 광 전송 시스템에서 광섬유의 색 분산과 비선형 효과에 의한 광 펄스의 왜곡은 전송 용량에 제한을 주고 있다<sup>[1]</sup>. 이러한 왜곡을 보상하기 위한 여러 가지 기법 중 MSSI (Mid-Span Spectral Inversion)는 광 전송 링크 중간에 위치한 광 위상 공액기 (OPC : Optical Phase Conjugator)를 통해 송신단부터 OPC까지의 첫 번째 전송 링크를 전파해 온 왜곡된 광 신호파를 위상 공액파로 변환시킨다. 이렇게 변환된 공액파를 나머지 전송 링크의 반을 통해 수신시키면 광 신호의 왜곡을 보상할 수 있다<sup>[2],[3]</sup>.

파장 변환기 (wavelength convertor)와 펄스 왜곡 보상기로써의 OPC를 갖는 WDM 시스템에서 모든 채널 신호들은 동일한 특성의 위상 공액파로 변환되어야 한다. OPC에서 공액파를 생성하는 메커니즘인 4-광파 혼합 (FWM : Four Wave Mixing)을 위한 비선형 매질로 전통적인 분산 천이 광섬유 (DSF : Dispersion Shifted Fiber)를 사용하는 것은 DSF의 영 분산 파장 (ZDW : Zero Dispersion Wavelength) 근처에서 신호 광과 펌프 광의 파장 간격에 따라 FWM의 공액파 생성 효율을 급격하게 떨어뜨리기 때문에 넓은 대역에 걸쳐 있는 WDM 신호들을 동일한 변환 효율의 공액파로 생성시키는 데 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 OPC의 비선형 매질로 초 광대역 EDFA<sup>[4]</sup>의 대역폭과 같은 변환 대역폭을 갖는 HNL-DSF (Highly-Nonlinear Dispersion Shifted Fiber)를 이용하는 방법이 Watanabe 등에 의해 제안되었다<sup>[5]</sup>.

MSSI 기법에서 광섬유의 손실과 선로 증폭기의 증폭 이득 변동 때문에 발생하는 자기 위상 변조 (SPM : Self Phase Modulation)에 의한 왜곡 보상의 한계는 경로 평균 강도 근사법 (PAIA : Path-Averaged Intensity Approximation)을 적용함

으로써 극복될 수 있다<sup>[6],[7]</sup>. PAIA MSSI에서 OPC의 펌프 광 전력 변화에 의한 두 번째 전송 링크로 입사하는 공액파의 전력 변동 때문에 보상의 정도가 달라짐을 예상할 수 있다. 그러나 PAIA MSSI를 채택한 장거리 WDM 시스템에서의 이러한 영향을 수치적으로나 실험적으로 검증한 연구는 아직까지 전무한 상태이다.

본 논문에서는 WDM 전송 링크 중간에 HNL-DSF OPC가 이용된 MSSI 기법에서 채널 왜곡이 최소가 되는 OPC의 펌프 전력을 각기 다른 광섬유 분산 계수와 채널 입력 전력에 따라 살펴보고, OPC의 펌프 전력 변화에 따른 MSSI 보상을 통해 수신단에서 허용 가능한 채널의 최대 입력 전력 크기를 살펴보고자 한다.

본 논문에서 설정한 WDM 시스템의 총 비트율은 320 Gbps (= 8 채널 × 40 Gbps)이고, 각 채널의 변조 파형 형식을 NRZ인 경우와 RZ 경우로 나누어 고찰하였다. 단계 분할 푸리에 (SSF : Split-Step Fourier) 방법을 이용, 각 경우에 대한 눈 열림 페널티 (EOP : Eye Opening Penalty)를 구하여 광 펄스 왜곡의 보상 정도를 평가하였다. 분석 과정을 간단히 하기 위하여 채널간의 상호 위상 변조 (XPM : Cross Phase Modulation)는 무시하였고, 채널들의 FWM에 의한 채널 간섭을 최소화하기 위하여 채널 간 파장 간격을 다르게 하는 방법<sup>[8]</sup>을 사용하였다.

### II. HNL-DSF를 이용한 광대역 OPC

WDM 시스템에서 사용되는 OPC는 시스템 전체 대역폭에 걸쳐 평탄한 변환 특성을 가져야 한다. 전통적인 DSF 대신에 적은 분산 기울기 (dispersion slope)를 갖는 HNL-DSF의 이용으로 넓은 대역에 걸치는 각기 다른 파장의 신호들이 같거나 거의 비슷한 변환 효율 (conversion efficiency,  $\eta$  = FWM 광 전력 / 입력 신호 전력)의 공액파로 변환된다면

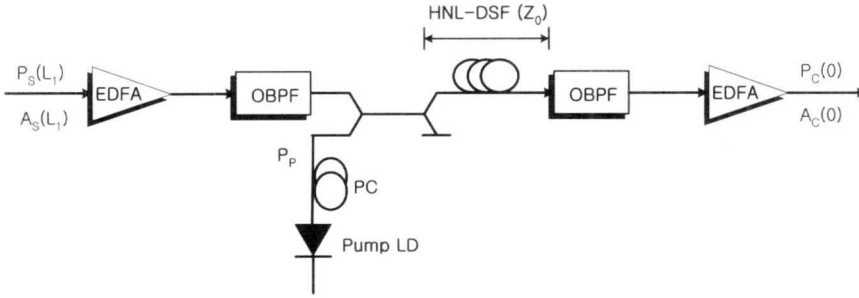


그림 1. HNL-DSF를 이용한 광 위상 공액기 구조  
Fig. 1. Optical phase conjugator using highly nonlinear dispersion shifted fiber

WDM 시스템에 HNL-DSF OPC가 적용될 수 있을 것이다.

