

분산 제어 광전송 링크에서 중계 구간의 RDPS 기울기에 따른 WDM 신호의 보상 특성

Compensation Characteristics of WDM Signals Depending on RDPS Slope of Fiber Span in Dispersion Managed Optical Transmission Links

이성렬*

Seong-Real Lee*

요 약

분산 제어 (DM; dispersion management)와 광 위상 공액 (optical phase conjugation)이 적용된 광전송 링크에서 중계 구간 당 잉여 분산 (RDPS; residual dispersion per span) 기울기 (slope)에 따른 파장 분할 다중 전송 (WDM; wavelength division multiplexed) 채널의 보상 특성을 분석하여 최적의 RDPS 기울기를 도출하였다. RDPS 기울기가 증가할수록 WDM 채널의 유효 입사 전력 범위를 더욱 증가시키고 채널 간 성능 차이를 더욱 감소시키는 것을 확인하였다. 아울러 RDPS 기울기가 증가할수록 유효 전체 잉여 분산 (NRD; net residual dispersion) 범위도 증가하여 큰 RDPS 기울기가 유연한 광전송 링크 구성에 더욱 유리하다는 것을 확인하였다.

Abstract

The optimal residual dispersion per span (RDPS) slope is induced through the analyses of the compensation characteristics of the wavelength division multiplexed (WDM) channels depending on RDPS slope in the optical links with a dispersion management (DM) and an optical phase conjugation. The simulation results show that the effective launch power of WDM is more increased and the performance difference between the channels is more decreased as RDPS slope is more increased. The simulation results also show that the effective net residual dispersion (NRD) range is more increased as RDPS slope is more increased, and consequently, it is more advantageous to use the large RDPS slope for implementing the flexible optical links.

Key words : Dispersion management, Net residual dispersion, Residual dispersion per span, RDPS slope, Effective launch power, Pre/postcompensation.

I. 서 론

지난 몇 년간 광대역 기반 정보 및 통신 서비스의 급속한 성장은 광전송 시스템에서의 전송 속도의 급

격한 증가에 기인한 것이다. 이러한 증가는 광섬유에 의해 발생하는 그룹 속도 분산 (GVD; group velocity dispersion)과 비선형 효과에 의한 광 신호 왜곡을 보상하고자 하는 노력의 결실이라고 할 수 있다[1]. 광섬유에서 발생하는 GVD는 시간 영역에서

* 목포해양대학교 해양정보통신공학과 (Dept. of Marine Inform. & Comm. Eng., Mokpo National Maritime University)

· 제1저자 (First Author) : 이성렬(Seong-Real Lee, tel: +82-61-240-7264, email : reallee@mmu.ac.kr)

· 접수일자 : 2013년 3월 19일 · 심사(수정)일자 : 2013년 3월 19일 (수정일자 : 2013년 4월 16일) · 게재일자 : 2013년 4월 30일

<http://dx.doi.org/10.12673/jkoni.2013.17.2.208>

광 펄스의 형태에 매우 큰 영향을 미치기 때문에 광 통신 시스템을 설계할 때 고려해야 할 중요한 파라미터이다. 단일 모드 광섬유 (SMF; single mode fiber)로 설계된 장거리 광전송 시스템에 있어 분산 보상 광섬유 (DCF; dispersion compensating fiber)는 GVD에 의한 신호 왜곡을 보상하는데 필수적이라고 할 수 있다. 즉 일정 길이의 SMF로 구성된 광섬유 중계 구간 (fiber span)마다 축적된 분산을 음의 분산 (negative dispersion)을 갖는 DCF를 추가하여 제거하거나 감소시켜 왜곡을 보상할 수 있다. 이러한 기술을 분산 제어 (DM; dispersion management)라고 한다. DM을 통해 효과적인 보상을 하기 위해서는 중계 구간의 분산량, 광 신호의 채널 파장, 채널 데이터율, 채널의 수와 파장 간격 등의 정확한 시스템 정보를 필요로 한다[2].

DM이 적용된 광전송 시스템에서 성능 향상을 결정하는 주요 파라미터들로 pre- 또는 postcompensation, 광 중계 거리 당 잉여 분산량 (RDPS; residual dispersion per span), 전체 잉여 분산량 (NRD; net residual dispersion) 등이 있다. RDPS는 한 중계 구간에서 축적된 분산량으로 정의되고, NRD는 전송 링크 최종단에서 축적된 총 분산량으로 정의된다[3]. 특히, 이들 중 RDPS와 pre(post)compensation에 의해 최종적으로 결정되는 NRD는 시스템 성능 저하에 영향을 미치는 주요 원인을 어느 정도 크기로 보상할 것인가와 긴밀한 관계가 있다. DM에서 DCF의 사용은 전송 광섬유의 분산 외에 분산 기울기 (dispersion slope)도 동시에 보상할 수 있고, 라만 증폭 (Raman amplification) 매체로도 사용될 수 있다는 장점이 있다[4],[5]. 그러나 DM은 광 신호에 비선형 효과가 영향을 미치지 않는 링크에서만 적용된다는 한계를 갖는다.

GVD에 의한 왜곡뿐만 아니라 Kerr 효과, 즉 비선형성에 의한 왜곡 모두를 효과적으로 보상하는 기술로 광 위상 공액 (optical phase conjugation)이 있다[6]. 이 기술은 광전송 링크의 특정 위치 (일반적으로 전체 링크의 중간)에 있는 광 위상 공액기 (OPC; optical phase conjugator)가 광 신호 전기장의 위상 공액을 발생시켜 OPC 전과 후의 중계 구간에서 축적된 위상 왜곡을 서로 정합(matching, 또는 상쇄)시켜

보상한다. 또한 이 기술은 위와 비슷한 메커니즘으로 비선형 왜곡, 특히 의사 선형 전송 (pseudo-linear transmission) 영역인 40 Gbps 이상의 RZ (return-to-zero) 광 펄스 전송에 가장 큰 영향을 주는 자기 위상 변조 (SPM; self-phase modulation)에 의한 왜곡 보상에 아주 효과적이다.

