

전송 반 구획에서만 중계 구간 당 분산이 랜덤하게 분포하는 광 링크에서의 WDM 신호의 성능

Performance of WDM Signals in Optical Links with Random Distribution of Residual Dispersion Per Span only in Half Transmission Section of Total Length

이성렬*

Seong-Real Lee*

요 약

그룹 속도 분산 (GVD; group velocity dispersion)과 비선형 효과의 상호 작용에 의해 왜곡되는 파장 분할 다중 (WDM; wavelength division multiplexing) 신호를 보상하기 위해 광 위상 공액기 (OPC; optical phase conjugator)와 분산 제어 (DM; dispersion management)가 적용된 광전송 링크에서의 전체 잉여 분산 (NRD; net residual dispersion)의 최적치와 유효 입사 전력 범위를 도출하였다. 실제 광전송 시스템의 융통적 설계를 위한 쪽 반 전송 구획에서의 단일 모드 광섬유 (SMF; single mode fiber) 중계 구간(span) 당 잉여 분산 (RDPS; residual dispersion per span)이 랜덤하게 분포하는 광전송 링크를 고려하였다. precompensation으로 전체 분산을 조절하는 링크의 최적 NRD는 10 ps/nm이고 이 경우 유효 입사 전력 범위는 $-8 \sim 1$ dBm인 것을 확인하였다. 또한 postcompensation으로 전체 분산을 조절하는 링크의 최적 NRD는 -10 ps/nm이고, 유효 입사 전력 범위는 $-7.5 \sim 1$ dBm인 것을 확인하였다.

Abstract

Optimal net residual dispersion (NRD) and effective launching power range of optical transmission links with optical phase conjugator (OPC) and dispersion management (DM) for compensating the distorted wavelength division multiplexing (WDM) signals due to interaction of group velocity dispersion (GVD) and optical nonlinear effects. WDM systems considered in this research have optical links with the random distribution of residual dispersion per span (RDPS) in each single mode fiber (SMF) spans of only one half transmission section for designing the adaptive optical transmission system configurations. It is confirmed that optimal NRD is 10 ps/nm and effective launching power range is obtained to be $-8 \sim 1$ dBm under NRD = 10 ps/nm in optical links with total dispersion controlled by precompensation. And, it is also confirmed that optimal NRD is -10 ps/nm and effective launching power range is obtained to be $-7.5 \sim 1$ dBm under NRD = -10 ps/nm in optical links with total dispersion controlled by postcompensation.

Key words : Dispersion management, Net residual dispersion, Residual dispersion per span, Optical phase conjugator, Random distribution of RDPS, Effective launching power

I. 서 론

40 Gbps 이상의 광 신호 전송에서 성능을 저하시키는 본질적 원인들 중 가장 중요한 것은 그룹 속도

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

- 제1저자 (First Author) : 이성렬
- 투고일자 : 2012년 4월 13일
- 심사(수정)일자 : 2012년 4월 13일 (수정일자 : 2012년 6월 18일)
- 게재일자 : 2012년 6월 30일

분산 (GVD; group velocity dispersion)과 비선형성 (nonlinearity)의 상호 작용에 의한 신호 왜곡이다 [1],[2]. 이러한 한계를 극복하기 위한 다양한 기술들 [3]-[8] 중에서 전체 전송로의 중간에 광 위상 공액기 (OPC ; optical phase conjugator)를 두어 전송되는 광 신호의 스펙트럼을 반전시켜 신호 왜곡을 보상하는 MSSSI(mid-span spectral inversion) 기술은 GVD에 의한 왜곡뿐만 아니라 비선형 효과 중 자기 위상 변조 (SPM; self phase modulation)에 의한 왜곡도 보상할 수 있다[8]. 그러나 광섬유에 존재하는 손실 때문에 GVD와 광 전력을 OPC를 중심으로 대칭으로 분포시키기 어려워 MSSSI만을 가지고 효과적 보상을 얻기는 힘들다.

MSSSI와 같이 전체 전송 링크의 한 부분에서 집중적으로 GVD와 비선형 현상에 의한 영향을 줄여주는 기술의 이러한 한계를 극복하기 위하여 전체 전송 링크의 구성을 최적화시키는 방법도 많이 적용되고 있다. 그 중 대표적인 기술이 주 전송로로 사용되는 단일 모드 광섬유 (SMF; single mode fiber)의 분산 계수와 다른 부호의 분산 계수를 갖는 분산 보상 광섬유 (DCF; dispersion compensating fiber)를 SMF에 추가로 삽입하여 중계 구간 (fiber span)과 시스템 전체의 분산량을 조절하는 분산 제어 (DM; dispersion management)이다[9],[10].

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. 특히, 이들 중 NRD는 시스템 성능 저하에 영향을 미치는 주요 원인을 어느 정도 크기로 보상할 것인가와 긴밀한 관계가 있는 것으로 보고되고 있다[9].