그림 1은 HNL-DSF를 이용한 OPC의 구조를 나타내고 있다. 첫 번째 광 링크를 전파해 OPC에 입력된 파장  $\lambda_s$ 를 갖는 신호 광  $A_s$ 는 첫 번째 EDFA에 의해 증폭되고, 파장  $\lambda_0$ 의 펌프 광과 결합된다. 결합된 광파는  $\lambda_0$ 의 ZDW를 갖는 HNL-DSF로 들어가서 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(OBPF : Optical Band Pass Filter)에 의해 특정 대역으로 여파되고, EDFA에 의해 증폭된 후 나머지 전송 링크로 입력된다.

FWM 과정에 의해 생성된 광파의 출력 전력  $P_{FWM}$ 와  $\eta$ 는 아래의 식들로 계산된다<sup>9)</sup>.

$$P_{FWM} = \eta_o^2 P_p^2 P_s(L_1) \exp(-\alpha_o z_o) \cdot L_{eff}^2 \eta \quad (1)$$

$$L_{eff} = [1 - \exp(-\alpha_o z_o)] / \alpha_o \quad (2)$$

$$\eta = \frac{\alpha_o^2}{\alpha_o^2 + \Delta\beta^2} \cdot \left[ 1 + \frac{4e^{-\alpha_o z_o} \sin(\Delta\beta z_o/2)}{(1 - \exp(-\alpha_o z_o))^2} \right] \quad (3)$$

$$\Delta\beta = -\frac{2\pi c \lambda_o^3}{\lambda_p^3 \lambda_s^2} \frac{dD_o}{d\lambda} \cdot (\lambda_s - \lambda_p)^2 (\lambda_o - \lambda_p) \quad (4)$$

여기서  $L_{eff}$ 와  $\Delta\beta$ 는 각각 유효 반응 길이(effective interacting length)와 위상 비정합 파라미터(phase mismatch parameter)이다.

표 1. WDM 신호 채널 파장과 공액파 파장  
Table 1. WDM signal channel wavelengths and conjugated wave wavelengths

채널 번호	신호 파장( $\lambda_s$ )	공액파 파장 ( $\lambda_p$ )		
		1549.5 nm	1548.3 nm	1547.0 nm
1	1550.2 nm	1548.8 nm	1546.4 nm	1543.8 nm
2	1551.2 nm	1547.8 nm	1545.4 nm	1542.8 nm
3	1553.2 nm	1545.8 nm	1543.4 nm	1540.8 nm
4	1554.4 nm	1544.6 nm	1542.2 nm	1539.7 nm
5	1556.0 nm	1543.0 nm	1540.7 nm	1538.1 nm
6	1557.8 nm	1541.3 nm	1538.9 nm	1536.3 nm
7	1560.0 nm	1539.1 nm	1536.8 nm	1534.2 nm
8	1561.4 nm	1537.8 nm	1535.4 nm	1532.9 nm

FWM 효과에 의한 채널 간 누화를 억제하기 위하여 F. Forghieri 등에 의해 제안된 WDM 채널 간 파장 간격을 불균등하게 분할하는 방법<sup>8)</sup>에 따라 본 연구에서 선택한 신호 파장과 이의 공액파 파장은 표 1과 같다.

그림 2는 표 2의 파라미터를 사용하여 계산한  $\eta$  값을 나타낸 것이다. 그림 2에서 최대  $\eta$  값은 0.18 dB이고, 3-dB 대역폭은 펌프 광 파장이 1549.5 nm 인 경우 34 nm (1532.5 ~ 1566.5 nm), 1548.3 nm인 경우 18 nm (1539.5 ~ 1557.5 nm) 그리고 1547 nm 인 경우 14 nm (1540 ~ 1554 nm)이다.

### III. 시뮬레이션 모델

그림 3의 WDM 시스템에서 j-번째 신호파의 포락선  $A_j$ 는 아래의 비선형 파동 방정식<sup>10)</sup>을 따라 전파한다.