이러한 특성 때문에 원칙적으로 광 위상 공액 기술은 전송 링크 구성에 있어 DCF와 같은 분산 보상 모듈의 필요성을 제거시킨다. 또한 비선형 현상을 피하기 위해 최대 입사 전력을 제한할 필요가 없고, 차례로 중계 구간의 거리, 즉 광 증폭기 간격을 넓혀 줄 수 있다[7]. 결국 위와 같은 장점으로 전송 링크 구축 비용을 크게 줄여 줄 수 있다. 더욱이, 광 위상 공액 기술은 여러 개의 WDM 채널을 동시에 고품질로 전송할 수 있고[8], 단일 채널로 160 Gbps 이상의 고속 전송을 가능하게 하며, DQPSK (differential quadrature phase shift keying)와 같은 최신 데이터 변조 형식도 효과적으로 보상하는 것으로 알려져 있다 [9],[10].

그러나 실제적으로 광섬유에 존재하는 손실과 에르븀 광섬유 증폭기 (EDFA; erbium-doped fiber amplifier) 등의 사용에 따른 집중 증폭 (lumped amplification) 때문에 OPC를 중심으로 두 전송 구간에서의 광 전력 분포와 분산량을 서로 대칭을 만들기가 힘들어 완벽한 보상을 얻기 어렵다[11]. 다행스럽게도 현재까지 이러한 문제점을 해결하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 대표적인 방법으로 OPC의 최적 위치를 도출하여 적용하거나[12],[13], OPC와 DM 기술을 결합하여 링크에 적용하는 기술 [12],[14],[15] 등이다. 두 가지 기술 모두 비선형성에 의한 왜곡을 크게 억압시키려면 링크와 시스템 파라미터들이 최적화되어야 한다.

본 논문의 저자도 그간의 연구를 통해 OPC와 DM을 결합한 링크에서 최적 NRD를 시스템 파라미터와 관련해 도출하여 적용하면 960 Gbps WDM 신호를 장거리에 걸쳐 고품질로 전송할 수 있다는 것을 살펴보고[16], NRZ 형식에 비해 RZ 형식의 전송에 더욱 유리하다는 것을 살펴보고[17]. 더욱이, DM 적용 링크를 최적화시킴으로써 OPC의 위치가 전체 전송 링크의 중간이 아닌 다양한 위치에 있을 수 있

으며[18], OPC가 중간에 위치한다고 하더라도 중계 구간의 RDPS가 랜덤하게 구성된 링크에도 최적화된 DM이 적용되면 WDM 신호의 효율적인 전송이 이루어진다는 것[19]을 확인하여 유연한 광 네트워크 구조 설계의 가능성을 보였다.

DM 기술에 사용되는 DCF의 특성 중 가장 중요한 것은 분산 계수 (dispersion coefficient)로, 현재 사용되는 DCF는 제조 공정에 따라 일반적으로 -50 ps/nm부터 -250 ps/nm의 값을 갖는다[20]. DM 기술은 분산 계수를 비롯한 여러 특성을 고려하여 DCF를 채택하고, NRD와 RDPS 등의 파라미터 설정 값에 관련하여 DCF의 길이를 결정하여 SMF와 종속 접속시키는 과정을 거친다. 저자가 아는 한 DM을 설계할 때 RDPS를 어떠한 조건으로 결정해야 하는 가하는 가장 기초적인 연구는 없었다. 즉 RDPS를 결정하는 DCF의 분산 계수와 하나의 중계 구간에서의 DCF의 길이와의 관계가 WDM 신호의 보상에 미치는 영향에 대한 분석과 관련한 연구 결과가 없었다. 좀 더 구체적으로 표현하면 한 중계 구간에서 분산 계수가 큰 DCF를 사용하면 짧은 길이를 통해, 반면에 분산 계수가 작은 DCF를 사용하면 긴 길이를 통해 원하고자 하는 RDPS는 구현하는데, 이 두 가지 설계 방법에 따른 WDM 신호 보상 정도에 대한 연구가 보고되지 않았다.

따라서 저자는 DCF의 분산 계수와 길이에 의해 원하는 RDPS에 도달하는데 필요로 하는 분산 보상 속도를 “RDPS 기울기(slope)”라고 정의하여 중간에 OPC가 적용된 전체 전송 링크에서 RDPS 기울기에

따른 960 Gbps (40 Gbps × 24 채널) WDM 신호의 보상 특성을 분석함으로써 각각의 최적 NRD, 유효 입사 전력 등을 도출하고, 결과적으로 최적의 RDPS 기울기를 도출해보고자 한다.

II. 광전송 링크의 모델링

그림 1의 OPC를 중심으로 전반과 후반 전송 구획의 각 7개의 중계 구간 (fiber span = DCF+SMF 또는 SMF+DCF)에서 SMF의 파라미터는 모두 다음과 같이 가정하였다. 길이 $l_{SMF,n} = 80$ km, 손실 계수 $\alpha_{SMF} = 0.2$ dB/km, 분산 계수 $D_{SMF} = 17$ ps/nm /km(@1,550 nm), 비선형 계수 $\gamma_{SMF} = 1.41$ $W^{-1}km^{-1}$ (@1,550 nm). 반면 DCF의 손실 계수 α_{DCF} 는 0.4 dB/km, 비선형 계수 γ_{DCF} 는 4.83 $W^{-1}km^{-1}$ (@1,550 nm)로 중계 구간의 RDPS 기울기와 상관없이 동일하게 가정하였다. 그러나 DCF의 분산 계수와 길이는 RDPS 기울기에 따라 변화되도록 하였다.

