JKIICE Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering

한국정보통신학회논문지(J. Korea Inst. Inf. Commun. Eng.) Vol. 17, No. 9 : 2219~2226, Sep. 2013

랜덤하게 분포하는 RDPS의 분산 제어 광전송 링크에서의 시스템 성능 특성

이성렬*

Characteristics of System Performance in Optical Transmission Links with the Randomly Distributed RDPS

Seong-real Lee*

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

요 약

광 위상 공액과 분산 제어 (DM; dispersion management)를 결합한 기술은 그룹 속도 분산과 비선형 Kerr 효과에 의한 광 신호 왜곡을 보상하는 대표적인 기술이다. 하지만 일반적으로 사용되는 고정된 중계 구간 당 잉여 분산 (RDPS; residual dispersion per span)은 광전송 링크의 유연한 구성을 방해한다. 본 논문에서는 유연한 광 네트워크 구축을 위해 랜덤하게 분포하는 RDPS의 DM과 결합된 새로운 OPC 링크를 제안하였다. 본 논문을 통해 WDM 채널의 입사 전력을 비교적 적게 제한하면 랜덤한 분포의 RDPS크기에 관계없이 보상 특성을 우수하게 할 수 있으며, 평균값을 0 ps/nm가 아닌 50 ps/nm부터 100 ps/nm가 되도록 중계 구간의 RDPS를 랜덤하게 분포시키면 비교적 큰 입사 전력의 WDM 채널들도 우수한 성능으로 전송시킬 수 있는 것을 확인하였다.

ABSTRACT

Optical phase conjugation combining with dispersion management (DM) is promising technique to compensate for signal distortion due to group velocity dispersion (GVD) and nonlinear Kerr effects in optical communication systems. However the fixed residual dispersion per span (RDPS) usually used in the optical links with OPC and DM restricts the flexible link configuration. In this paper, OPC links combining DM of the randomly distributed RDPS is proposed for implementing the flexible optical transmission network. It is confirmed that the excellent compensation in the optical links with the randomly distributed RDPS is obtained, limiting the launch power of WDM channels to the relatively low. It is also confirmed that the relatively high launch power WDM channels are effectively transmitted through the optical links with the randomly distributed RDPS of averaged 50 - 100 ps/nm.

키워드 : 분산 제어, 광 위상 공액, 중계 구간 당 잉여 분산, 전체 잉여 분산, 랜덤 분포의 RDPS

Key word : Dispersion management, Optical phase conjugation, Residual dispersion per span, net residual dispersion, Randomly distributed RDPS

접수일자 : 2013. 02. 08 심사완료일자 : 2013. 06. 25 게재확정일자 : 2013. 09. 04

* **Corresponding Author** Seong-real Lee(E-mail:reallee@mmu.ac.kr, Tel:+82-61-240-7264)
Department of Marine Information and Communication Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo 530-729, Korea

Open Access http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2013.17.9.2219 print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

ⓒThis is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/li-censes/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright Ⓒ The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

Ⅰ. 서 론

장거리 광전송 시스템에서 광 중계 간격 (fiber span)을 늘려주고, 고품질의 수신 성능을 위한 높은 광 신호 대 잡음비 (OSNR; optical signal power to noise power ratio)를 얻기 위해서는 광 신호 전력이 매우 커져야 한다. 그러나 광 신호 전력이 증가하게 되면 자기 위상 변조 (SPM; self-phase modulation), 상호 위상 변조 (XPM; cross-phase modulation), 4-광파 혼합 (FWM; foue-wave mixing)과 같은 비선형 Kerr 효과에 의한 광신호의 왜곡도 점점 심해진다. 또한 대용량 전송을 위해 손실이 가장 낮은 1,550 nm 파장 대역에서 광 채널의 속도를 100 Gbps 정도로 높여주게 되면 단일 모드 광섬유 (SMF; single mode fiber)의 그룹 속도 분산 (GVD; group velocity dispersion)이 심해져 광 신호 왜곡의 또 다른 원인이 된다.