표 2. HNL-DSF OPC 파라미터  
Table 2. HNL-DSF OPC parameters

파라미터	기호	파라미터 값
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>
펌프 광 전력	$P_p$	variable
HNL-DSF 길이	$z_o$	0.75 km
HNL-DSF 영 분산 파장	$\lambda_0$	1550 nm
펌프 광 파장	$\lambda_p$	1549.5 nm, 1548.3 nm, 1547.0 nm
HNL-DSF 분산 기울기	$dD_o/d\lambda$	0.032 ps/nm <sup>2</sup> /km

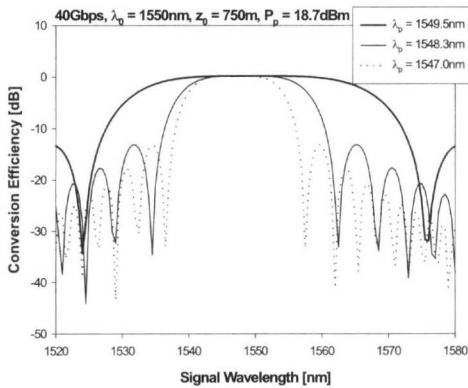


그림 2. 변환 효율 계산치  
Fig. 2. The calculated value of conversion efficiency

$$\frac{\partial A_j}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2} A_j - \frac{i}{2} \beta_{2j} \frac{\partial^2 A_j}{\partial T^2} + \frac{1}{6} \beta_{3j} \frac{\partial^3 A_j}{\partial T^3} + i \gamma_j |A_j|^2 A_j \quad (5)$$

$$\beta_{2j} = -\frac{D \lambda_j^2}{2 \pi c}$$

$$\beta_{3j} = \frac{\left( \lambda_j \frac{dD}{d\lambda} + D \right) \lambda_j^3}{(2 \pi c)^2}$$

$$\gamma_j = \frac{n_2 \omega_0}{c A_{eff}}, \quad T = t - \frac{z}{v_{gj}}$$

여기서  $\alpha$ 는 광섬유의 손실 계수,  $\lambda_j$ 는 j-번째 채널 신호 파장,  $\beta_{2j}$ 는 광섬유 색 분산 파라미터,  $\beta_{3j}$ 는 3차 색 분산 파라미터,  $\gamma_j$ 는 비선형 계수,  $D$ 는 광섬유 분산 계수,  $c$ 는 광속,  $n_2$ 는 비선형 굴절 계수,  $A_{eff}$ 는 광섬유의 유효 단면적,  $v_{gj}$ 는 군 속도 (group velocity),  $dD/d\lambda$ 는 분산 기울기이다. 표 3은 본 논문에서 사용한 송신단, 광섬유, 수신단의 시뮬레이션 파라미터이다

PAIA MSSI 기법에서 색 분산에 의한 펄스 왜곡의 보상은 각 전송 링크에서의 전체 분산량을 같게 함으로써, 즉  $D_1 L_1 = D_2 L_2$  함으로써 얻을 수 있다. 본 연구에서 전송 링크의 길이, 손실 계수, EDFA 간격, 비선형 굴절 계수 등의 파라미터들이 첫 번째 전송 링크  $L_1$ 과 두 번째 전송 링크  $L_2$ 에서 동일하게 선택되었기 때문에 SPM에 의한 펄스의 보상은 아래 식과 같이 첫 번째 링크로 입사되는 신호의 평균 전력과 두 번째 링크로 입사되는 공액파의 평균 전력을 동일하게 하면 얻을 수 있다.

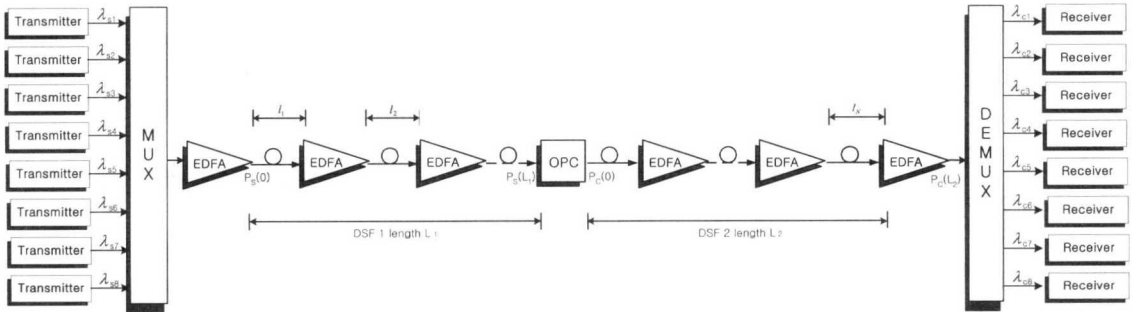


그림 3. 시뮬레이션 모델  
Fig. 3. Simulation model

$$P_s(0) = P_c(0) \quad (6)$$

그러나  $L_2$ 로 입사되는 공액과 전력은  $L_1$ 으로 입사되는 신호와 전력으로 쉽게 표현될 수 없기 때문에 PAIA MSSI 기법에서 식 (6)이 만족되는지를 간단하게 확인할 수 없다. 초기 공액과 전력의 크기는 OPC에서의 펌프 광 전력에 의존한다. 따라서 식 (6)은 특정한 펌프 광 전력에서 만족하고 결과적으로 이 펌프 광 전력에서 최상의 보상이 이루어질 것이라고 예상할 수 있다.