그림 1의 광전송 링크를 구성하는 중계 구간의 SMF와 DCF의 조합이 OPC를 중심으로 전반 전송 구획 (Tx부터 OPC까지)과 후반 전송 구획 (OPC부터 Rx까지)에서 서로 대칭되게 하였다. 이는 앞서 언급한 광전송 링크를 구성하는 EDFA에서의 증폭과 광섬유가 갖는 손실 때문에 발생하는 국부 분산과 광전력의 비대칭성을 다소 해소하기 위함이다 [17].

그림 1의 WDM 전체 전송 시스템 구조 밑에 중계

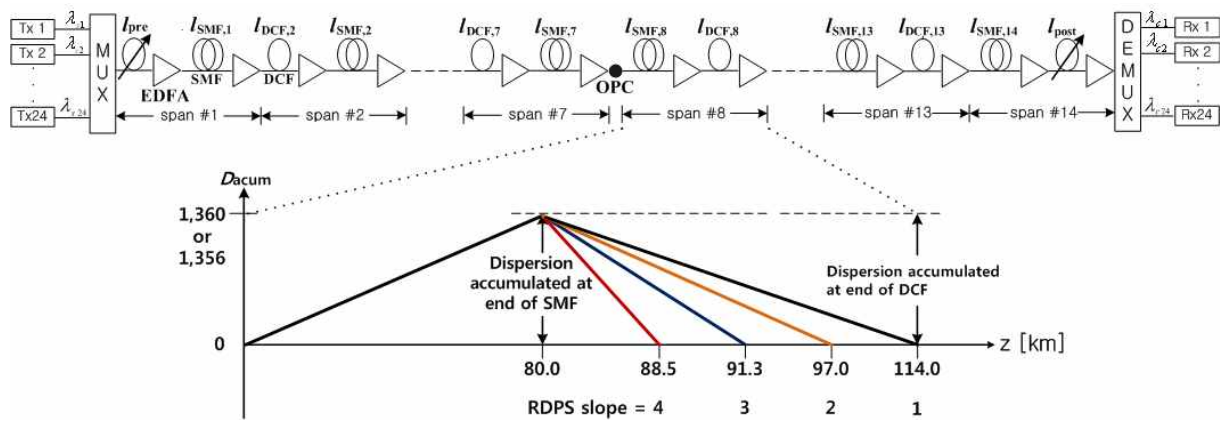


그림 1. 960 Gbps WDM 전송 시스템 구조와 한 중계 구간에서의 분산 맵
 Fig. 1. Configuration of 960 Gbps WDM transmission system and dispersion map of one fiber span.

구간의 RDPS 기울기의 개념을 설명하기 위하여 하나의 광전송 링크의 분산 맵 (dispersion map)을 나타냈다. 그림에서 보는 바와 같이 한 구간의 SMF를 통해 축적된 분산은 DCF를 통해 보상되는데 이때 사용되는 DCF의 분산 계수 (D_{DCF})와 길이 (l_{DCF})에 따라 보상 속도가 달라진다.

즉 DCF의 적은 길이를 통해 한 중계 구간에서 축적된 분산을 제거하기 위해서는 DCF의 분산 계수가 커져야 한다 (즉 적은 길이를 통해 빠르게 보상된다). 이와 같이 사용된 DCF의 길이를 통해 보상되는 분산량 (즉 보상 분산량 / DCF 길이)을 ‘RDPS 기울기’라고 정의하였다. 또한 본 논문에서 정의한 RDPS 기울기는 사용되는 DCF들 사이의 관계를 통해 정규화시켜서 정의했다. 본 논문에서는 표 1에 정리한 바와 같이 DCF의 분산 계수와 길이에 따른 4가지의 RDPS 기울기에 대해 고찰했다.

표 1. RDPS 기울기
Table 1. RDPS slope

RDPS slope	D_{DCF} [ps/nm/km]	l_{DCF} [km]
1	-40	34.0
2	-80	17.0
3	-120	11.3
4	-160	8.5

표 1의 4가지 RDPS 기울기는 모두 각 중계 구간의 RDPS가 0 ps/nm인 경우의 값이다. 즉 SMF에 의한 분산이 축적되지 않은 중계 구간에서 RDPS 기울기는 파라미터를 통해 사용된 DCF의 분산 계수와 길이가 광 신호 왜곡 보상에 어떠한 영향을 미치고, 결과적으로 어떤 조건으로 분산 제어 전송 링크를 설계하여야 하는가를 살펴보고자 하는 것이다.

본 연구에서 RDPS는 0 ps/nm로 하였기 때문에 WDM 채널 보상에 대한 영향을 분석하는데 이용되는 DM 파라미터는 NRD와 pre(post)compensation이다. 본 논문에서 NRD는 마지막 중계 구간을 포함한 13개의 중계 구간을 제외한 첫 번째 중계 구간 (span 1)의 DCF 길이 (그림 1의 l_{pre})의 조절로 얻어지는 precompensation, 또는 첫 번째 중계 구간을 포함한 13개의 중계 구간을 제외한 마지막 중계 구간 (span 14)의 DCF 길이(그림 1의 l_{post})의 조절로 얻어지는 postcompensation을 통해 결정하도록 하였다. 즉 이렇

게 제어되는 NRD에 따른 WDM 채널의 성능을 기초로 하여 RDPS 기울기의 영향을 분석하였다. pre(post)compensation에 이용되는 첫 번째와 마지막 중계 구간의 DCF의 분산 계수는 나머지 중계 구간의 DCF의 분산 계수와 동일하게 하였다.

