

SMF 길이와 RDPS의 분포 패턴에 따른 왜곡된 WDM 신호의 보상 특성

Compensation Characteristics of Distorted WDM Signals Depending on Distribution Patterns of SMF Length and RDPS

이성렬

목포해양대학교 해양정보통신공학과

Seong-Real Lee

Department of Marine Information and Communication Engineering, Mokpo National Maritime University, Jeollanam-do, 530-729, Korea

[요 약]

고품질 초고속 광 신호 전송을 위해서는 그룹 속도 분산과 비선형 현상에 의한 왜곡을 억제하거나 줄여주는 기술이 필요하다. 가장 대표적인 기술로 분산 제어 (DM; dispersion management), 광 위상 공액 기술과 이 둘을 결합한 기술이 있다. 하지만 이러한 기술들에서 현재 사용되고 있는 단일 모드 광섬유의 고정 길이와 중계 구간 당 잉여 분산 (RDPS; residual dispersion per span)의 고정 값은 유연한 링크 구성을 제한하고 있다. 본 연구의 목적은 광전송 링크를 구성하는 모든 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS의 인위적 분포와 랜덤 분포를 통한 초고속 장거리 광전송 시스템의 유연한 구성 가능성을 살펴보는 것이다. 전송 링크 전체의 평균 RDPS와 입사 전력과 같은 링크 파라미터에 의존하지만 제안한 링크 구조들이 유연한 광전송 시스템 구성에 유용하다는 것을 확인하였다.

[Abstract]

For transmitting the ultra-high speed optical signals with better performance, the techniques to suppress or mitigate the signal distortion due to group velocity dispersion and optical Kerr effects are required. Dispersion management (DM), optical phase conjugation, and the combination of these two are promising techniques to compensate for the signal distortion. However, the fixed length of single mode fiber (SMF) and the fixed residual dispersion per span (RDPS) usually used in these optical links restricts flexible link configuration. The goal of this paper is to investigate the possibility of the flexible configurations of the ultra-high and long-haul optical transmission systems by using the artificial and the random distribution of SMF length and RDPS of each fiber spans consisted of the optical link. It is confirmed that the proposed link configurations should be one of the methods suitable for implementing the flexible optical transmission systems, however which depend on other link parameters, such as the averaged RDPS, and the launch power.

Key word : Dispersion management, Optical phase conjugation, Single mode fiber, Residual dispersion per span, Net residual dispersion.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2014.18.2.158>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 25 March 2014; Revised 24 April 2014

Accepted (Publication) 23 April 2014 (30 April 2014)

*Corresponding Author; Seong-Real Lee

Tel: +82-61-240-7264

E-mail: reallee@mmu.ac.kr

1. 서론

현재 파장 분할 다중 (WDM; wavelength division multiplexing) 시스템은 전송 용량을 늘리기 위해 채널 당 비트율의 고속화[1] 스펙트럼의 고효율화[2] 새로운 전송 대역의 이용[3], [4] 등을 꾀하고 있다. 이러한 시스템의 구현을 위해서 광섬유는 비선형성과 분산(dispersion)에 매우 강해야 한다.

이러한 요구를 충족하는 광섬유로 비 분산 천이 광섬유 (NDF; non-dispersion shifted fiber)와 분산 보상 광섬유 (DCF; dispersion compensating fiber)가 개발되었다 [5]–[8]. 특히 가장 많이 포설되어 있는 손실이 낮은 파장 대역에서 초고속 통신을 가능하게 하는 단일 모드 광섬유 (SMF; single mode fiber)에서의 큰 그룹 속도 분산 (GVD; group velocity dispersion)은 시스템 성능을 크게 저하시키므로 SMF에 부가적으로 반대의 분산 특성을 갖는 DCF를 적용하는 기술인 분산 제어 (DM; dispersion management)는 매우 유용하게 사용되고 있다. 또한 DM은 SMF의 분산 외에 분산 기울기 (dispersion slope)도 동시에 보상할 수 있고, 라만 증폭 (Raman amplification) 매체로도 사용될 수 있다는 장점이 있다[9]. 그러나 DM은 SMF에 의한 자기 위상 변조 (SPM; self phase modulation) 등의 비선형 왜곡을 보상하지 못하는 한계가 있다.

분산 보상뿐만 아니라 비선형 왜곡 보상에 효과가 있는 대표적 기술로 전체 전송로의 중간에 광 위상 공액기 (OPC; optical phase conjugator)를 두어 송신단부터 OPC까지 전송되면서 왜곡된 신호의 스펙트럼을 OPC에서 반전시켜 나머지 구간 (OPC부터 수신단까지)을 전송시켜 보상하는 광 위상 공액이 있다 [10],[11]. 그러나 광 위상 공액 기술은 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[12].