장거리 통신 시스템의 전송 링크에 분산 제어 (DM; dispersion management)를 적용하면 GVD에 의한 왜곡을 제거하거나 줄여줄 수 있다 [1],[2]. 선치 보상 (precompensation), 후치 보상 (postcompensation), 중계 구간 당 잉여 분산 (RDPS; residual dispersion per span), 전체 잉여 분산 (NRD; net residual dispersion)은 분산 제어 광전송 링크에서 신호 성능을 높여주는 중요 파라미터들이다[3].

선치 보상과 후치 보상은 각각 송신기 다음, 즉 전체 전송 링크의 가장 앞단과 수신기 앞, 즉 전체 전송 링크의 가장 끝단에 위치한 분산 보상 광섬유 (DCF; dispersion compensating fiber)를 통해 보상되는 분산량으로 정의된다. RDPS는 광 중계 간격마다 축적된 분산량으로 정의된다. 또한 NRD는 전체 전송 링크의 최종단에서 축적된 분산으로 정의된다. 일반적으로 NRD는 선치 보상, 후치 보상, RDPS의 조절로 결정된다. DM의 장점은 분산 기울기 정합 (slope-matching) 보상 능력, 즉 전송 광섬유의 분산과 분산 기울기 (dispersion slope)를 동시에 보상한다는 것이다[4]. 하지만 DM은 광섬유의 비선형 효과가 없는 경우에만 효과가 있다는 단점이 있다.

반면, 광 위상 공액 (optical phase conjugation)은 GVD에 의한 왜곡뿐만 아니라 비선형 효과에 의한 왜곡도 보상할 수 있는 기술이다[5-10]. 이 기술에서 핵심 장치는 전체 전송 링크의 중간에 위치한 광 위상 공액기 (OPC; optical phase conjugator)이다. 즉 전체 전송 링크의 중간에 위치한 OPC를 중심으로 두 반 전송 구획 (half section)에서의 국부 분산과 광 전력 분포가 대칭이 되면 GVD와 비선형 효과에 의한 왜곡을 완벽하게 보상할 수 있다. 이 기술을 적용하는 데 있어 데이터율과 변조 파형 형식의 제약은 없으며, 빠른 응답 시간과 다중 채널 전송 시스템에서도 매우 효과적으로 보상이 이루어진다는 장점이 있다.

하지만 실제 광전송 링크에서 본질적으로 존재하는 손실과 에르븀 광섬유 증폭기 (EDFA; erbium-dopped fiber amplifier)에서의 증폭으로 인해 Kerr 효과의 세기를 OPC를 중심으로 서로 대칭시키기 어렵기 때문에 OPC를 통한 비선형 효과에 의한 왜곡의 완벽한 보상은 매우 힘들다[6]. 그러나 이러한 한계를 극복하기 위한 다양한 기술들, 즉 OPC 위치의 최적화[7],[8], DM과 OPC를 결합하는 기술[9],[10] 등이 보고되고 있다.

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 앞선 연구를 통하여 확인하였다[11]. 선행 연구에서는 첫 번째 중계 구간의 DCF를 이용한 선치 보상과 마지막 중계 구간의 DCF를 이용한 후치 보상에 의해 조절되는 NRD에 따른 성능 평가를 통해 최적의 NRD를 도출하여 적용하였다. 연구 결과 중 주목할 만한 것은 변조 파형 형식, 중계 구간의 개수, WDM 채널 수에 관계없이 최적의 NRD는 선치 보상과 후치 보상과 관련하여 0 ps/nm가 아닌 10 ps/nm 또는 -10 ps/nm라는 것이다.

참고 문헌 [11]을 포함한 DM 관련 다른 연구자들의 논문들은 SMF 길이와 RDPS를 모든 중계 구간에서 일정하게 한 링크 구조를 사용하였다. 이러한 구조는 광전송 링크 구성을 간단하게 만든다는 장점이 있다. 하지만 광 네트워크 형태(topology)의 유연한 구성을 위해서는 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS가 제약을 받아서는 안 된다.