III. WDM 전송 시스템의 모델링

본 논문에서 고려한 24 채널 (채널 비트율 40 Gbps) 전송을 위한 WDM 시스템의 송신부, 수신부 및 전체 전송로 중간에 위치한 OPC의 세부 구성과 구체적인 파라미터는 저자의 DM 관련 논문들과 동일하게 모델링하였다 [16]-[19]. 즉 그림 1의 24개 송신기(Tx)는 분포 궤환 레이저 다이오드 (DFB-LD; distributed feedback laser diode)로 가정하였고, 채널 1과 24의 DFB-LD의 중심 파장은 각각 1,550 nm와 1,568.4 nm로 하고 각 채널의 파장 간격은 ITU-T G.694.1의 권고에 따라 100 GHz (즉 0.8 nm)로 모델링하였다. 각 DFB-LB는 서로 독립적인 128(=27)의 사 랜덤 비트열 (PRBS; pseudo random bit sequence)에 의해 외부적으로 변조되는 것으로 모델링하였다. 이 때 외부 변조기로부터 발생하는 변조 파형 형식은 소광비 (ER; extinction ratio)가 10 dB인 2차 가우시안 펄스의 RZ로 모델링하였다.

OPC는 HNL-DSF(highly nonlinearity - dispersion shifted fiber)를 비선형 매질로 갖는 구조로 모델링하였고, 수신기는 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 모델링하였다. 수신 대역폭은 0.65 x 비트율로 가정하였다.

IV. 수치 해석 방법과 성능 평가

광전송 링크를 통해 손실과 비선형 효과의 영향을 겪으면서 전파하는 각 채널들은 식 (1)의 비선형 슈뢰딩거 방정식 (NLSE; nonlinear Schrödinger equation)에 의해 표현된다.

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

여기서 $j, k=1,2,\dots,16$, A_j 는 WDM의 j -번째 채널의 포락선, α 는 광섬유의 손실 계수, β_{2j} 는 색 분산 파라미터, β_{3j} 는 3차 색 분산 파라미터, $\gamma_j = (2\pi n_2 / A_{eff} \lambda_j)$ 는 비선형 계수, n_2 는 비선형 굴절 계수, A_{eff} 는 광섬유의 유효 코어 영역, λ_j 는 j -번째 채널의 신호 파장, $T = t - z/v_j$ 이다. 본 논문에서 식 (1)의 수치적 분석은 단계 분할 푸리에 (SSF; split-step Fourier) 기법을 이용하여 Matlab으로 구현하여 이루어졌다.

본 연구에서 사용한 시스템의 수신 성능은 아래 식으로 정의된 눈 열림 패널티 (EOP; eye opening penalty)이다.

$$EOP[dB] = 10 \log_{10} (EO_{rec} / EO_{btb}) \quad (2)$$

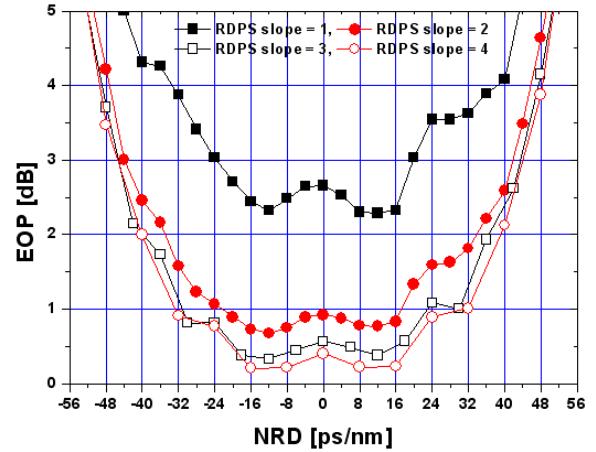
식 (2)에서 EO_{rec} 는 수신 신호의 눈 열림 (EO; eye opening) 정도이고 EO_{btb} 은 광섬유 전송 링크에 입사되기 전 송신 신호의 눈 열림 정도로 EO는 아래와 같이 정의된다.

$$2P_{av} / (P_{1,min} - P_{0,max}) \quad (3)$$

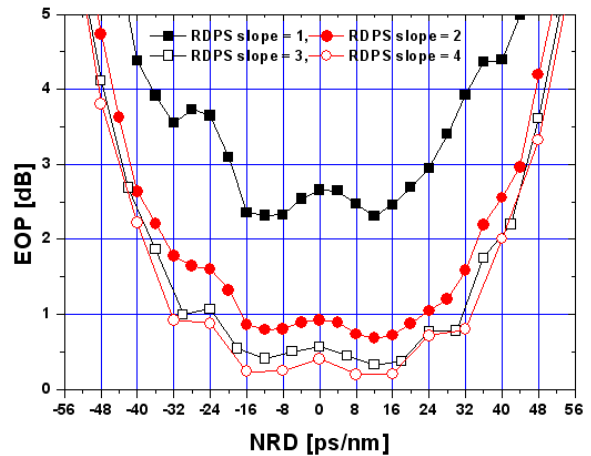
여기서 P_{av} 는 광 신호의 평균 전력, $P_{1,min}$ 은 펄스 '1'의 최소 전력이고 $P_{0,max}$ 은 펄스 '0'의 최대 전력이다.

앞서 언급한 WDM 채널 보상을 분석하는데 이용되는 DM 파라미터인 NRD는 전송 링크의 RDPS 기울기에 따라 다르게 설정하였다. 이는 NLSE의 수치 분석 기법인 SSF의 구현에 있어 결과의 정확성을 위해 모든 DCF의 수치 해석 간격을 일정하게 하여야 하는 것으로부터 기인한다. 즉 RDPS 기울기에 따라 선택되는 DCF의 서로 다른 분산 계수에 대해서도 DCF 길이의 수치 해석 간격이 모두 같아져야 하기 때문에 결과적으로 NRD가 달라질 수밖에 없기 때문이다.

V. 시뮬레이션 결과 및 검토



(a) NRD determined by precompensation, $P_s = 0$ dBm



(b) NRD determined by postcompensation, $P_s = 0$ dBm

그림 2. RDPS 기울기별 NRD 변동에 따른 최악 채널의 EOP
Fig. 2. The EOP of the worst channel as a function of the NRD variation for each RDPS slope.