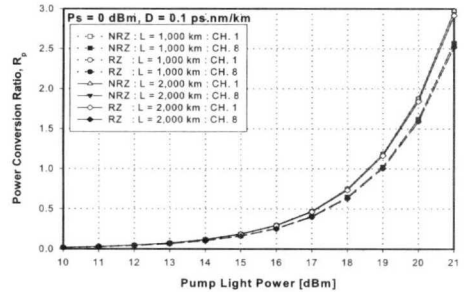
보상 정도가 펌프 광 변동에 어느 정도 의존하는지, 그리고 식 (6)이 만족되는지를 확인하기 위하여 아래 식으로 표현되는 전력 변환비 (power

conversion ratio)  $R_\beta$ 를 정의했다.

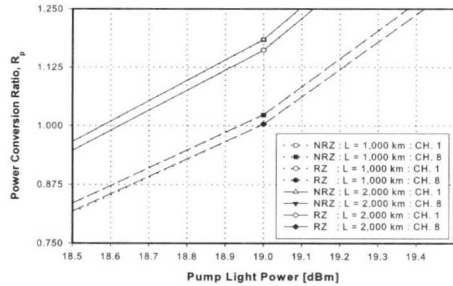
$$R_\beta = P_c(0) / P_s(0) \quad (7)$$

표 3. 시뮬레이션 파라미터  
Table 3. Simulation parameters

파라미터		기호 및 파라미터 값
송신부	비트율	$R_b = 320$ Gbps ( $=8 \times 40$ Gbps)
	파형	NRZ or RZ super-Gaussian ( $m=2$ )
	비트 패턴	PRBS $2^7$ (128 bits)
	주파수 칩(Chirp)	0
광섬유	형태	전통적 DSF
	손실 계수	$\alpha_1 = \alpha_2 = 0.2$ dB/km
	전체 전송 길이	1,000 km ( $L_1 = L_2 = 500$ km)
		2,000 km ( $L_1 = L_2 = 1,000$ km)
	분산 계수	$D_{11} = D_{12} = 0.1,$ 0.4, 1.6 ps/nm/km
	비선형 굴절계수	$n_2 = 2.36 \times 10^{-26}$ km <sup>2</sup> /W
	유효 코어 단면적	$A_{eff} = 50$ $\mu\text{m}^2$
	EDFA의 개수	20
	EDFA 간격	$l = 50$ km
	수신부	형태
EDFA 잡음 지수		5 dB
광학적 대역폭		1 nm
수신 대역폭		$0.65 \times R_b$



(a)



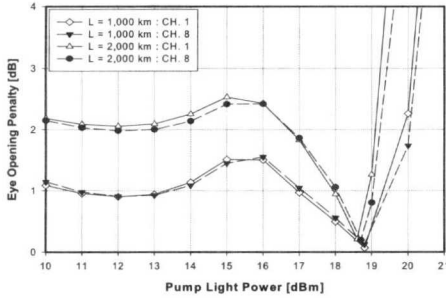
(b)

그림 4. OPC에서의 펌프 광 전력 변동에 따른 전력 변환비  
Fig. 4. Power conversion ratio dependence on pump light power fluctuation in OPC

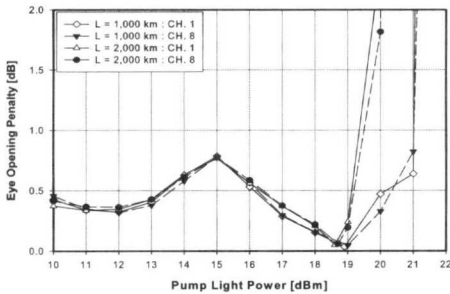
#### IV. 결과 및 검토

그림 4(a)는 분산 계수가 0.1 ps/nm/km인 광섬유의 전체 전송 거리가 1,000 km와 2,000 km인 WDM 시스템에 입력 전력 0 dBm의 채널을 전송하는 경우 HNL-DSF OPC의 펌프 광 전력 변동에 따른 채널 1과 채널 8의 전력 변환비를 나타낸 것이다. 그리고 그림 4(b)는 그림 4(a)에서 펌프 광 전력이 18.5 dBm부터 19.5 dBm인 부분만 확대한 것이다. 우선 변조 파형 형식과 전체 전송 거리와는 큰 상관없이 채널 파장에 관계해서만 전력 변환비가 달라지는 것을 알 수 있다. PAIA 조건을 만족할 수 있는 전력 변환비 1을 나타내는 펌프 광 전력은 HNL-DSF의 영 분산 파장에 가까운 채널 1의

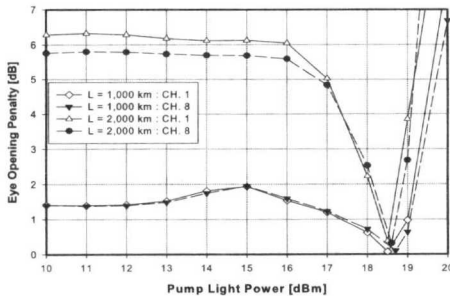
전송에서는 18.6 dBm 근처, 그리고 영 분산 파장에서 가장 먼 채널 8의 전송에서는 19.0 dBm 근처인 것을 확인할 수 있다. 그림 2의 공액파 변환 효율 계산치와 관련해 살펴보면 이러한 결과는 신호 파장이 HNL-DSF의 영 분산 파장에 가까운 채널들은 높은 효율의 공액파를 생성하기 때문에, 즉 OPC가 생성할 수 있는 최대 전력의 공액파를 생성하기 때문에 신호 입력 전력과 같은 공액파를 생성하는데 상대적으로 적은 펌프 광 전력이 필요하다는 것을