따라서 본 연구에서는 각 중계 구간의 RDPS가 랜덤하게 분포하는 링크를 통한 유연한 광 네트워크 구성의 가능성을 연구해 본다. 랜덤하게 분포하는 RDPS를 갖는 모든 중계 구간에서의 평균 RDPS 값의 범위는 0 ps/nm부터 500 ps/nm으로 하였다. 반면 SMF 길이는 모든 중계 구간에서 80 km로 일정하게 하였다. 본 연구

에서 제안하는 광전송 링크를 사용하여 전송되는 광 신호는 960 Gbps WDM 신호로 모델링하였다. 각 WDM 채널의 변조 파형 형식은 RZ(return-to-zero)로 가정하였다.

Ⅱ. 광전송 링크 모델링

그림 1은 본 연구에서 살펴보고자 하는 OPC와 DM이 적용된 광전송 링크와 WDM 전송 시스템의 구조를 나타낸 것이다. 전송 링크는 전체 전송 거리의 중간에 있는 OPC를 중심으로 전반 구획 (former half section)과 후반 구획 (latter half section) 각각 7개의 중계 구간으로 구성된다. 모든 중계 구간은 주 전송로인 SMF와 여기서 축적된 분산을 제거하거나 줄여주기 위한 DCF로 구성된다.

모든 중계 구간의 SMF의 길이 l_{SMF}는 80 km, 손실 계수 α_{SMF}는 0.2 dB/km, 비선형 계수 γ_{SMF}는 1.35 $W^{-1}km^{-1}$(@1,550 nm), 분산 계수 D_{SMF}는 17 ps/nm/km(@1,550 nm)로 동일하게 모델링하였다. 따라서 한 중계 구간의 SMF에서 축적되는 분산량은 1,360 ps/nm이다. DCF의 손실 계수 α_{DCF}는 0.6 dB/km, 비선형 계수 γ_{DCF}는 5.06 $W^{-1}km^{-1}$(@1,550 nm), 분산 계수 D_{DCF}는 -100 ps/nm/km로 14개 중계 구간 모두 동일하게 가정하였다.

각 중계 구간의 RDPS는 DCF의 길이를 통해 조절된다. 예를 들어, 임의의 중계 구간의 RDPS를 100 ps/nm로 하고자 한다면 SMF에서 축적된 분산이 1,360 ps/nm이기 때문에 DCF의 길이를 (-1,260 ps/nm) / (-100 ps/nm/km) = 12.6 km로 설정하면 된다. 즉 각 중계 구간의 DCF 길이는 아래 식으로 결정된다.

표 1. 각 중계 구간에서 랜덤하게 선택되는 RDPS
Table. 1 The randomly selected RDPS for each fiber spans

평균 RDPS	랜덤하게 선택되는 RDPS [ps/nm]					
0	-600	-300	-150	150	300	600
50	-550	-250	-100	200	350	650
100	-500	-200	-50	250	400	700
150	-450	-150	0	300	450	750
200	-400	-100	50	350	500	800
250	-350	-50	100	400	550	850
300	-300	0	150	450	600	900
350	-250	50	200	500	650	950
400	-200	100	250	550	700	1000
450	-150	150	300	600	750	1050
500	-100	200	350	650	800	1100

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

식 (1)에서 RDPS는 OPC를 중심으로 전반 구획에서는 첫 번째 중계 구간을, 후반 구획 에서는 14번째 중계 구간을 제외한 각각 6개의 중계 구간들이 임의의 평균값에 따라 표 1의 6개 중 하나씩을 랜덤하게 선택한 값이다. 각 전송 반 구획의 평균 RDPS는 50 ps/nm 간격으로 0부터 500 ps/nm까지 고려하였다.