다행스럽게도 GVD와 비선형 현상이 존재하는 광전송 링크에 이 두 기술을 동시에 적용하면 DM에 의해 광 위상 공액 기술에서의 광 전력 분포와 분산의 비대칭 문제가 완화될 수 있고, 결과적으로 신호 왜곡 보상 효과를 더욱 증가시키는 것으로 알려져 있다 [13].

본 논문의 저자도 DM과 OPC를 최적화시켜 광전송 링크에 적용하면 960 Gbps (40 Gbps × 24 채널) 파장 분할 다중 (WDM; wavelength division multiplexing) 신호를 양호한 성능으로 전송할 수 있다는 것을 선행 연구를 통하여 확인하였다[14]. 연구 결과 중 주목할 만한 것은 변조 파형 형식, 중계 구간의 개수, WDM 채널 수에 관계없이 최적의 전체 잉여 분산 (NRD; net residual dispersion)은 0 ps/nm가 아닌 precompensation과 postcompensation에 의해 각각 10

ps/nm 또는 -10 ps/nm로 결정된다는 것이다.

지금까지의 DM 관련 논문들은 SMF 길이와 중계 구간 당 잉여 분산 (RDPS; residual dispersion per span)을 모든 중계 구간에서 균일하게 한 링크 구조를 사용하였다. 이러한 구조는 광전송 링크 구성을 간단하게 만든다는 장점이 있지만, 광 네트워크 형태(topology)의 유연한 구성에 제약을 준다.

따라서 본 연구에서는 고정되지 않은 분포 패턴을 광전송 링크에 적용하고, 이 경우의 WDM 신호의 시스템 성능을 분석하여 광 네트워크의 유연한 구성 가능성을 알아보고자 한다. 본 연구에서 고려한 광전송 링크의 SMF 길이와 RDPS는 균일 분포, 인위적 분포, 그리고 랜덤 분포 3 종류이다. 만일 동일한 조건에서 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS의 분포가 인위적이거나 랜덤한 경우의 시스템 성능이 균일한 분포에서의 성능보다 개선된다면 이의 적용을 통한 고품질의 유연한 광 네트워크의 구현 가능성이 높아질 것으로 예상할 수 있다.

II. WDM 전송 시스템과 광전송 링크의 구성

2-1 WDM 전송 시스템의 모델링

그림 1은 본 논문에서 살펴볼 24 채널 × 40 Gbps의 WDM 전송 시스템과 이를 위한 광전송 링크의 구성도이다. WDM 시스템의 송신부, 수신부 및 전체 전송로 중간에 위치한 OPC는 HNL-DSF(highly nonlinearity – dispersion shifted fiber)를 비선형 매질로 갖는 구조로 모델링하였고, 그 세부 구성과 파라미터 값은 저자의 DM 관련 논문과 동일하게 모델링하였다 [14].

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 $128(=2^7)$ 의사 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.

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 × 비트율로 가정하였다.

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

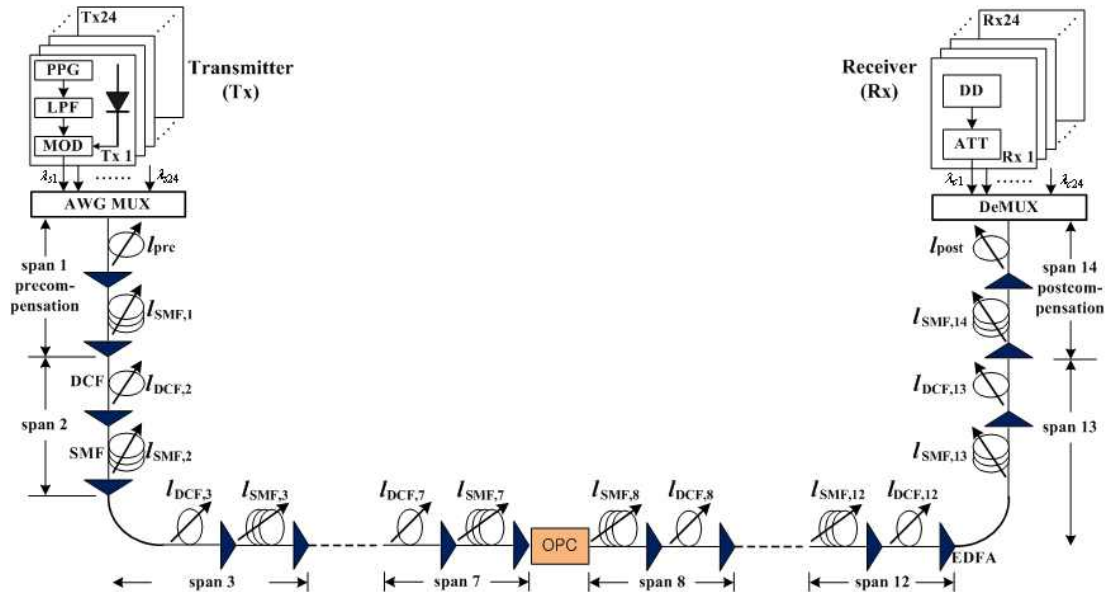


그림 1. 24x40 Gbps WDM 전송 시스템 구조
 Fig. 1 Configuration of 24x40 Gbps WDM transmission system.