그림 2의 (a)와 (b)는 입사 전력이 0 dBm인 24개의 WDM 채널 중 EOP 특성이 가장 나쁘게 나타나는 최악 채널의 EOP를 각각 precompensation과 post-compensation에 의해 결정되는 NRD의 변화에 따라 RDPS 기울기별로 나타낸 것이다. 앞서 언급했듯이 RDPS 기울기에 따라 시뮬레이션에 사용된 수치적 NRD 간격이 서로 달라 단순한 비교는 어렵지만 최악 채널의 EOP를 최소로 만드는 최적의 NRD는 0 ps/nm에 가까운 값들이라는 것을 확인할 수 있다. 이 값들은 의사 선형 (pseudolinear) 시스템에서의 최적 NRD를 다룬 참고 문헌 [3]의 Xiao의 연구와 상응하는 결과이다. 예를 들면, RDPS 기울기가 2로 설계된

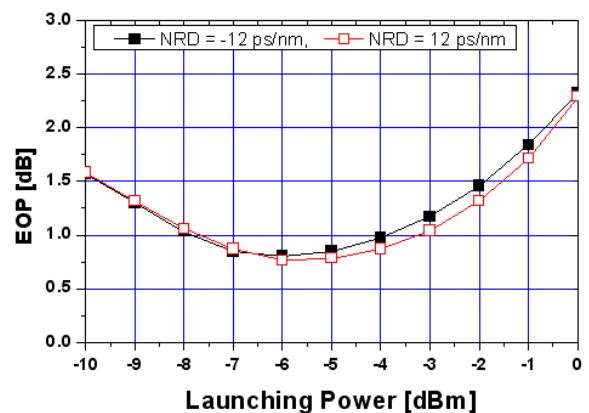
표 2. 입사 전력에 따른 최적 NRD
Table 2. The optimal NRD for the launch power

RDPS slope	Ps	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	
1	pre	-12	-12	-12	12	12	12	12	12	12	12	12						
	post	12	12	12	12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	12						
2	pre	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12					
	post	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12					
3	pre	12	12	12	12	12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12
	post	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
4	pre	8	8	8	8	8	8	8	8	-16	-16	-16	-16	-16	-8	-16	-16	
	post	-8	-8	-8	-8	-8	16	16	16	16	8	8	8	8	8	8	16	

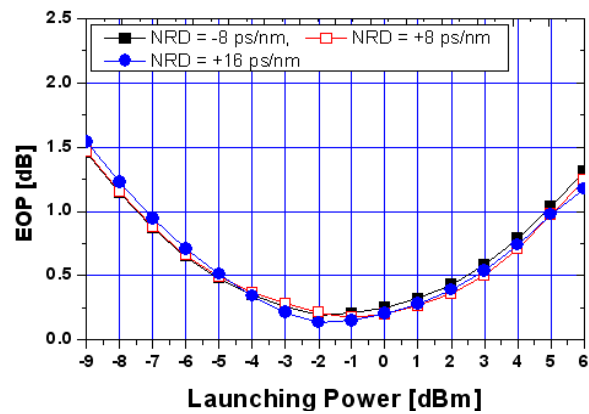
광전송 링크에서 precompensation에 의해 결정되는 최적의 NRD는 -12 ps/nm에서 얻어지고, RDPS 기울기가 3으로 설계된 광전송 링크에서 postcompensation에 의해 결정되는 최적의 NRD는 12 ps/nm에서 얻어진다.

그림 2는 WDM 채널들 각각의 입사 전력이 0 dBm인 경우의 결과만을 나타낸 것이다. 최적의 NRD는 RDPS 기울기뿐만 아니라 WDM 채널 입사 전력에도 의존하는 것을 알아보기 위하여 그림 2와 같은 분석을 다양한 입사 전력에 따라 수행하여 각 입사 전력별로 최악 채널의 EOP를 가장 작게 만드는 최적 NRD를 표 2에 정리하였다.

표 2를 통해 최적 NRD는 RDPS 기울기뿐만 아니라 WDM 채널의 입사 전력에 의존하여 달라지는 것을 알 수 있다. 하지만 최적 NRD가 입사 전력에 따라 서로 다른 다양한 값을 갖는 것이 아니라 0 ps/nm 근처의 몇 개의 값으로 수렴하는 것을 동시에 알 수 있다. 특히, RDPS 기울기가 2인 경우 고려한 모든 입사 전력에 대해 최적 NRD가 precompensation으로 조절하는 경우 -12 ps/nm, postcompensation으로 조절하는 경우 12 ps/nm의 하나의 값으로 얻어진다. 이 경우를 제외한 나머지 RDPS 기울기로 설계된 광전송 링크에서는 입사 전력에 따라 2개 또는 3개의 값을 갖는데 실제 광전송 링크 설계 시 입사 전력의 변화될 때마다 NRD를 변화시켜 구성하는 것이 어려우므로 모든 전력에 대해 수신 성능을 가장 양호하게 만드는 시스템 최적 NRD를 찾아야 한다.



(a) NRD determined by precompensation, RDPS slope = 1



(b) NRD determined by postcompensation, RDPS slope = 4

그림 3. 최적 NRD에서 입사 전력에 따른 EOP
Fig. 3. EOP as a function of the launch power at several optimal NRDs.

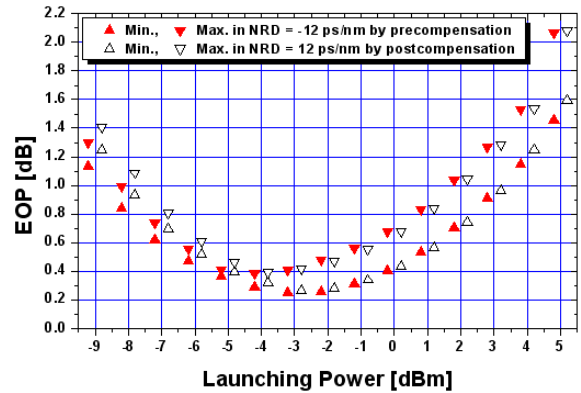
이를 도출하기 위해 표 2에 정리된 RDPS 기울기 별로 얻어진 최적 NRD들로 설계된 광전송 링크에 고려한 모든 입사 전력의 WDM 채널들을 전송시킨 경우 수신 성능을 비교하였다. 즉 표 2의 결과에서