예를 들어, 각 전송 반 구획의 6개 중계 구간들이 각각 표 1의 세 번째 행의 6개 RDPS들 중 하나씩을 랜덤하게 선택하면 이들의 평균 RDPS는 100 ps/nm가 된다.

본 연구에서의 시스템 성능 평가는 최종 수신단에 축적된 NRD가 10 ps/nm와 -10 ps/nm인 링크에서 24개 WDM 채널 중 최악 채널의 눈 열림 패널티 (EOP; eye opening penalty)를 분석하여 이루어진다. NRD는 그림 1의 AWG MUX 바로 다음에 있는, 즉 첫 번째 DCF의

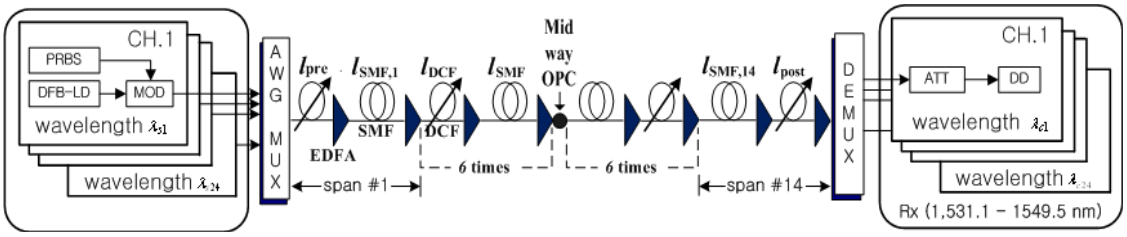


그림 1. 광전송 링크와 WDM 시스템 구조
Fig. 1 Configuration of optical transmission links and WDM system

길이 l_{pre}에 변화를 주어 얻어지는 선치 보상과 DEMUX 바로 전에 있는, 즉 14번째 DCF의 길이 l_{post}에 변화를 주어 얻어지는 후치 보상에 의해 결정되도록 설계하였다. 즉 선치 보상에 의해 NRD를 10 ps/nm와 -10 ps/nm로 하고자 한다면 후반 구획에서의 NRD를 l_{post} = [(평균 RDPS × 6) + ($l_{SMF,16}$×D_{SMF})]/(-D_{DCF})에 의해 0 ps/nm로 고정해 놓고 l_{pre}는 각각 l_{post} - 0.1 km와 l_{post} + 0.1 km로 결정하여 적용하면 된다. 반면 후치 보상에 의해 NRD를 10 ps/nm와 -10 ps/nm로 하고자 한다면 선치 보상에 의한 결정 방법에서 l_{pre}와 l_{post}의 관계를 바꾸어서 결정하면 된다.

Ⅲ. 960 Gbps WDM 시스템 모델링과 성능 평가

그림 1의 WDM 전송 시스템의 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) 의사 랜덤 비트열 (PRBS; pseudo random bit sequence)에 의해 외부적으로 변조되는 것으로 모델링하였다. 이 때 외부 변조기로부터 발생되는 변조 파형 형식은 소광비 (ER; extinction ratio)가 10 dB인 2차 가우시안 펄스의 RZ(return-tozero)로 모델링하였다.

24개의 WDM 채널 신호들은 배열 도파로 다중화기 (AWG MUX)에서 다중화된 후 광 링크로 전송된다. 다중화되어 전송되는 24개 채널 신호들은 전체 전송로 중간에 위치한 OPC에서 공액 변환되어 나머지 전송 구획을 전파한 후 DEMUX에서 각 채널별로 분리된 후 수신기(Rx)로 보내진다. OPC는 참고 문헌 [11]에서와 동일한 파라미터를 갖는 HNL-DSF(highly nonlinearity – dispersion shifted fiber)를 비선형 매질로 갖는 구조로 모델링하였다. 그리고 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[12].

광전송 링크를 통해 손실과 비선형 효과의 영향을 겪으면서 전파하는 각 채널들은 비선형 쉬뢰딩거 방정식 (NLSE; nonlinear Schrödiger equation)에 의해 표현된다[13]. NLSE를 수치적으로 해석하는 가장 일반적인 방법은 단계 분할 퓨리에 (SSF; split- step Fourier) 기법을 통해 시뮬레이션하는 것이다.