논문에서 40 Gbps의 24 채널 WDM 전송을 위한 NLSE의 수치적 분석은 단계 분할 푸리에 (SSF; split-step Fourier) 기법[15]에 따라 Matlab으로 구현하여 이루어졌다.

2-2 광전송 링크의 모델링

OPC를 중심으로 전반 전송 구획 (former half section)과 후반 전송 구획 (latter half section)의 중계 구간 개수는 동일하게 7개로 가정하였다. OPC를 중심으로 국부 분산과 광 전력의 분포를 대칭에 가깝게 하고, NRD를 결정하는 precompensation과 postcompensation을 각각 링크의 가장 앞 (즉 AWG MUX 다음)과 가장 끝 (즉 DeMUX 전)에 있는 DCF를 통해 수행시키기 위하여 전반 전송 구획에서는 DCF 다음에 SMF가 오고, 후반 전송 구획에서는 SMF 다음에 DCF가 오도록 하였다.

각 전송 구획의 7개 중계 구간을 구성하는 SMF의 길이는 평균적으로 80 km가 되도록 모델링하였다. 즉 각 중계 구간의 SMF 길이는 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110 km 중 하나가 되도록 하였다. 인위적인 분포의 경우에는 OPC를 중심으로 중계 구간이 증가할수록 점점 증가시키는 구조 (ascending distribution)와 감소시키는 구조 (descending distribution)의 2가지가 조합되도록 하였다. 예를 들어, AD(ascending-descending) 구조는 전반 전송 구획의 SMF 길이 분포는 중계 구간이 증가됨에 따라 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110 km, 후반 전송 구획의 SMF 길이 분포는 중계 구간이 증가됨에 따라 110, 100, 90, 80, 70, 60, 50 km가 되도록 하였다. 이외에도 AA(ascending-descending), DD(descending-descending), DA(descending-ascending)가 포함되어 총 4가지

의 분포가 가능하다. 랜덤 분포의 경우는 7개 중계 구간의 SMF 길이 각각이 상기의 7개 값 중 하나로 랜덤하게 선택되도록 모델링하였다. 그러나 균일 분포의 경우 7개 중계 구간의 SMF 길이는 모두 80 km로 하였다.

모든 중계 구간의 SMF의 기타 파라미터들은 다음과 같이 고정된 값으로 모델링하였다; 손실 계수 $\alpha_{SMF} = 0.2$ dB/km, 분산 계수 $D_{SMF} = 17$ ps/nm/km(@1,550 nm), 비선형 계수 $\gamma_{SMF} = 1.35$ W⁻¹km⁻¹(@1,550 nm).

각 중계 구간의 RDPS의 결정은 DCF의 길이의 조정을 통해 이루어진다. 즉 달리 말해, 각 중계 구간에 적용하고자 하는 RDPS가 결정되면 각 중계 구간의 DCF 길이는

$$l_{DCF} = \frac{(D_{SMF} \times l_{SMF}) - RDPS}{|D_{DCF}|} \tag{1}$$

으로 결정된다. 여기서 l_{SMF} 는 해당 중계 구간의 SMF 길이이고, D_{DCF} 는 DCF의 분산 계수이다.

각 전송 구획의 첫 번째와 마지막 중계 구간을 제외한 6개 중계 구간의 평균 RDPS는 0 ps/nm와 300 ps/nm의 2가지를 고려하였다. 균일 분포는 모든 6개 중간 구간의 RDPS가 0 ps/nm ($l_{DCF} = 13.6$ km) 또는 300 ps/nm ($l_{DCF} = 10.6$ km)로 설정된 경우이다. 반면, 인위적인 분포와 랜덤한 분포에서는 평균 RDPS = 0 ps/nm인 경우 6개의 중계 구간이 -150, -100, -50, 50, 100, 150 ps/nm 중 하나의 값을 갖도록 하였고, 평균 RDPS = 300 ps/nm인 경우에는 0, 100, 200, 300, 400, 800 ps/nm 중 하나의 값을 갖도록 하였다.

우선 인위적인 분포의 경우에는 SMF 길이의 분포와 비

슷한 방법으로 OPC에 대해 중계 구간이 증가할수록 점점 증가 (ascending)시키는 구조와 점점 감소 (descending)시키는 구조의 2가지가 조합되도록 하였다. 그리고 랜덤 분포의 경우는 6개 중계 구간의 RDPS가 각각 앞서 언급한 평균 RDPS에 따른 6개 값 중 하나로 랜덤하게 선택되도록 모델링하였다. RDPS의 인위적인 분포의 경우도 고려해야 할 패턴이 AA, DD, AD, DA의 4가지이다. 따라서 각 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS의 인위적인 분포의 패턴의 수는 총 16가지가 된다.