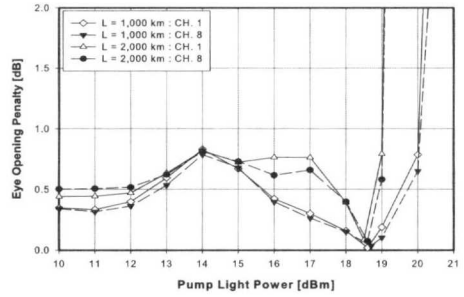
(a) NRZ ; Ps = 0 dBm  
의미하는 것이다.



(b) RZ ; Ps = 0 dBm



(c) NRZ ; Ps = 3 dBm



(d) RZ ; Ps = 3 dBm

그림 5. 광섬유의 분산 계수가 0.1 ps/nm/km인 경우 펌프 전력 변화에 따른 눈 열림 패널티

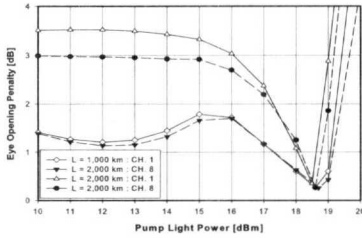
Fig. 5. Eye opening penalty as a function of pump light power for  $D_{11} = D_{12} = 0.1$  ps/nm/km

그림 5는 분산 계수가 0.1 ps/nm/km인 WDM 시스템에 각각 0 dBm과 3 dBm 입력 전력의 채널을 전송하는 경우 HNL-DSF OPC의 펌프 광 전력 변동에 따른 채널 1과 채널 8의 눈 열림 패널티를 나타낸 것으로 변조 파형 형식, 전체 전송 거리, 채널 파장의 차이에 따라 최소 EOP를 만드는 펌프 광 전력은 18.5 ~ 19.0 dBm임을 알 수 있다.

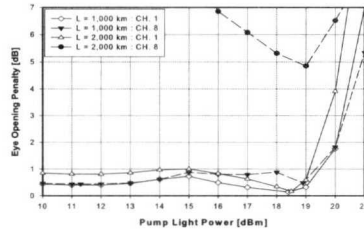
그림 6은 광섬유 분산 계수가 0.4 ps/nm/km인 것을 제외한 나머지 파라미터가 그림 5와 동일한 WDM 시스템에서의 눈 열림 패널티를 나타낸 것이다. 18.5 ~ 18.8 dBm의 펌프 광 전력에서 최소의 EOP가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

그림 7은 광섬유 분산 계수가 1.6 ps/nm/km인 WDM 시스템에서의 눈 열림 패널티를 나타낸 것이다. 최소 EOP가 NRZ 형식의 채널 1과 채널 8, 그리고 RZ 형식의 채널 1 전송의 경우 18.4, 18.5, 18.6 dBm의 펌프 광 전력에서 얻어지는 반면 RZ 형식의 채널 8의 전송의 경우는 18.9와 19.0 dBm에서 얻어지는 것을 알 수 있다.

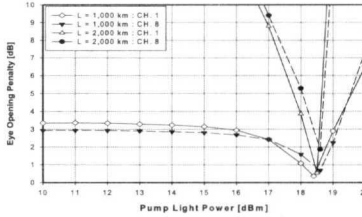
그림 7에서 변조 파형 형식이 NRZ 또는 RZ인 채널 8을 2,000 km 전송시키는 경우에서 최적 펌프 광 전력으로 HNL-DSF OPC가 설정되어 있어도 EOP가 다른 경우에 비해 증가하는 것은 평균 순시 강도가 낮은 채널 8 신호는 분산 계수가 비교적 크고 전송 거리가 긴 광섬유를 전파하면서 빨리 퍼짐에 따라 더욱 감소된 광 펄스 순시 강도에 의한



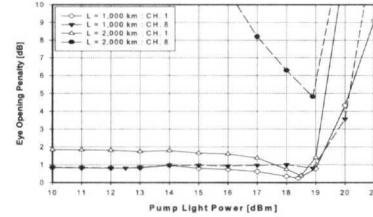
(a) NRZ ;  $P_s = 0$  dBm



(b) RZ ;  $P_s = 0$  dBm



(c) NRZ ;  $P_s = 3$  dBm

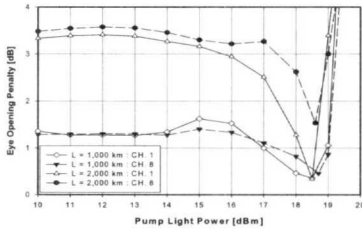


(d) RZ ;  $P_s = 3$  dBm

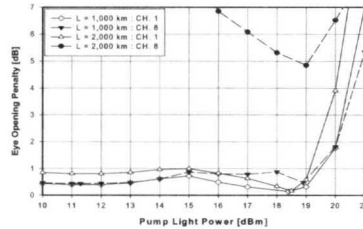
그림 6. 광섬유의 분산 계수가 0.4 ps/nm/km인 경우 펌프 전력 변화에 따른 눈 열림 페널티  
 Fig. 6. Eye opening penalty as a function of pump light power for  $D_{11} = D_{12} = 0.4$  ps/nm/km