시스템의 성능 분석에 사용되는 EOP는

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

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 $2P_{av}/(P_{1,\min} - P_{0,\max})$로 정의된다. 여기서 Pav는 광 신호의 평균 전력, P1,min은 펄스 '1'의 최소 전력이고 P0,max은 펄스 '0'의 최대 전력이다.

표 1로부터 만들 수 있는 각 전송 반 구획의 중계 구간의 랜덤한 RDPS 분포는 무수히 많다. 시뮬레이션의 정확성을 위해서는 모든 경우의 랜덤한 RDPS 분포에 따른 EOP 특성을 분석하여야 하지만, 그렇게 하면 매우 많은 시간이 소모되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 시간 소모를 줄이면서 어느 정도의 정확한 수치적 분석을 위하여 30가지의 RDPS 랜덤 분포 패턴을 고려하였다.

Ⅳ. 시뮬레이션 결과

그림 2는 랜덤하게 선택되는 각 중계 구간의 RDPS들의 전송 반 구획에서의 평균값에 따른 최악 채널의 EOP를 다양한 링크 파라미터와 입사 전력별로 나타낸 것이다. 그림 2의 각 특성 그래프에서 평균 RDPS에 따른 하나하나의 EOP값은 30가지의 랜덤 분포 패턴별로 얻어진 값이고, 이 30가지의 값들을 모든 중계 구간의 RDPS가 균일한 링크에서 얻은 EOP(그래프에서 ●로 표시)와 비교하였다.

우선 입사 전력이 클수록 랜덤 분포 패턴에 따른 동일한 RDPS에서의 EOP 변동이 심한 것을 알 수 있다. 동시에 동일한 입사 전력에 대해 평균 RDPS가 증가할수록 전반적으로 EOP 변동이 아울러 증가하는 것을 알 수 있다. 즉 앞선 연구들을 통해 확인한 최적의 NRD인