DM을 전송 링크에 적용하는데 있어 중요하게 고려하여야 할 것은 광 신호의 변조 형식 (modulation format)과 광섬유의 선택이다. 먼저 변조 형식의 선택에서 주요한 3가지 요인은 변조 스펙트럼, 송수신기 구조의 복잡성과 광섬유 비선형 효과에 대한 내성이다. RZ(return-to-zero) 형식이 NRZ (non-RZ) 형식

보다 비선형 효과에 의한 내성이 강한 반면 NRZ는 송수신기 구조를 간단하게 만들고 스펙트럼이 좁기 때문에 분산에 대한 내성이 강한 것으로 알려져 있다[11]. 그리고 40 Gbps를 초과하는 전송 시스템에서 G.652의 표준 SMF를 사용하는 경우가 RZ와 NRZ 전송 모두에서 G.655의 비 영 분산 천이 광섬유 (NZ-DSF; non-zero dispersion shifted fiber)보다 장점이 많은 것으로 보고되고 있다[12].

본 논문의 저지는 전송 링크에 OPC와 DM을 결합시키는 경우 변조 형식, 전송 거리와 중계 구간 등에 따라 NRD를 최적화시킴으로써 분산과 광 전력의 OPC를 중심으로 한 비대칭성을 상쇄 또는 감소시켜 각 채널의 속도가 40 Gbps인 WDM 신호들을 효과적으로 보상하여 전송시킬 수 있다는 것을 연구하였다 [13],[14].

DM이 적용된 링크에서 GVD와 SPM이 모두 존재하는 경우 펄스의 성능 저하는 광 입사 전력뿐만 아니라 분산 맵 (dispersion map)에 매우 크게 의존한다. 따라서 최상의 시스템 성능은 NRD의 최적치 도출과 입사 전력의 최적화를 필요로 한다. 특히 WDM 시스템의 경우 GVD가 파장에 의존하기 때문에 NRD의 최적치 도출이 쉽지 않다. 더욱이 GVD와 SPM의 상호 반응과 영향, 그리고 OPC를 중심으로 한 실제적인 대칭 분포가 SMF의 중계(보상) 간격과 RDPS에 따라 달라질 수 있기 때문에 NRD의 최적화와 입사 전력의 최적화에 영향을 줄 수 있다. DM과 관련된 선행 연구들은 WDM 신호의 효과적인 전송을 위한 최적 NRD와 유효 입사 전력의 범위 등이 SMF의 중계 구간과 RDPS가 고정된 경우에 국한되었다. 그러나 실제로 SMF 중계 구간에서의 RDPS가 랜덤하게 적용되어야만 유효적인 전송 링크 설계가 가능해진다.

따라서 본 논문에서는 OPC를 중심으로 한 쪽 전송 반구획 (half transmission section)을 구성하는 각 중계 구간의 RDPS가 랜덤하게 분포한 경우에서의 최적 NRD와 유효 입사 전력 범위를 도출해 보고자 한다. 본 논문에서 고려한 WDM 채널의 전송률은 40 Gbps이고 각 채널의 변조 파형은 RZ로 하였다. 40 Gbps의 RZ 채널 24개는 각각 ITU-T G.694.1에서 규정하는 1,550 nm부터 1,568.4 nm까지 100 GHz 간격

의 24개 파장으로 동시에 전송되는 것으로 하였다 (따라서 총 전송률은 960 Gbps).

II. WDM 전송 시스템의 구성

그림 1은 본 논문에서 살펴보는 24 채널 WDM 신호 전송을 위한 송신부, 전체 전송로 중간에 OPC가 위치하고 DM이 적용된 광전송 링크와 수신부로 구성된 시스템의 전체 구조를 나타낸 것이다.

그림 1의 WDM 송신부는 강도 변조 (IM; intensity modulation) 방식의 송신기 24개가 병렬로 구성된다. 송신기를 구성하는 레이저는 분포 케환 레이저 (DFB-LD; distributed feedback lader diode)로 하였고 각 레이저별 파장은 각각 1,500.0 nm부터 100 GHz 간격으로 1,568.4 nm까지 할당하였다[15]. 그림 1의 24개의 송신기는 각각 독립적으로 40 Gbps의 128(= 2⁷) PRBS(pseudo random bit sequence)가 발생되고 PRBS에 따라 변조기(MOD)는 10 dB의 소광비 (extinction ratio)를 갖는 RZ 형식의 2차 수퍼 가우시

안 펄스를 생성시킨다. 파장별로 변조된 24개의 신호들은 배열 도파로 격자 다중화 장치 (AWG MUX; arrayed-waveguide grating multiplexer)에서 다중화되어 광전송 링크로 보내어진다.

전송 링크를 구성하는 SMF에서의 손실에 의해 감소되는 WDM 신호의 광 전력은 적당한 위치의 에르븀 첨가 광섬유 증폭기 (EDFA; erbium-doped fiber amplifier)에 의해 보상되고, SMF의 GVD 특성에 의한 WDM 신호의 시간 영역에서의 퍼짐(temporal broadening), 즉 분산은 SMF와 결합된 DCF에 의해 보상되어 전파된다. 그러나 SMF가 갖는 비선형 현상, 특히 SPM에 의한 광 신호의 왜곡은 전송로 상에서 유효하게 보상되지 못한다. 이를 위해 전체 전송 거리 중간에 OPC를 두어 SPM에 의한 왜곡을 보상하도록 설계하였다.