SPM 현상을 통한 위상 변화량이 적어져서 광 펄스가 전파되면서 겪게 되는 색 분산에 의한 위상 변

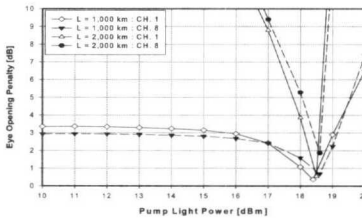
화를 만족할만한 수준으로 상쇄시키지 못했기 때문이다. 이러한 현상은 평균 순시 강도가 낮은 RZ 변



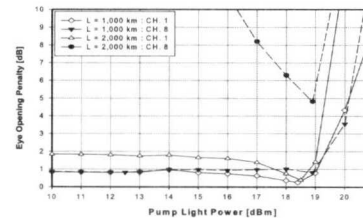
(a) NRZ ;  $P_s = 0$  dBm



(b) RZ ;  $P_s = 0$  dBm



(c) NRZ ;  $P_s = 3$  dBm



(d) RZ ;  $P_s = 3$  dBm

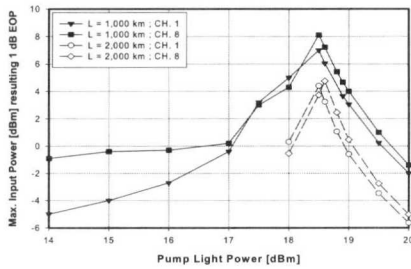
그림 7. 광섬유의 분산 계수가 1.6 ps/nm/km인 경우 펌프 전력 변화에 따른 눈 열림 페널티  
 Fig. 7. Eye opening penalty as a function of pump light power for  $D_{11} = D_{12} = 1.6$  ps/nm/km

조 형식의 파형에서 더욱 심하게 나타나게 된다.

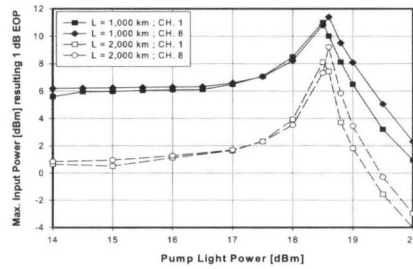
그림 5~7의 결과를 전체적으로 분석해 보면 변조 파형 형식으로 RZ의 경우보다는 NRZ에서, 분산 계수가 큰 광섬유를 사용한 경우에서, 채널 입력 전력이 큰 경우에서, 그리고 전체 전송 거리가 길어질수록 HNL-DSF OPC의 펌프 광 전력 변화에 따른 채널 간 EOP 차이가 커지는 것을 알 수 있다. 즉 채널 입력 전력이 낮은 RZ 형식을 분산 계수가 적은 짧은 거리의 광섬유의 WDM 시스템에 전송시킬

때 특정한 전력으로 설정된 HNL-DSF OPC의 펌프 광을 통해 최상의 보상을 얻을 수 있다.

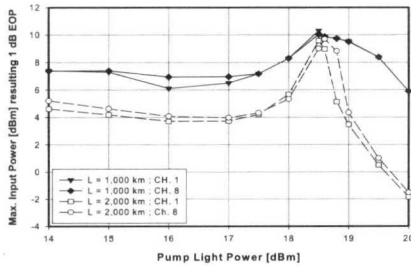
최소의 EOP를 만드는 특정 펌프 광 전력의 크기는 전반적으로 18.5 ~ 18.6 dBm이고, 이 값이 변조 파형 형식, 초기 채널 입력 전력, 총 전송 거리, 광섬유 분산 등의 복합적인 영향에 따라 다소 변화될 수는 있지만 전력 변환비를 1 근처로 만드는 값에서 결정되어야 한다는 것을 알 수 있다. 즉 입력 전력이 비교적 큰 RZ 형식의 채널이 높은 분산 계



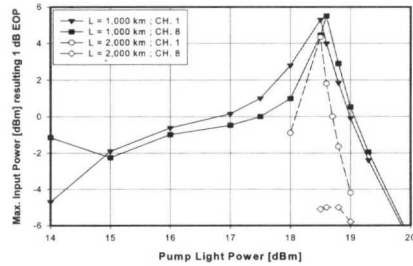
(a) NRZ ;  $D_{11} = D_{12} = 0.1$  ps/nm/km



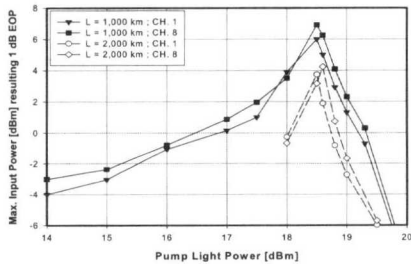
(d) RZ ;  $D_{11} = D_{12} = 0.4$  ps/nm/km