모든 중계 구간의 DCF의 기타 파라미터들은 다음과 같이 고정된 값으로 모델링하였다; 손실 계수 α_{DCF} 는 0.6 dB/km, 분산 계수 $D_{DCF} = -100$ ps/nm/km(@1,550 nm), 비선형 계수 $\gamma_{DCF} = 5.06$ W⁻¹km⁻¹(@1,550 nm).

본 연구에서 WDM 채널 보상에 대한 영향을 분석하는데 이용되는 DM 파라미터는 NRD와 pre(post)compensation이다. 전송 링크의 NRD는 첫 번째 중계 구간의 DCF 길이(그림 1의 l_{pre})의 조절로 얻어지는 precompensation, 또는 마지막 중계 구간의 DCF 길이(그림 1의 l_{post})의 조절로 얻어지는 postcompensation을 통해 결정하도록 하였다.

III. 시뮬레이션 결과 및 검토

그림 2는 최적 NRD, 즉 precompensation에 의해서는 10 ps/nm, postcompensation에 의해서는 -10 ps/nm로 설정된 광전송 링크의 각 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS가 인위적으로 분포하는 경우 16가지의 분포 패턴에 따른 최악 채널의 눈 열림 페널티 (EOP; eye opening penalty)를 모든 중계 구간에서 균일하게 분포하는 경우 (uni)와 비교한 것이다. 여기서 각 WDM 채널의 입사 전력은 2 dBm으로 하였고, 평균 RDPS 값과 최적 NRD에 따라 4가지를 동시에 나타내었다. 그림 2를 통해 알 수 있는 가장 중요한 결과는 몇 가지 인위적 분포에서의 EOP 특성이 균일한 분포에서의 EOP 특성보다 양호해진다는 것이다. 특히 DDAA 패턴, 즉 중계 구간이 증가할수록 SMF 길이는 감소하고 RDPS는 증가하는 링크 구조에서의 수신 성능은 평균 RDPS 값과 최적 NRD와 이를 결정하는 제어 방법에 관계없이 매우 우수해지는 것을 알 수 있다.

그림 3은 최적 NRD로 설정된 광전송 링크의 각 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS가 랜덤하게 분포하는 경우 30가지의 분포 패턴에 따른 최악 채널의 EOP를 -9 dBm부터 3 dBm까지의 입사 전력에 대해 균일한 분포의 광전송 링크에서의 EOP와 비교한 것이다. 전송 링크를 전파하는 WDM 채널의 입사 전력이 증가할수록 시스템 성능의 SMF 길이와 RDPS의 실제 랜덤 패턴에 대한 의존도가 증가하여 균일한 링크에서의 EOP와의 편차가 심해지는 것을 확인할 수 있다.

그림 4는 앞선 결과들을 비교하기 위한 그래프로, 즉 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS가 인위적으로 분포하는 링크

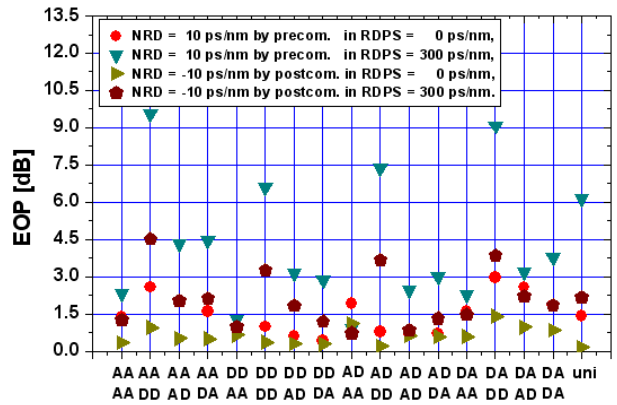
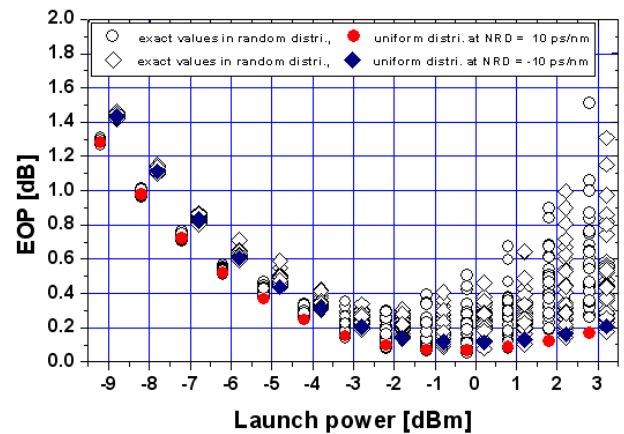
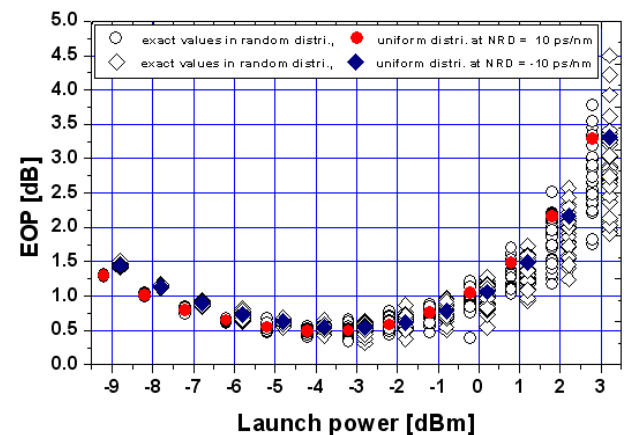