그림 2는 HNL-DSF(highly nonlinearity - dispersion shifted fiber)를 이용한 OPC의 구조를 나타낸 것으로, AWG MUX부터 OPC까지의 전송 링크와 OPC부터 DEMUX까지의 전송 링크를 각각 전반 구획 (former half section)과 후반 구획 (latter half section)이라고 한

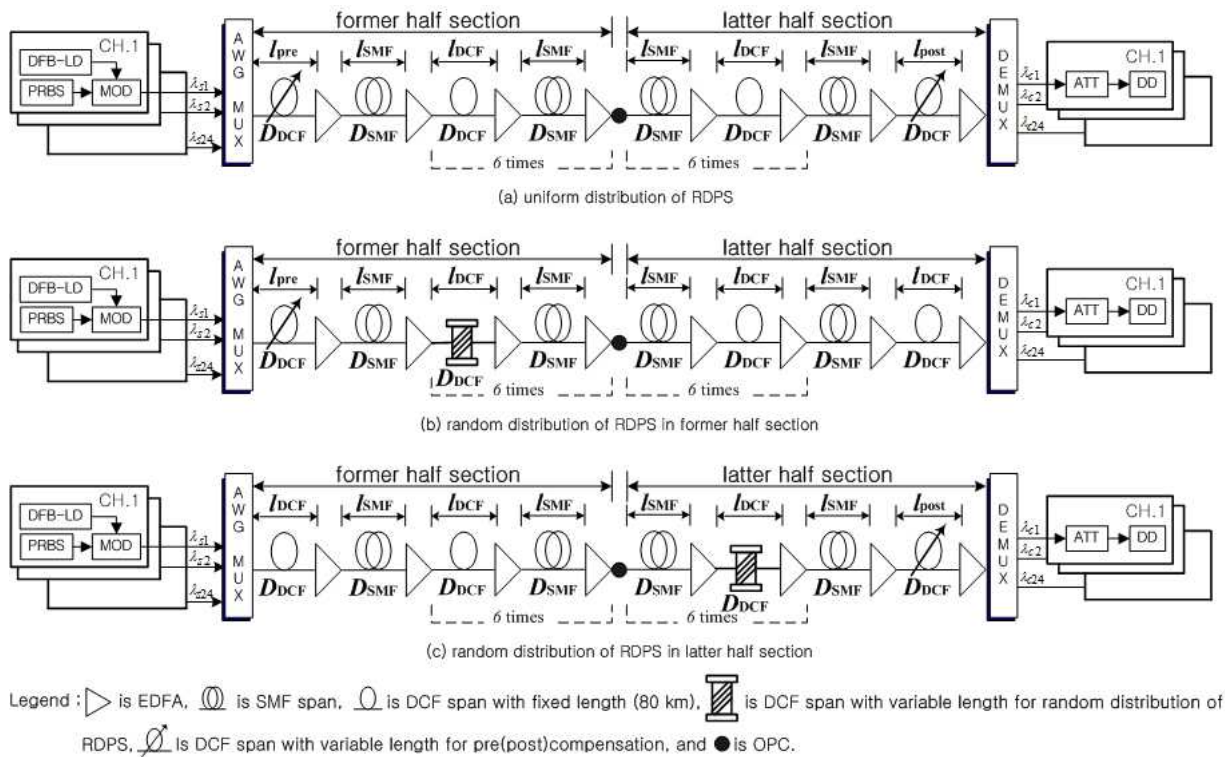


그림 1. 광전송 시스템 구조와 전송 링크의 분산 맵
 Fig. 1. Configuration of optical transmission system and dispersion map of transmission links.

다면, 전반 구획을 통과하면서 왜곡된 WDM 신호 A_s 는 파장 λ_p 의 펌프 광과 결합된다. 결합된 광파는 λ_p 의 영 분산 파장 (ZDW; zero dispersion wavelength)을 갖는 HNL-DSF로 들어가고 결과적으로 4-광파 혼합 (FWM; four-wave mixing) 현상을 통해 $\lambda_c = 1/(2/\lambda_p - 1/\lambda_s)$ 에 따른 파장을 갖는 공액파 (conjugated wave)가 생성된다. 이렇게 얻어진 위상 공액파는 대역 통과 필터(OBPF : optical band pass filter)에 의해 특정 대역으로 여과되고, EDFA에 의해 증폭된 후 후반 구획을 통과하면서 겪게 되는 GVD와 SPM에 의한 영향은 공액파에 상호 작용하여 AWG MUX 출력단, 즉 광전송 링크의 입력단에서의 WDM 신호와 흡사한 형태가 되도록 보상되어 DEMUX에 도달된다.