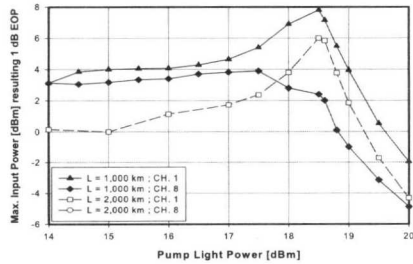
(b) RZ ;  $D_{11} = D_{12} = 0.1$  ps/nm/km



(e) NRZ ;  $D_{11} = D_{12} = 1.6$  ps/nm/km



(c) NRZ ;  $D_{11} = D_{12} = 0.4$  ps/nm/km



(f) RZ ;  $D_{11} = D_{12} = 1.6$  ps/nm/km

그림 8. 다양한 OPC 펌프 광 전력에서 1 dB EOP를 나타낼 수 있는 최대 입력 전력  
Fig. 8. Maximum input light power resulting 1 dB EOP at various pump light power of OPC



수의 광섬유를 전파하는 경우 (그림 7(d))와 입력 전력이 비교적 적은 채널이 낮은 분산 계수의 광섬유를 전파하는 경우 (그림 5(b), 6(b))에서는 펌프 광 전력이 다소 증가해야 하고, 높은 입력 전력을 갖는 NRZ 형식의 채널이 비교적 큰 분산 계수의 광섬유를 전파하는 경우 (그림 7 (c), (d))에는 다소 감소해야 되는 것을 알 수 있다.

그림 8은 다양한 HNL-DSF OPC 펌프 광 전력에서 1 dB EOP를 나타낼 수 있는 채널 1과 채널 8의 최대 입력 전력을 변조 파형 형식별, 광섬유 분산 계수별로 나타낸 것이다.

본 연구의 수치적 결과의 타당성 검토를 위해 그림 8의 결과를 HNL-DSF OPC를 적용한 5×40 Gbps WDM 전송 시스템의 실험 논문인 참고 문헌 [5]의 결과와 비교해 보도록 하겠다. 참고 문헌 [5]의 WDM 전송 시스템의 전체 전송 거리는 송신단부터 OPC 구간까지의 50 km와 OPC부터 수신단 구간까지의 55 km로 총 105 km이고, 각 구간은 전통적인 단일 모드 광섬유 (SMF ; Single Mode Fiber)로 구성하였다. 또한 각 구간 광섬유의 분산 계수는 각각 18.1 ps/nm/km와 16.4 ps/nm/km로 설정하였기 때문에 첫번째 구간의 분산량은 905 ps/nm이고 두번째 전송 구간의 분산량은 902 ps/nm로 총 분산량은 1,807 ps/nm이다. 길이가 750 m인 HNL-DSF OPC의 펌프 광 파장은 1547.2 nm 이고, 첫번째 채널의 신호 파장은 1555.8 nm, 그리고 나머지 4개 채널의 신호 파장은 200 GHz씩 차이를 갖도록 하였다.

참고 문헌 [5]에서 HNL-DSF OPC의 펌프 광 전력이 16.1 dBm인 경우 각 채널의 입력 전력이 2 dBm이 되어야 채널 왜곡이 최소가 되고, 105 km 전송 후 모든 채널이 약 1.5 dB의 파워 페널티를 갖는 것을 보이고 있다.

반면 본 연구에서 확인한 다양한 경우 중에 참고 문헌 [5]의 총 분산량과 가장 흡사한 경우는 분산 계수가 1.6 ps/nm/km인 1,000 km의 길이 (총 분산량 1,600 ps/nm)를 갖는 전송 시스템으로 이 경우 HNL-DSF OPC의 펌프 광 전력에 따른 1 dB EOP를 나타낼 수 있는 채널 1과 채널 8의 최대 입력 전력을 그림 8(e)에 나타냈다.

참고 문헌 [5]와 동일한 펌프 광 전력인 16.1 dBm에서 왜곡을 보상해 전송할 수 있는 최대 입력 전력의 크기는 약 +1 dBm으로 참고 문헌 [5]의 경우에 비해 약 3 dB 정도 개선되는 것을 그림 8(e)

를 통해 확인할 수 있다. 광섬유의 총 분산량이 참고 문헌 [5]에 비해 약 200 ps/nm 정도 적고, FWM에 의한 누화의 영향을 배제하기 위해 채널들의 신호 파장 간격을 일정하지 않게 한 방법 등을 감안하면 본 연구를 통해 얻은 결과들이 참고 문헌 [5]의 실험 결과와 거의 일치한다고 볼 수 있다.

그림 8의 결과를 분석해 보면, 우선 광섬유의 분산 계수가 비교적 적은 WDM 시스템 (그림 (a)와 (b))에서 변조 파형 형식으로 NRZ를 사용한 경우보다 RZ를 사용한 경우 HNL-DSF OPC의 펌프 광 전력이 최저 값으로부터 낮은 쪽으로 크게 벗어나게 되더라도 MSSI 보상법을 통해 양호한 수신을 가능하게 하는 채널의 최대 입력 전력의 변동이 크지 않다는 알 수 있다. 더욱이 NRZ 형식을 1,000 km 전송시키는 경우보다 RZ 형식을 2,000 km 전송시키는 경우가 넓은 HNL-DSF OPC 펌프 광 전력 범위에서 큰 전력의 채널 전송이 가능하다는 것을 알 수 있다.