그림 2. 최적의 NRD로 설정된 광전송 링크에서 인위적인 RDPS 분포 패턴에 따른 최악 채널의 EOP
 Fig. 2. The EOP of the worst channel as a function of the artificially distributed RDPS patterns in the optical links with the optimal NRD.



(a) 평균 RDPS = 0 sp/nm



(b) 평균 RDPS = 300 sp/nm

그림 3. 최적의 NRD로 설정된 광전송 링크에서 랜덤한 RDPS 분포 패턴에 따른 최악 채널의 EOP
 Fig. 3. The EOP of the worst channel as a function of the randomly distributed RDPS patterns in the optical links with the optimal NRD.

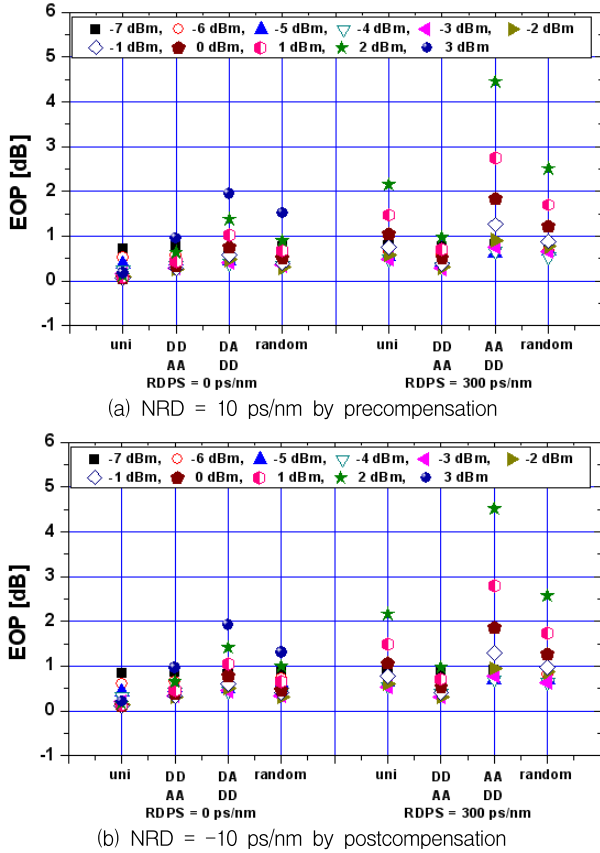


그림 4. 최적의 NRD로 설정된 광전송 링크에서 RDPS 분포 패턴의 성능 비교
Fig. 4. The performance comparison of the distribution patterns of RDPS in the optical links with the optimal NRD.

에서의 특징적인 2가지 패턴과 랜덤하게 분포하는 링크에서 30 가지 패턴 중 최악의 시스템 성능을 만드는 특정 랜덤 패턴으로 설계된 광전송 링크 각각을 통해 -7 dBm부터 3 dBm의 입사 전력으로 WDM 채널들을 전송시킨 경우의 EOP들을 균일한 분포의 전송 링크에서 얻어진 EOP들과 비교한 것이다. 그림 4에서 다른 인위적 분포 패턴 중 2가지의 특정 분포 패턴은 고려한 평균 RDPS와 최적 NRD에 대해 입사 전력에 따른 EOP 특성을 가장 양호하게 만든 패턴과 가장 나쁘게 만드는 것으로 하였다.

중계 구간의 SMF 길이와 RDPS 분포가 균일한 경우를 제외한 나머지 3가지 경우에 있어 인위적 분포 중 DDAA 분포가 평균 RDPS와 최적 NRD에 관계없이 시스템 성능을 가장 양호하게 하는 것을 알 수 있다. 더욱이 평균 RDPS를 300 ps/nm로 한 전송 링크에서 SMF 길이와 RDPS 분포를 DDAA로 한 경우의 시스템 성능은 균일한 분포의 광전송 링크에서의 시스템 성능에 비해 매우 크게 개선되는 것을 알 수 있다.