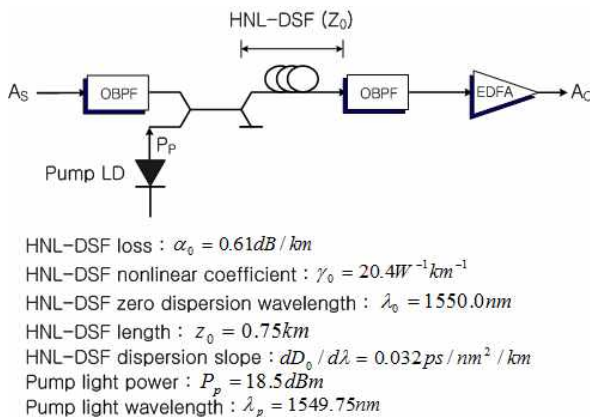


그림 2. HNL-DSF를 이용한 OPC의 구조
 Fig. 2. Configuration of OPC using HNL-DSF.

DEMUX를 통과한 24개의 각 채널들은 직접 검파 방식 (DD; direct detection)으로 수신 처리되도록 설계하였다. 그림 1의 24개 DD 방식의 수신기는 모두 5 dB의 잡음 지수를 갖는 전치 증폭기, 1 nm 대역폭의 광 필터, PIN 다이오드, 버터워스 형태의 펄스 정형 필터와 판별 회로로 구성되고, 수신 대역폭은 0.65 x 비트율로 모델링 하였다[16].

III. 광전송 링크의 구조와 성능 평가

그림 1(a)는 본 연구의 목적인 OPC를 중심으로 한

쪽 구획에서만 RDPS 분포가 랜덤한 링크 구조에서의 성능을 비교하기 위하여 사용되는 일반적인 구조, 즉 모든 전송 구획에서의 RDPS 분포가 일정한 구조의 광전송 링크이다. 반면 그림 1(b)와 (c)는 각각 후반 구획의 RDPS 분포는 일정하지만 전반 구획의 분포가 랜덤한 구조와 전반 구획의 RDPS 분포는 일정하지만 후반 구획의 분포가 랜덤한 구조의 광전송 링크를 나타내고 있다.

그림 1의 3가지 링크 구조 모두 주 전송로로 손실 계수 α_{SMF} 는 0.2 dB/km, 비선형 계수 γ_{SMF} 는 $1.41 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1} (@1,550 \text{ nm})$, 분산 계수 D_{SMF} 는 $17 \text{ ps/nm/km} (@1,550 \text{ nm})$ 인 SMF를 채택하였다. 그리고 전반 구획과 후반 구획에서 각각 동일하게 14개의 SMF가 80 km의 중계 구간 (그림 1에서 l_{SMF})마다 EDFA에 의해 연결된 것으로 하였다. 따라서 SMF 한 중계 구간 (span)에서 축적되는 분산량은 1,360 ps/nm이고, 전체 전송로에서 축적되는 분산량은 19,040 ps/nm이다.

SMF 중계 구간에서 축적되는 큰 분산량을 제거하거나 줄여주기 위해 추가되는 DCF의 손실 계수 α_{DCF} 는 0.4 dB/km, 비선형 계수 γ_{DCF} 는 $4.83 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1} (@1,550 \text{ nm})$, 분산 계수 D_{DCF} 는 -100 ps/nm/km 로 모두 동일하게 가정하였다.

그러나 각 중계 구간에서 축적되는 RDPS를 조절하기 위한 DCF의 길이, 즉 l_{DCF} 는 광전송 링크 구조에 따라 다르게 설정하였다. 즉 그림 1(a)의 OPC를 중심으로 두 구획 모두 RDPS가 일정한 구조에서는 첫 번째와 마지막 중계 구간을 제외한 2번째부터 13번째 중계 구간까지의 RDPS는 모두 150 ps/nm가 되도록 l_{DCF} 를 21.1 km로 고정하였다. 하지만 그림 1(b)의 전반 구획에서만 RDPS가 랜덤한 구조에서는 후반 구획의 모든 l_{DCF} 를 그림 1(a)와 같이 21.1 km로 고정한 반면 전반 구획의 2번째부터 7번째 중계 구간의 l_{DCF} 는 이들의 전체 평균 RDPS가 150 ps/nm가 되도록 0, 50, 100, 150, 200, 400 ps/nm 중에서 랜덤하게 한 값을 갖도록 하였다. 그리고 그림 1(c)의 후반 구획에서만 RDPS가 랜덤한 구조에서는 전반 구획의 모든 l_{DCF} 는 21.1 km로 고정한 반면 후반 구획의 8번째부터 13번째 중계 구간의 l_{DCF} 를 동일한 6개 값 중에서 랜덤한 하나의 값이 되게 하였다.

본 연구에서의 시스템 성능 평가는 최종 수신단에 축적된 NRD에 따른 24개 WDM 채널 중 최악 채널의 눈 열림 패널티 (EOP; eye opening penalty)를 분석하여 이루어진다. NRD는 AWG MUX 바로 다음에 있는, 즉 첫 번째 DCF의 길이 l_{pre} 에 변화를 주어 얻어지는 precompensation과 DEMUX 바로 전에 있는, 즉 14번째 DCF의 길이 l_{post} 에 변화를 주어 얻어지는 postcompensation에 의해 결정되도록 설계하였다. 그러나 그림 1(a)의 RDPS 분포가 일정한 구조에서는 NRD 결정을 위한 precompensation과 postcompensation이 모두 적용된 반면, 그림 1(b)의 전반 구획에서만 RDPS가 랜덤한 구조와 그림 1(c)의 후반 구획에서만 RDPS가 랜덤한 구조는 각각 precompensation과 postcompensation만 적용되도록 하였다.