그림 9의 결과 중 가장 중요한 것은 광섬유 분산 계수가 1.6 ps/nm/km인 WDM 시스템의 RZ 형식의 채널 8 전송을 제외한 모든 경우에서 MSSI 보상법을 통해 고품질로 최대의 채널 전력 전송을 가능하게 하는 HNL-DSF OPC의 펌프 광 전력 값은 18.5 dBm과 18.6 dBm이라는 것이다.

## V. 결 론

지금까지 320 Gbps의 WDM 전송 링크 중간에 HNL-DSF OPC가 이용된 MSSI 기법에서 채널 왜곡이 최소가 되는 OPC의 펌프 전력 크기를 각기 다른 광섬유 분산 계수의 1,000 km와 2,000 km의 전송 거리에서 채널 입력 전력 변화에 따라 살펴보고, OPC의 펌프 전력 변화에 따른 수신단에서 허용 가능한 채널의 최대 입력 전력 크기를 변조 파형 형식, 광섬유 분산 계수에 따라 살펴보았다.

우선 최소의 EOP를 만드는 HNL-DSF OPC의 특정 펌프 광 전력의 크기는 채널 파장에 큰 상관 없이 18.5 ~ 18.6 dBm이고, 이 값이 변조 파형 형식, 초기 채널 입력 전력, 총 전송 거리, 광섬유 분산 등의 복합적인 영향에 따라 다소 변화될 수는 있지만 전력 변환비를 1 근처로 만드는 값에서 결정되어야 한다는 것을 알 수 있었다.

또한 HNL-DSF OPC 펌프 광 전력이 최소의 EOP를 결과하는 최적의 값이 아닌 다른 값으로 설

정되어 있는 경우 양호한 수신을 가능하게 하는 채널의 최대 입력 전력 크기는 광섬유의 분산 계수가 비교적 적은 WDM 시스템에서 변조 파형 형식으로 NRZ보다 RZ를 사용하면 더욱 증가된다는 것을 확인할 수 있었다. 아울러 이 경우 광섬유 분산 계수가 1.6 ps/nm/km인 WDM 시스템의 RZ 형식의 채널 8 전송을 제외한 모든 경우에서 MSSI 보상을 통해 양호한 수신 성능을 얻을 수 있는 가장 큰 채널 입력 전력을 가능하게 하는 HNL-DSF OPC의 펌프 광 전력 값이 18.5 dBm과 18.6 dBm이라는 것을 알 수 있었다.

### 참 고 문 헌

[1] A. R. Chraplyvy, "Limitations on lightwave communications imposed by optical-fiber nonlinearities", *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-8, no. 10, pp 1548~1557, 1990

[2] 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.

[3] S. Watanabe, T. Naito, and T. Chikama, "Compensation of chromatic dispersion in a single mode fiber by optical phase conjugation", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 5, no. 1, pp. 92~95, 1993.

[4] K. Song and M. Premaratne, "Effects of SPM, XPM, and four-wave-mixing in L-band EDFAs on fiber-optic signal transmission", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, no. 12, pp 1630~1632, 2000

[5] S. Watanabe, S. Takada, G. Ishikawa, H. Ooi, J. G. Nielson, 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 mixer", *IOOC/ECOC '98, PD Paper TA3A*, pp. 1~4, 1997

[6] 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

[7] K. Kikuchi and C. Lorattanasene, "Compensation for pulse waveform distortion in ultra- long distance optical communication systems by using midway optical phase conjugator", *IEEE Photon. Techno. Lett.*, vol. 6, pp. 1499~1501, 1994

[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] 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

[10] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, pp 34~44, 1989

이 성 렬(Seong-Real Lee)

정회원



1990년 2월 : 한국항공대학교  
통신정보공학과 졸업  
1992년 8월 : 한국항공대학교  
통신정보공학과 석사  
2002년 2월 : 한국항공대학교  
통신정보공학과 박사

2002년 6월 ~ 2004년 2월 :

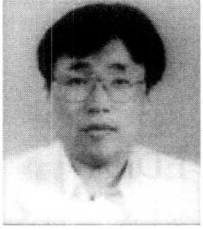
(주)에이티엔 부설연구소 연구소장

2004년 3월 ~ 현재 : 국립목포해양대학교 해양전자  
통신공학부 전임강사

<관심분야> WDM 전송 시스템, 광 솔리톤 전송

이 하 철(Ha-Chul Lee)

정회원



1983년 2월 : 한국항공대학교

통신정보공학과 졸업

1990년 8월 : 한국항공대학교

통신정보공학과 석사

1999년 8월 : 한국항공대학교

통신정보공학과 박사

1983년 3월 ~ 1985년 6월 :

한국전자통신연구원 연구원

1985년 6월 ~ 1995년 8월 : 한국통신

연구개발본부 연구실장

1995년 8월 ~ 현재 : 유한대학 정보통신과 부교수

<관심분야> 무선 LAN 및 PAN, 광 전송 시스템