그림 5(a)와 (b)는 precompensation과 postcompensation에 의해 최적 NRD가 각각 10 ps/nm와 -10 ps/nm로 설정된 링크에서의 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS 분포 패턴별 최악

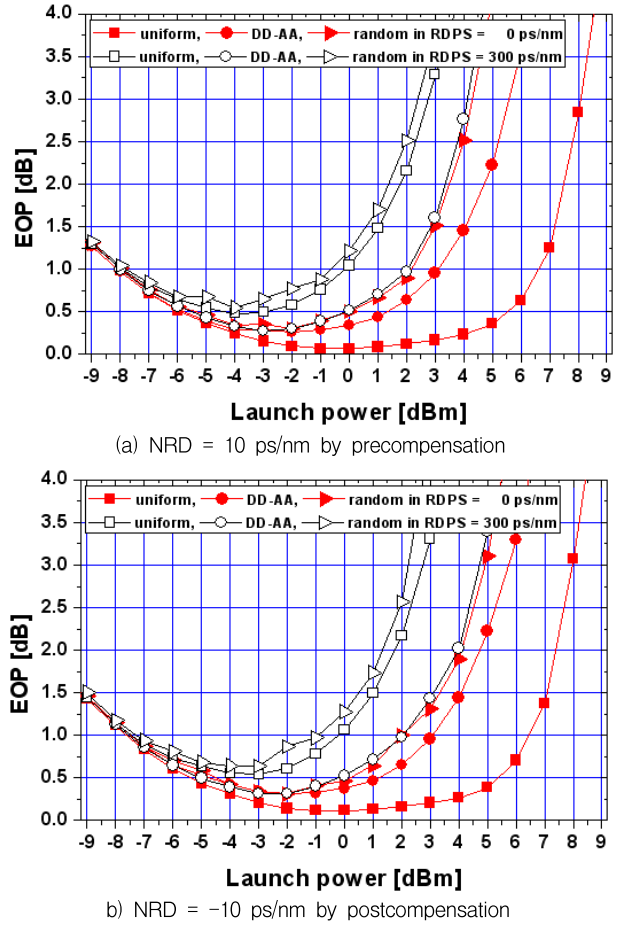
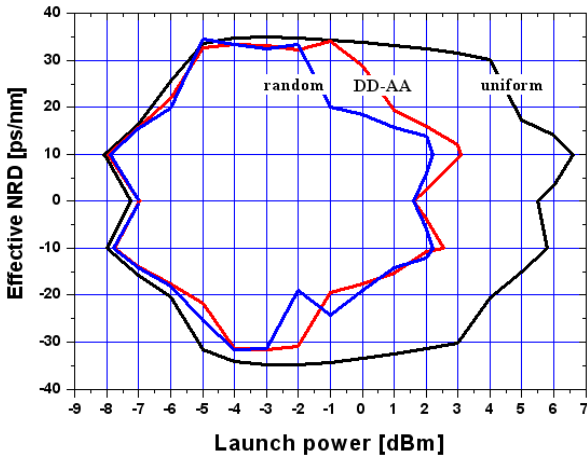


그림 5. 입사 전력에 따른 최악 채널의 EOP
Fig. 5. The EOP of the worst channel as a function of the launch power.

채널의 EOP를 입사 전력에 따라 나타낸 것이다. 그림 5(a)와 (b) 모두 평균 RDPS가 0 ps/nm인 링크에서의 입사 전력에 따른 수신 성능은 균일 분포, DDAA 분포, 랜덤 분포 순으로 우수하지만, 그림 4에서 얻은 결과와 마찬가지로 평균 RDPS가 이 보다 큰 300 ps/nm인 링크에서는 DDAA 분포의 수신 성능이 균일 분포에 비해 매우 우수해지는 것을 확인할 수 있다.

EOP를 통해 수신 성능을 분석하는 경우 성능 기준은 통상 1 dB EOP이다. 이는 비트 에러율 (BER; bit error rate)로는 10^{-12} 에 해당하고 광 펄스 broadening factor로는 1.25에 해당하는 값이다. 1 dB의 EOP의 성능 기준을 그림 5에 적용하고, 이 기준 이하로 성능이 유지되는 입사 전력을 유효 입사 전력 (efficient launch power) 범위라고 정의하면, 평균 RDPS가 300 ps/nm인 링크의 SMF 길이와 RDPS를 DDAA 분포로 설계하면 균일한 분포의 링크에 비해 유효 입사 전력 범위를 NRD = 10 ps/nm와 -10 ps/nm인 경우 모두 2 dB 정도 개선할 수 있는 것을 알 수 있다.