시스템의 성능 분석에 사용되는 EOP는

$$EOP[dB] = 10\log_{10}(EO_{rec}/EO_{btb}) \quad (1)$$

으로 정의되고, 여기서 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.

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

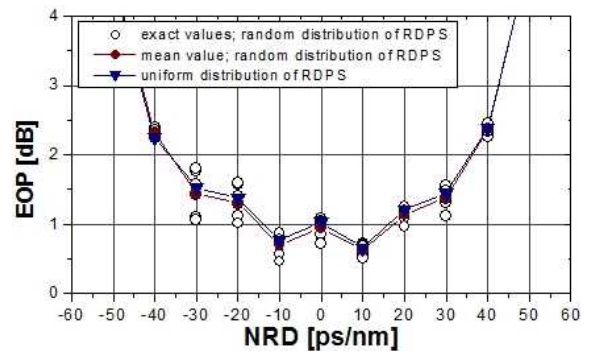
여기서 P_{av} 는 광 신호의 평균 전력, $P_{1,min}$ 은 펄스 '1'의 최소 전력이고 $P_{0,max}$ 은 펄스 '0'의 최대 전력이다.

광전송 링크를 통해 손실과 비선형 효과의 영향을 겪으면서 전파하는 각 채널들은 비선형 슈뢰딩거 방정식 (NLSE; nonlinear Schrödinger equation)에 의해 표현된다. NLSE를 단계 분할 푸리에 (SSF; split-step Fourier) 기법에 따라 시뮬레이션 하였다[1].

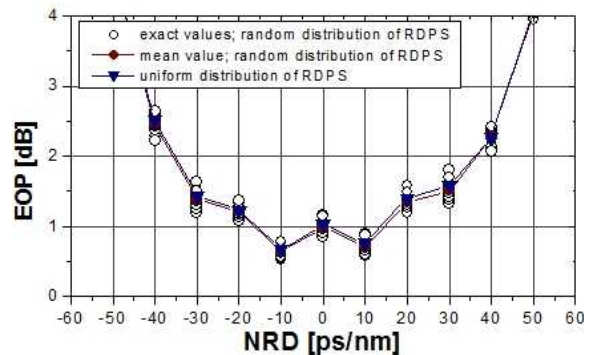
IV. 시뮬레이션 결과 및 검토

본 연구에서 살펴보고자 하는 광전송 링크의 구조가 전반 구획이나 후반 구획에서 첫 번째 또는 마지막 증계 구간을 제외한 나머지 6개의 RDPS 각각이 0, 50, 100, 150, 200, 400 ps/nm 중 하나의 값으로 랜

덤하게 모두 선택되어 전체 평균 RDPS가 150 ps/nm가 되도록 하였기 때문에 l_{DCF} 의 다양한 조합이 발생한다. 모든 조합에서의 시뮬레이션을 통한 분석이 불가능하기 때문에 본 연구에서는 전반 구획에서만 RDPS가 랜덤한 구조와 후반 구획에서만 RDPS가 랜덤한 구조 모두 무작위로 선택된 10가지의 조합에 대해서만 시뮬레이션을 수행하여 성능을 분석하였다.



(a) precompensation



(b) postcompensation

그림 3. NRD에 따른 입사 전력 0 dBm에서 최악 채널의 EOP

Fig. 3. EOP of worst channel with 0 dBm launching power as a function of NRD.

그림 3의 (a)와 (b)는 각각 입사 전력이 0 dBm인 24개의 WDM 채널 중 EOP 특성이 가장 나쁘게 나타나는 최악 채널의 EOP를 전반 구획에서만 RDPS가 랜덤한 구조에서 precompensation에 의해 결정되는 NRD의 변화와 후반 구획에서만 RDPS가 랜덤한 구조에서 postcompensation에 의해 결정되는 NRD의 변화에 따라 나타낸 것이다. 각 그림에서 NRD에 따라 \circ 으로 표시된 EOP 값은 무작위로 결정된 각 증계 구간에서의 RDPS, 즉 l_{DCF} 의 10가지의 조합 하나 하나의 값이고, 비교 분석을 위해 이들 10개 조합의 평

균 EOP 값도 함께 나타냈다. 아울러 좀 더 확실한 분석을 위해 두 구간 모두 RDPS가 일정한 구조에서 얻어지는 EOP 값도 동시에 나타냈다.

각 구획의 중계 구간에서 선택된 RDPS의 구체적인 조합에 따라 NRD에 따른 EOP가 각기 다르게 나타났지만, 예를 들어 그림 3(a)에서 NRD가 -30 ps/nm인 경우 EOP 편차가 거의 1 dB에 가깝게 나타남, 10개 조합의 평균 EOP는 두 구간 모두 RDPS가 일정한 구조에서의 EOP 값과 비슷하게 얻어지는 것을 알 수 있다.