RDPS 기울기가 1이고 precompensation으로 NRD를 결정하는 광전송 링크에서 최적 NRD는 입사 전력이 -9부터 -7 dBm인 경우 -12 ps/nm로, -6부터 1 dBm인 경우 12 ps/nm로 얻어진다. 이 두 값 중 시스템 최적 NRD를 결정하기 위해 NRD가 -12 ps/nm로 설계된 링크와 12 ps/nm로 설계된 링크 각각을 통해 -9부터 1 dBm의 WDM 채널들을 전송시켰을 때 얻어지는 EOP를 그림 3(a)에 나타냈다. 본 연구에서 사용한 수신 성능의 기준은 1 dB의 EOP로, 그림 3(a)를 통해 두 최적 NRD에서 입사 전력에 따른 EOP 특성이 비슷하게 얻어지기는 하지만 1 dB EOP 이하를 만드는 입사 전력 범위는 NRD가 12 ps/nm로 설정된 경우에서 다소 늘어나는 것을 알 수 있다. 따라서 RDPS 기울기가 1이고 precompensation으로 NRD를 조절하는 광전송 링크의 시스템 최적 NRD는 12 ps/nm로 판단할 수 있다. 또한 그림 3(b)를 통해 RDPS 기울기가 4이고 postcompensation으로 NRD를 조절하는 광전송 링크의 시스템 최적 NRD는 8 ps/nm로 얻어진다. 그리고 나머지 6가지를 포함 모든 경우에서 도출된 시스템 최적 NRD를 표 3에 정리하였다.

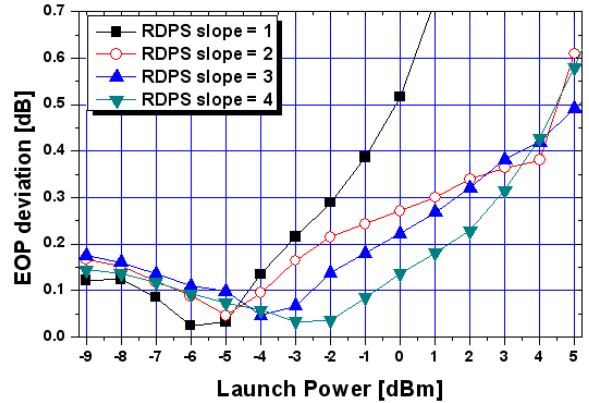
WDM 전송을 위한 광전송 링크가 최적으로 설계되었다고 하더라도 전송 성능은 WDM 채널의 파장에 의존하기 때문에 채널 파장에 따른 수신 성능의 차이가 크게 나타난다면 효율적인 WDM 전송을 할 수 없다. 이러한 이유로 RDPS 기울기에 의존하는 시스템 최적 NRD로 설계된 광전송 링크에서의 채널 파장별 EOP 편차를 살펴볼 필요가 있다.

표 3. RDPS 기울기
Table 3. RDPS slope

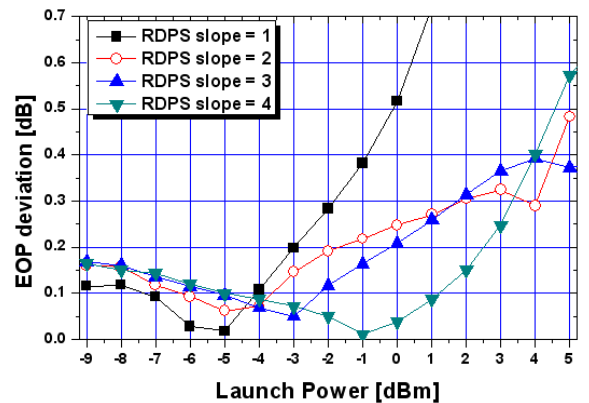
RDPS slope	NRD 결정	시스템 최적 NRD [ps/nm]
1	precompensation	12
	postcompensation	-12
2	precompensation	-12
	postcompensation	12
3	precompensation	-12
	postcompensation	12
4	precompensation	8
	postcompensation	8



(a) The EOP of the best and worst channels; RDPS slope = 2



(b) The EOP deviations; precompensation



(c) The EOP deviations; postcompensation

그림 4. WDM 채널 간 EOP 편차 분석

Fig. 4. The analyses of EOP deviation between WDM channels.

그림 4(a)는 표 3의 시스템 최적 NRD로 설계된 RDPS 기울기가 2인 광전송 링크에서 가장 양호한 WDM 채널의 EOP와 최악 채널의 EOP를 입사 전력에 따라 나타낸 것이다. 채널 파장에 따른 EOP 차이가 입사 전력에 따라 달라지는 것을 확인할 수 있는데, -4 dBm 이상의 비교적 입사 전력이 큰 범위에서 채널 파장에 따른 EOP 편차가 입사 전력에 의존하

여 더욱 증가되는 것을 알 수 있다. 이러한 WDM 채널 파장에 따른 EOP 편차가 RDPS 기울기와 어떠한 관계가 있는 지를 살펴보기 위해 분석한 그래프가 그림 4(b)와 (c)이다. 그림 4(b)와 (c)는 각각 precompensation과 postcompensation에 의해 NRD를 결정하는 링크에서 표 3의 RDPS 기울기별 시스템 최적 NRD로 설계된 광전송 링크에서의 EOP 편차를 입사 전력에 따라 나타낸 것이다. precompensation과 postcompensation으로 NRD를 조절하는 경우 모두 -3 dBm 이상의 입사 전력에서 RDPS 기울기가 커질수록 EOP 편차가 줄어드는 것을 보여주기 때문에 24 개의 WDM 채널 모두의 효과적인 전송을 위해서는 광전송 링크의 RDPS 기울기가 커져야 한다는 것을 확인할 수 있다.