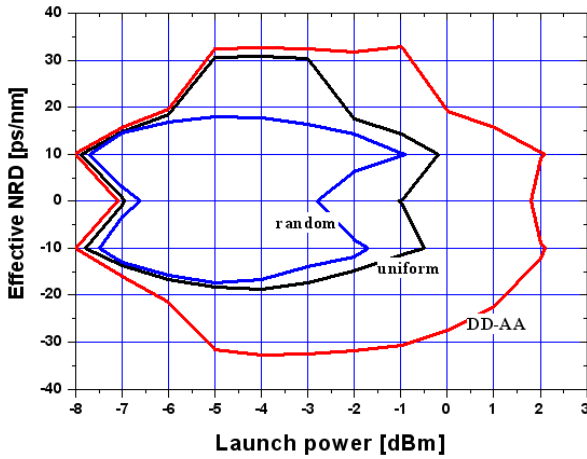
지금까지의 성능 분석은 NRD가 precompensation과



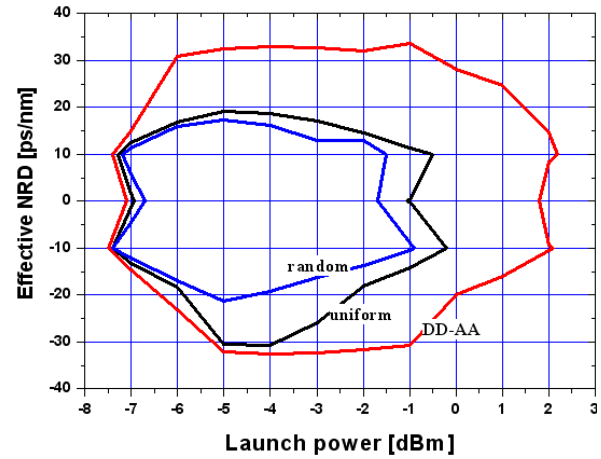
(a) precompensation; RDPS = 0 ps/nm



(b) postcompensation; RDPS = 0 ps/nm



(c) precompensation; RDPS = 300 ps/nm



(d) postcompensation; RDPS = 300 ps/nm

그림 6. 입사 전력에 따른 유효 NRD 범위

Fig. 6. The effective NRD ranges for the launch power.

postcompensation에 의해 각각 10 ps/nm와 -10 ps/nm로 설정된 광전송 링크에서 이루어졌다. 하지만 실제적으로 전송 링크의 NRD를 항상 이 값을 갖도록 고정하는 것은 시스템 구성의 융통성을 제한하는 요소가 된다. 다행히도 10 ps/nm이나 -10 ps/nm 외에 이들 근처의 다른 NRD 값들을 링크에 적용해도 최악 채널의 EOP를 1 dB EOP 이하로 유지할 수 있는 것을 알 수 있다. 즉 1 dB EOP 기준 이하로 만드는 각 경우의 NRD 범위를 구할 수 있고 이 범위 내의 특정 값으로 NRD가 유지되도록 링크 구조를 설계하면 시스템 구조의 유연성을 높일 수 있다. EOP를 1 dB 이하가 되게 하는 NRD 범위를 유효 NRD라고 정의하여 이들을 WDM 채널의 입사 전력에 따라 구한 것이 그림 6이다. 즉 그림 6의 각각의 경우에 나타난 입사 전력에 따른 등고선(contour)의 범위 내에서 NRD를 선택하고 해당 입사 전력으로 WDM 채널들을 전송하면 최악 채널의 EOP를 1 dB 이내로 얻을 수 있다.

그림 6의 결과도 앞선 결과와 흡사하게 얻어짐을 알 수

있다. 즉 평균 RDPS가 매우 큰 경우인 300 ps/nm의 광전송 링크에서 SMF 길이와 RDPS를 모든 중계 구간에 대해 균일하게 분포시키는 경우보다 DDAA로 인위적으로 분포시키면 입사 전력에 따른 유효 NRD 범위를 최대 50 ps/nm (그림 6(c)와 (d)에서 0 dBm의 유효 NRD)까지 늘릴 수 있는 것을 확인할 수 있다.

그림 6을 통해 알 수 있는 또 다른 결과는 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS가 랜덤하게 분포하는 링크에서의 입사 전력에 따른 유효 NRD 범위는 평균 RDPS의 크기에 관계없이 균일 분포의 광전송 링크에서보다 나쁘지만, DDAA의 인위적 분포에서의 유효 NRD 범위와 비교해보면 평균 RDPS가 매우 적은 0 ps/nm의 링크에서의 유효 NRD 범위는 DDAA 분포의 그것과 큰 차이가 없다는 것이다.

IV. 결 론

대용량 WDM 채널들을 전송하는 광 네트워크의 유연한

구성 가능성을 살펴보기 위하여 광전송 링크의 SMF 길이와 RDPS를 인위적으로 분포시킨 경우와 랜덤하게 분포시킨 경우의 WDM 채널들의 성능 분석을 시뮬레이션을 통해 수행하였다.