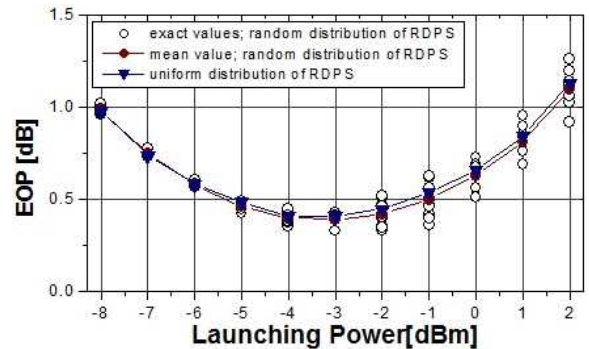
그림 3을 통해 알 수 있는 중요한 결과는 전반 구획에서만 RDPS가 랜덤한 구조, 즉 그림 3(a)에서 precompensation에 의해 NRD가 +10 ps/nm로 결정되면 중계 구간의 RDPS 조합에 따른 EOP 편차가 다른 경우보다 적으면서 동시에 최악의 RDPS 조합의 경우에서도 EOP가 가장 양호하다는 것이다. 즉 전반 구획 중계 구간의 RDPS만 랜덤한 구조에서 precompensation에 의한 최적 NRD는 +10 ps/nm인 것을 확인할 수 있다. 반면, 같은 이유로 후반 구획 중계 구간의 RDPS만 랜덤한 구조에서 postcompensation에 의한 최적 NRD는 -10 ps/nm인 것을 확인할 수 있다.

그림 4의 (a)와 (b)는 그림 3의 (a)와 (b)를 통해 얻어진 최적 NRD로 설정된 경우, 즉 전반, 혹은 후반 구획만의 RDPS가 랜덤하게 분포하는 경우 NRD가 각각 +10 ps/nm, 또는 -10 ps/nm로 설정된 전송 링크를 통해 WDM 채널들을 전파시켰을 때 입사 전력에 따른 EOP를 나타낸 것이다. 그림 4는 무작위로 선택된 각 중계 구간에서의 10개의 랜덤한 RDPS 조합 각각에서의 EOP들을 RDPS가 일정한 구조(그림 1(a)의 링크 구조)에서 얻어진 EOP와 비교하여 나타냈다.

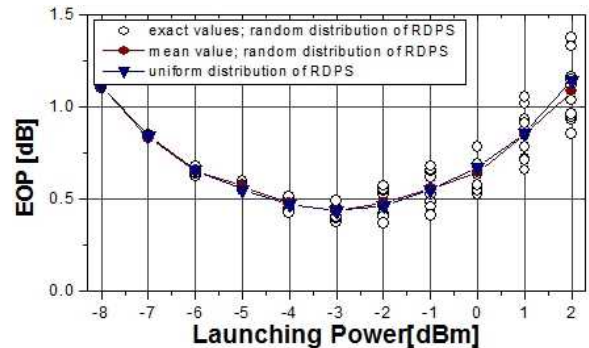
1 dB EOP 이하의 성능으로 수신되는 입사 전력의 범위를 유효 입사 전력 범위라고 하고, 선택된 RDPS의 구체적인 조합에 따른 EOP의 편차를 고려하면, 즉 WDM 채널의 입사 전력 각각에서의 최대 EOP 값을 고려하면 전반 구획에서만 RDPS가 랜덤한 구조(그림 4(a))에서의 유효 입사 전력은 -8~1 dBm으로, 후반 구획에서만 RDPS가 랜덤한 구조(그림 4(b))에서의 유효 입사 전력은 -7.5~1 dBm으로 얻어진다.

두 경우 모두 WDM 채널의 입사 전력이 증가할수록 RDPS의 구체적인 조합에 따른 EOP의 편차가 커

지고, 이러한 특성은 후반 구획에서만 RDPS가 랜덤한 구조에서 더욱 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있다. 그리고 앞서 살펴보았듯이 유효 입사 전력 범위가 후반 구획에서만 RDPS가 랜덤한 구조보다 전반 구획에서만 RDPS가 랜덤한 구조에서 다소 넓기 때문에 OPC를 중심으로 한 쪽 반구획에서의 RDPS를 랜덤하게 분포시키는 경우에 후반보다 전반 구획에서의 RDPS가 랜덤하게 하는 구조가 시스템 성능 면에서 다소 유리한 것을 확인할 수 있다.



(a) NRD = +10 ps/nm in precompensation scheme



(b) NRD = -10 ps/nm in postcompensation scheme

그림 4. 최적 NRD에서 입사 전력에 따른 최악 채널의 EOP

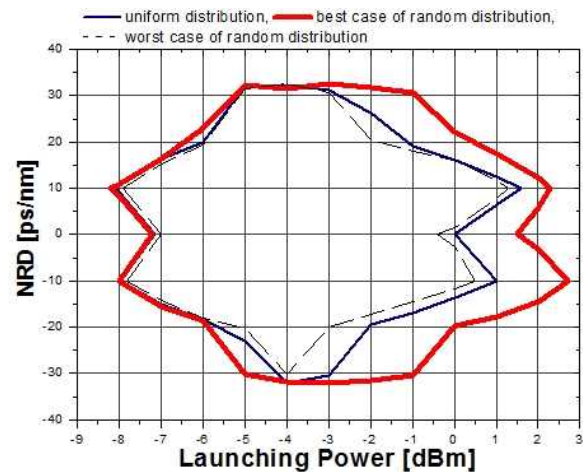
Fig. 4. EOP of worst channel as a function of launching power at optimal NRD.