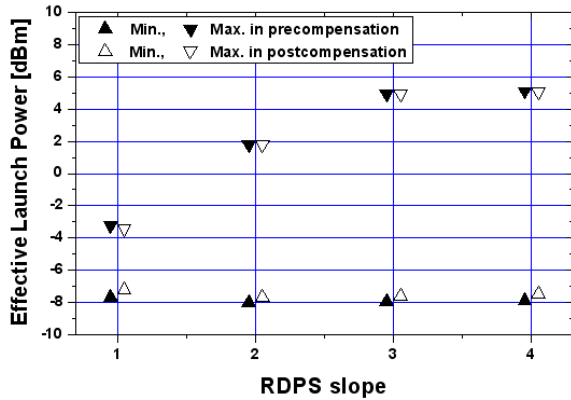


그림 5. 시스템 최적 NRD에서 유효 입사 전력
Fig. 5. The effective EOP in the system optimal NRD.

그림 5는 표 3의 RDPS 기울기별 시스템 최적 NRD로 설계된 광전송 링크에서 최악 채널의 EOP가 1 dB가 되는 유효 입사 전력 (effective launch power) 을 나타낸 것이다. 모든 RDPS 기울기에서 전반적으로 시스템 최적 NRD를 precompensation으로 결정하는 구조가 postcompensation에 의해 결정되는 구조보다 유효 입사 전력 범위를 다소 넓어지게 하는 것을 확인할 수 있다. 또한 시스템 최적 NRD로 설계된 광전송 링크의 RDPS 기울기를 증가시킬수록 1 dB EOP 이하의 EOP로 전송될 수 있는 WDM 채널들의 입사 전력의 폭을 더욱 있는 것을 확인할 수 있다.

그림 2를 다시 한 번 분석해 보면, 수신 성능 기준인 1 dB EOP를 얻을 수 있는 NRD는 앞서 도출한 최

적 NRD 외에 다양한 값을 갖는 것을 알 수 있다. 또한 실제로 RDPS 기울기마다 하나의 고정된 최적 NRD만을 사용하게 되면 유연한 링크 설계와 구성을 어렵게 만든다. 즉 실제 광전송 링크에 최적 NRD를 적용하는데 있어 어느 정도의 여유를 두어야 광전송 링크 설계에서의 유연성을 확보할 수 있다. 유연한 광전송 링크의 설계에 적용하기 위하여 1 dB 이하의 EOP를 얻을 수 있게 해주는 NRD 범위를 유효 NRD 범위 (effective NRD range)라고 정의하고 precompensation으로 NRD를 결정하는 구조에서의 RDPS 기울기와 입사 전력에 따른 유효 NRD 범위를 그림 6에 나타냈다.

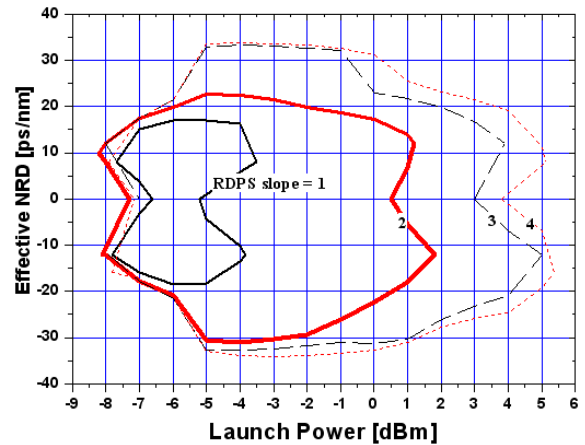


그림 6. 입사 전력에 따른 유효 NRD
Fig. 6. Effective NRD as a function of launch power.

앞서 얻은 결과와 마찬가지로 RDPS 기울기가 증가할수록 보다 넓은 입사 전력 범위에 대한 유효 NRD 범위가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 예를 들어, RDPS 기울기가 1로 설계된 광전송 링크에서 NRD를 8 ps/nm로 설정했다면 1 dB EOP 이하를 얻을 수 있는 입사 전력 범위가 약 3 dB (-7.5~4.5 dBm)인데 반해 RDPS 기울기가 4로 설계된 광전송 링크에서는 약 13 dB (-8~5 dBm)로 10 dB 정도 높아지는 것을 알 수 있다. 또한 동일한 WDM 채널 입사 전력에 대해서도 RDPS 기울기가 증가할수록 유효 NRD 범위가 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 즉 예를 들어, 입사 전력이 0 dBm인 WDM 채널을 효과적으로 전송시키고자 하는 경우 RDPS 기울기가 1로 설계된 광전송 링크에서는 어떠한 NRD로도 1 dB EOP 이하의 수신 성능을 얻는 것이 불가능하지

만 RDPS 기울기가 4로 설계된 광전송 링크에서는 NRD를 -30부터 30 ps/nm 사이에서 하나의 값을 갖도록 하면 모든 채널을 1 dB EOP 이하의 성능으로 전송시킬 수 있다는 것을 알 수 있다.

VI. 결 론

광섬유가 갖는 GVD와 비선형 효과의 상호 작용에 의해 왜곡되는 WDM 신호들을 보상하기 위해 광위상 공액과 DM이 적용된 전송 링크에서 DCF의 분산 계수와 길이에 의해 결정되는 RDPS 기울기에 따른 광 신호 보상 특성을 살펴보았다.

우선, 본 논문에서 고려한 모든 입사 전력의 채널들을 효과적으로 전송할 수 있는 시스템 최적 NRD는 RDPS 기울기에 의존하지만 고려한 모든 RDPS 기울기에 대해 0 ps/nm에 가까운 비교적 적은 값을 갖는 것을 확인하였다.