광 네트워크의 유연한 설계를 위해서는 중계 구간을 구성하는 SMF 길이와 RDPS에 대한 제한이 없어야 하는데, 이를 위해 평균 RDPS가 큰 링크의 경우는 중계 구간이 증가할수록 SMF 길이는 감소시키고 RDPS는 증가시키는 구조가 매우 적합함을 알 수 있었다. 그러나 이러한 인위적인 분포 패턴의 적용은 링크 구축에 있어 완전한 융통성을 제공하지 못한다. 링크의 완전한 융통성을 제공하는 설계와 구축은 이들의 랜덤 분포를 통해 가능한데, 이러한 랜덤 분포의 구현은 평균 RDPS가 매우 적은 광전송 링크에 적용할 때 어느 정도의 효과가 있는 것을 확인할 수 있었다.

참고문헌

[1] B. Mikkelsen, G. Raybon, B. Zhu, R.J. Essiambre, P.G. Bernasconi, K. Dreyer, L.W. Stulz, S.N. Knudsen, "High spectral efficiency (0.53 bit/s/Hz) WDM transmission of 160 Gb/s per wavelength over 400 km of fiber," in *Technical Digest of OFC 2001*, Los Angeles: CA, Paper ThF2, 2001.

[2] T. Ito, K. Fukuchi, K. Sekiya, D. Ogasawara, R. Ohhira, T. Ono, "6.4 Tb/s (160 × 40 Gb/s) WDM transmission experiment with 0.8 bit/s/Hz spectral efficiency," in *ECOC 2000*, Frankfurt: GER, Postdeadline paper PD1.1, 2000.

[3] J. Kani, K. Hattori, M. Jinno, T. Kanamori, K. Oguchi, "Tripple-wavelength-band WDM transmission over cascaded dispersion-shifted fibers," in *Technical Digest of OAA 1999*, Nara: Japan, Paper WC2, 1999.

[4] K. Fukuchi, T. Kasamatsu, M. Morie, R. Ohhira, T. Ito, K. Sekiya, D. Ogasawara, T. Ono, "10.92-Tb/s (273 × 40-Gb/s) triple-band/ultra-dense WDM optical-repeated transmission experiment," in *Technical Digest of OFC 2001*, Los Angeles: CA, Postdeadline paper PD24, 2001.

[5] K. Mukasa, Y. Akasaka, Y. Suzuki, T. Kamiya, "Novel network fiber to manage dispersion at 1.55 μm with

combination of 1.3 μm zero dispersion single mode fiber," in *Proceedings of ECOC 1997*, Vol. 1, pp. 127-130, 1997.

[6] T. Kato, M. Hirano, M. Onishi, M. Nishimura, "Ultra-low nonlinearity low-loss pure silica core fibre for long-haul WDM transmission," *Electron. Lett.* Vol. 35, No. 19, 1999.

[7] M. Tsukitani, T. Kato, E. Yanada, M. Hirano, M. Nakamura, Y. Ohga, M. Onishi, E. Sasaoka, Y. Makio, M. Nishimura, "Low-loss dispersion-flattened hybrid transmission lines consisting of low-nonlinearity pure silica core fibres and dispersion compensating fibres," *Electron. Lett.* Vol. 36, No. 1, 2000.

[8] T. Naito, N. Shimojoh, T. Tanaka, H. Nakamoto, M. Doi, T. Ueki, M. Suyama, "1 Tb/s WDM transmission over 10,000 km," in *ECOC 1999*, Nice: France, Postdeadline paper PD2-1, 1999.

[9] J. D. Ania-Castañon, 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.

[10] 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.

[11] A. Chowdhury and R.-J. Essiambre, "Optical phase conjugation and pseudolinear transmission," *Opt. Lett.*, Vol. 29, No. 10, pp. 1105~1107, 2004.

[12] 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.

[13] P. Minzioni and A. Schiffrini, "Unifying theory of compensation techniques for intrachannel nonlinear effects," *Opt. Express*, vol. 13, no. 21, pp. 8460-8468, 2005.

[14] 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.

[15] G. P. Agrawal, *Nonlinear fiber optics*, 3rd ed. San Francisco:CA, Academic Press, 2001.



이 성 렬 (Seong-Real Lee)

1990년 2월 : 한국항공대학교 항공통신정보공학과 (공학사),
 2002년 2월 : 한국항공대학교 대학원 통신정보공학과 (공학박사),
 2004년 3월~현재 : 국립목포해양대학교 해양정보통신공학과 부교수

1992년 8월 : 한국항공대학교 대학원 통신정보공학과 (공학석사)
 2002년 6월~2004년 2월 : (주)에이티엔 기술연구소장

※관심분야 : WDM 전송 시스템, 광의 비선형 현상 분석, 광 솔리톤 전송