앞선 분석을 통해 전반 구획에서만 RDPS가 랜덤한 구조와 후반 구획에서만 RDPS가 랜덤한 구조 각각에서 최적 NRD는 +10 ps/nm과 -10 ps/nm인 것을 알 수 있었다. 하지만 전송 링크의 실제적 구성을 하는데 있어 항상 이 값만을 고정적으로 적용하게 되면 융통적인 시스템 구성에 많은 한계를 수반할 수밖에 없다. 앞서 언급했던 1 dB EOP를 성능 기준으로 그림 3을 다시 한 번 분석해 보면 다행히도 +10 ps/nm이나 -10 ps/nm 외에 이들 근처의 다른 NRD 값

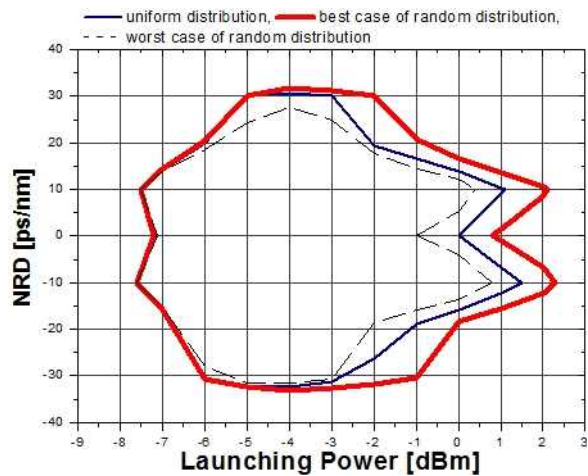
들을 링크에 적용해도 1 dB EOP 기준 이내의 수신 품질을 얻을 수 있는 것을 알 수 있다. 즉 1 dB EOP 기준 이하로 만드는 각 경우의 NRD 범위를 구할 수 있고 이 범위 내의 특정 값으로 NRD가 유지되도록 링크 구조를 설계하는 것이 실제로는 더욱 유효적이다. EOP를 1 dB 이하가 되게 하는 NRD 범위를 유효 NRD라고 정의하여 이들을 각각 전반 구획에서만 RDPS가 랜덤한 구조와 후반 구획에서만 RDPS가 랜덤한 구조에서 구한 것이 그림 5(a)와 (b)이다. 즉 그림 5의 각각의 경우에 나타낸 입사 전력에 따른 등고선(contour) 내의 범위에서 NRD를 선택하고 해당 입사 전력으로 WDM 채널들을 전송하면 최적 채널의 EOP를 1 dB 이내로 얻을 수 있다.

그림 5에서도 선택된 RDPS의 구체적인 조합에 따른 EOP의 편차를 고려하여 EOP 등고선을 나타냈다. 즉 한 쪽 반구획의 선택된 RDPS의 구체적인 조합에 따라 WDM 채널의 각 입사 전력에서의 최대 EOP 값을 연결한 등고선 (그림 5(a)와 (b)에서 worst case)과 최소 EOP 값을 연결한 등고선 (그림 5(a)와 (b)에서 best case)을 동시에 나타냈다. 그림 5(a)와 (b) 모두, 즉 전반 또는 후반 구획에서만 RDPS가 랜덤한 구조 모두에서 입사 전력이 -6 dBm 이하인 WDM 채널들을 전송하는 경우의 EOP 등고선은 worst case와 best case 모두 중계 구간의 RDPS가 일정한 구조에서의 EOP 등고선과 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다. 그러나 입사 전력이 -3 또는 -2 dBm 이상으로 커지면 RDPS 분포의 영향을 크게 받아 차이가 발생하는 것을 알 수 있다.

한 쪽 반구획에서 랜덤하게 선택된 RDPS의 구체적인 조합에 따라 각 WDM 채널의 입사 전력에서의 최대 EOP 값을 연결한 등고선 (그림 5(a)와 (b)에서 worst case)을 분석해 보면, NRD 유효 범위가 -20~20 ps/nm로 비교적 넓고 동시에 이 범위 내에서 안정적인 WDM 채널의 입사 전력은 두 경우 모두 -6~-2 dBm인 것을 알 수 있다. 그러나 전반 구획에서만 RDPS가 랜덤한 구조에서의 상기 범위의 전력을 갖는 WDM 채널을 전송하는 경우 양호한 수신을 얻을 수 있는 NRD 범위에 비해 후반 구획에서만 RDPS가 랜덤한 구조에서의 NRD 범위가 -30 ps/nm까지 확대되어 10 ps/nm의 마진이 더 있는 것을 확인할 수 있다.



(a) precompensation



(b) postcompensation

그림 5. 입사 전력에 따른 유효 NRD 범위
Fig. 5. Effective NRD range as a function of launching power.