본 연구를 통해 얻은 중요한 결과는 중계 구간마다 DM을 적용한 광전송 링크 설계에 있어 RDPS 기울기를 크게 할수록 보다 넓은 입사 전력 범위에 대해 채널 파장 간 수신 성능의 차이를 최소로 하여 WDM 채널들을 더욱 효과적으로 전송할 수 있다는 것이다. 또한 수신 성능을 1 dB EOP 이하로 만드는 유효 NRD 범위가 더욱 증가되기 때문에 유연한 광전송 링크 설계 측면에서도 광전송 링크의 RDPS 기울기를 더욱 증가시켜야 효과적이라는 것을 확인할 수 있었다.

광 중계 구간의 RDPS 기울기가 증가될수록 DCF의 길이를 더욱 짧아지게 한다. 따라서 본 연구에서 도출한 결과는 WDM 채널들의 고품질 전송을 위한 구조의 유연성과 경제성 면에서 링크 설계 기술에 있어 중요한 지침이 될 것으로 기대된다.

Reference

[1] C. E. S. Castellani, S. P. N. Cani, M. E. V. Segatto, M. J. Pontes, and M. A. Romero, "Numerical comparison between conventional dispersion compensating

fibers and photonic crystal fibers as lumped Raman amplifiers," *Opt. Express*, Vol. 17, No. 25, pp. 23169~23180, 2009.

- [2] A. H. Gnauck and R. M. Jopson, "Dispersion compensation for optical fiber systems," in *Optical Fiber Telecommunications III A*, I. P. Kaminow and T. L. Koch, eds., Academic Press, San Diego, 1997.
- [3] X. Xiao, S. Gao, Y. Tian, and C. Yang, "Analytical optimization of the net residual dispersion in SPM-limited dispersion-managed systems," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 24, No. 5, pp. 2038~2044, 2006.
- [4] P. B. Hansen, G. Jacobovitz-Veselka, L. Gruner-Nielsen, and A. J. Stentz, "Raman amplification for loss compensation in dispersion compensating fiber modules," *Electron. Lett.*, Vol. 34, No. 11, pp. 1136~1137, 1998.
- [5] J. D. Ania-Castañón, and S. K. Turitsyn, "Noise and gain optimization in bi-directionally pumped dispersion compensating amplifier modules," *Opt. Commun.*, Vol. 224, No. 1-3, pp. 107~111, 2003.
- [6] 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.
- [7] M. D. Pelusi, F. Luan, D. Y. Choi, S.J. Madden, D. A. P. Bulla, B. Luther-Davies, and B. J. Eggleton, "Optical phase conjugation by an As₂S₃ glass planar waveguide for dispersion-free transmission of WDM-DPSK signals over fiber," *Opt. Express*, Vol. 18, No. 25, pp. 26686~26694
- [8] S. L. Jansen, D. van den Borne, P. M. Krummrich, S. Spälter, G.-D. Khoe, and H. de Waardt, "Long-haul DWDM transmission systems employing optical phase conjugation," *IEEE J. Sel. Top. Quant.*, Vol. 12, No. 4, pp. 505~520, 2006.
- [9] H. Hu, R. Nouroozi, R. Ludwig, B. Huettl, C. Schmidt-Langhorst, H. Suche, W. Sohler, and C. Schubert, "Polarization-insensitive all-optical wavelength conversion of 320 Gb/s RZ-DQPSK signals using a Ti:PPLN waveguide," *Appl. Phys. B*, Vol. 101, No. 4, pp. 875~882, 2010.

- [10] X. Wu, W.-R. Peng, V. Arbab, J. Wang, and A. Willner, "Tunable optical wavelength conversion of OFDM signal using a periodically-poled lithium niobate waveguide," *Opt. Express*, Vol. 17, No. 11, pp. 9177~9182, 2009.
- [11] 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. 14, No. 3, pp 243~248, 1996.
- [12] X. Xiao et al., "Partial compensation of Kerr nonlinearities by optical phase conjugation in optical fiber transmission systems without power symmetry," *Opt. Commun.*, Vol. 265, No. 1, pp. 326~330, 2006.
- [13] P. Minzioni, F. Alberti, and A. Schiffrini, "Optimized link design for nonlinearity cancellation by optical phase conjugation," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 16, No. 3, pp. 813~815, 2004.
- [14] A. Chowdhury and R.-J.Essiambre, "Optical phase conjugation and pseudolinear transmission," *Opt. Lett.*, Vol. 29, No. 10, pp. 1105~1107, 2004.
- [15] P. Minzioni and A. Schiffrini, "Unifying theory of compensation techniques for intrachannel nonlinear effects," *Opt. Express*, Vol. 13, No.21, pp. 8460~8468, 2005.
- [16] S. R. Lee, "Dispersion managed optical transmission links with optimized optical phase conjugator", *International Journal of KIMICS*, Vol. 7, No. 3, pp. 372~376, 2009.
- [17] S. R. Lee, S. E. Cho, "NRZ versus RZ modulation format in lumped dispersion managed systems", *J. The Korea Institute of Maritime Information & Communication Sciences*, Vol. 12, No. 2, pp. 327~335, 2008.
- [18] S. R. Lee, "Performance improvement of WDM channels using inline dispersion management in transmission links with OPC placed at various position", *J.Korea Navigation Institut*, Vol. 14, No. 5, pp. 668~676, 2010.
- [19] S. R. Lee, "Performance improvement of WDM signals through precompensation and postcompensation in dispersion managed optical transmission links with

artificial distribution of single mode fiber length and RDPS", *J. The Korea Institute of Information & Communication Sciences*, Vol. 16, No. 10, pp. 2293~2302, 2012.

- [20] L. Grüner-Nielsen, M. Wandel, P. Kristensen, C. Jørgensen, L. V. Jørgensen, B. Edvold, B. Pálsdóttir, and D. Jakobsen, "Dispersion-compensating fibers", *J. Lightwave Technol.*, Vol. 23, No. 11, pp. 3566~3579, 2005.

이성렬 (Seong-Real Lee)



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 해양정보통신공학과 부교수

관심분야 : WDM 시스템, 광의 비선형 현상 분석, 광솔리톤 전송