V. 결 론

SMF가 갖는 GVD와 비선형 효과의 상호 작용에 의해 왜곡되는 WDM 신호들을 보상하기 위해 전체 전송로 중간에 OPC를 두고 이것을 중심으로 전반 구획이나 후반 구획의 SMF 중계 구간의 RDPS가 랜덤한 DM이 적용된 전송 링크에서의 설계 조건인 최적 NRD 값과 유효 입사 전력 범위를 도출하였다.

우선 precompensation으로 NRD를 조절하는 구조에서는 10 ps/nm, postcompensation으로 NRD를 조절하는 구조에서는 -10 ps/nm이 최적 NRD라는 것과 NRD가 이 값으로 설정된 경우 유효 입사 전력은 각

각 $-8 \sim -1$ dBm과 $-7.5 \sim -1$ dBm인 것을 확인하였다. 그러나 실제적으로 랜덤한 RDPS 조합이 전송 성능을 가장 나쁘게 만드는 최악의 조건을 고려해야 하고 NRD를 하나의 값으로 고정시키지 않고 융통적으로 설계하고자 한다면 precompensation에 의해 조절되는 경우에서는 WDM 채널의 입사 전력을 $-6 \sim -2$ dBm으로 하고 NRD를 -20 ps/nm와 20 ps/nm 사이에서 선택하면 된다는 것을 확인하였다. 반면 postcompensation에 의해 조절되는 경우에서는 WDM 채널의 입사 전력이 $-6 \sim -3$ dBm인 경우 NRD를 -30 ps/nm와 20 ps/nm 사이에서, $-3 \sim -2$ dBm인 경우 NRD를 -20 ps/nm와 20 ps/nm 사이에서 선택하여 설계할 수 있다는 것을 확인하였다.

본 논문에서는 중계 구간의 RDPS가 고정되지 않고 랜덤하게 변동되는 구조에서의 설계 조건을 도출하였기 때문에 장거리 대용량 광전송 링크의 구축에서 융통성을 제공할 것으로 기대한다. 그러나 RDPS의 랜덤 분포를 한 쪽 반구획에만 적용하였기 때문에 완전한 의미의 융통성 제공에는 다소 미흡하다. 따라서 앞으로의 연구에서는 전체 전송 구획에서 RDPS가 랜덤하게 분포하는 경우에서의 설계 기준을 도출할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, 2001.
- [2] M. Wu, W. I. way, "Fiber nonlinearity limitations in ultra-dense WDM systems", *J. Lightwave Technol.*, vol. 22, no. 6, pp. 1483-1498, 2004.
- [3] E. Ciaramella, G. Contestabile, A. D'Errico, C. Loiacono, and M. Presi, "High-Power Widely Tunable 40-GHz Pulse Source for 160-Gb/s OTDM Systems Based on Nonlinear Fiber Effects", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 16, no. 3, pp. 753-755, 2004.
- [4] 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.
- [5] T. L. Koch and R. C. Alferness, "Dispersion compensation by active predistorted signal synthesis", *J. Lightwave Technol.*, Vol. LT-3, pp. 800~805, 1985.
- [6] F. Quellete, "Dispersion cancellation using linearly chirped Bragg grating filters in optical waveguides", *Opt. Lett.*, Vol. 12, pp. 847~849, 1987.
- [7] J. H. B. Nijhof, N. J. Doran, W. Forgsiak, and A. Berntson, "Energy enhancement of dispersion-managed solitons and WDM," *Electron. Lett.*, Vol. 34, No. 5, pp. 481~482, 1998.
- [8] 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.
- [9] 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, May 2006.
- [10] Y. Frignaca and S. Bigo, "Numerical optimization of residual dispersion in dispersion-managed systems at 40 Gb/s," in *Proc. OFC, Baltimore*, MD, 2000, pp. 48-50.
- [11] Y. Miyamoto, A. Hirano, S. Kuwahara, M. Tomizawa, Y. Tada, "Novel modulation and detection for bandwidth-reduced RZ formats using duobinary-mode splitting in wideband PSK/ASK conversion," *IEEE J. Lightwave Technol.* Vol. 20, pp. 2067~2078, 2002.
- [12] M.I. Hayee, A.E. Willner, "RZ versus RZ in 10-40-Gb/s dispersion-managed WDM transmission systems," *IEEE Photonics Technol. Lett.* Vol. 11, pp. 991~993, 1999.
- [13] 이성렬, "집중형 분산 제어 WDM 전송 시스템에서 Mid-span spectral inversion 기술", *한국통신학회논문지*, 제 33권 1호, pp. 7~15, 2008.
- [14] 이성렬, 임황빈, "분산 제어가 적용된 광전송 링크에서 광 위상 공역의 비대칭성", *한국통신학회논문지*, 제 35권 8호, pp. 801~809, 2010.
- [15] ITU Recommendation "Spectral grids for WDM applications : DWDM frequency grid" G.694.1, 2006.

- [16] G. P. Agrawal, Fiber Optic Communication Systems, 3rd ed., John Wiley & Sons, 2003.

이 성 렬 (李成烈)



1990년 2월 : 한국항공대학교 통신
정보공학과 (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, 광
솔리톤 전송