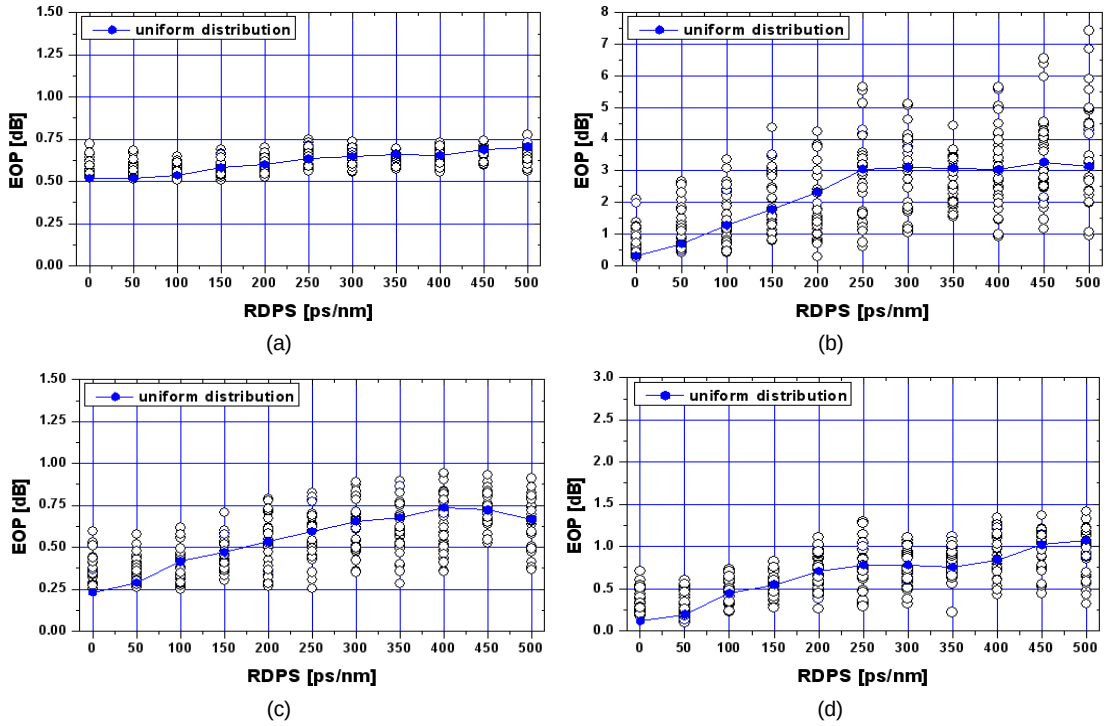


그림 2. 랜덤 분포와 일정 분포의 RDPS에 따른 최악 채널의 EOP (a) NRD = 10 ps/nm by precompensation; Ps = -5 dBm (b) NRD = -10 ps/nm by precompensation; Ps = 3 dBm (c) NRD = 10 ps/nm by postcompensation; Ps = -3 dBm (d) NRD = -10 ps/nm by postcompensation; Ps = -1 dBm

Fig. 2 EOP of worst channel as a function of RDPS randomly distributed and uniformly distributed (a) NRD = 10 ps/nm by precompensation; Ps = -5 dBm (b) NRD = -10 ps/nm by precompensation; Ps = 3 dBm (c) NRD = 10 ps/nm by postcompensation; Ps = -3 dBm (d) NRD = -10 ps/nm by postcompensation; Ps = -1 dBm

10 ps/nm와 -10 ps/nm의 링크에서 시스템 성능에 큰 영향을 주는 요소는 입사 전력과 평균 RDPS인 것을 그림 2를 통해 알 수 있다. 따라서 이에 대한 분석을 다른 관점에서 수행해 볼 필요가 있다.

장거리 광전송 시스템에서 일반적으로 고품질을 판단하는 수신 성능의 기준은 1 dB EOP를 사용한다. 이 값은 송신 광 펄스에 대한 수신 광 펄스의 시간적 퍼짐 (temporal broadening)이 1.25에 해당하는 값이고 비트 에러율 (BER; bit error rate)로는 10^{-12}에 상응하는 값이다. 그림 3은 30가지의 랜덤 패턴마다 얻은 수신 성능 중 EOP가 1 dB 이상인 경우의 수를 입사 전력과 평균 RDPS 값에 따라 나타낸 것이다. 그림 3에서 개수가 표시되지 않은 것은 0개를 의미한다.

우선 RDPS 분포가 랜덤한 링크를 전파하는 WDM 채널들의 입사 전력이 WDM 채널들이 -7 dBm부터 -3 dBm으로 제한되면 30가지의 모든 랜덤 분포에 대해 EOP가 1 dB 이하로 얻어지는 것을 확인할 수 있다. 즉 -7 dBm에서 -3 dBm의 입사 전력을 갖는 WDM 채널들은 링크의 RDPS가 랜덤하게 분포한다고 하더라도 NRD를 10 ps/nm 또는 -10 ps.nm로 최적화시키면 RDPS 값에 크게 상관없이 1dB 이하의 고품질로 전송되는 것을 확인할 수 있다.

하지만 그림 3의 결과를 자세히 분석해보면 NRD를 선치 보상과 후치 보상 각각에 의해 10 ps/nm나 -10 ps/nm로 한 4가지 경우의 링크에서의 입사 전력과 랜덤 분포 RDPS에 따른 시스템 성능이 아주 흡사하다고 볼 수 없다. 즉 랜덤 패턴 30가지 중에서 1 dB 이상의 EOP를 만드는 RDPS 랜덤 패턴 개수를 3개까지 허용한다는 완화된 성능 기준으로 랜덤 분포의 평균 RDPS가 매우 큰 경우인 400 ps/nm 이상에서의 1 dB 이상으로 얻어지

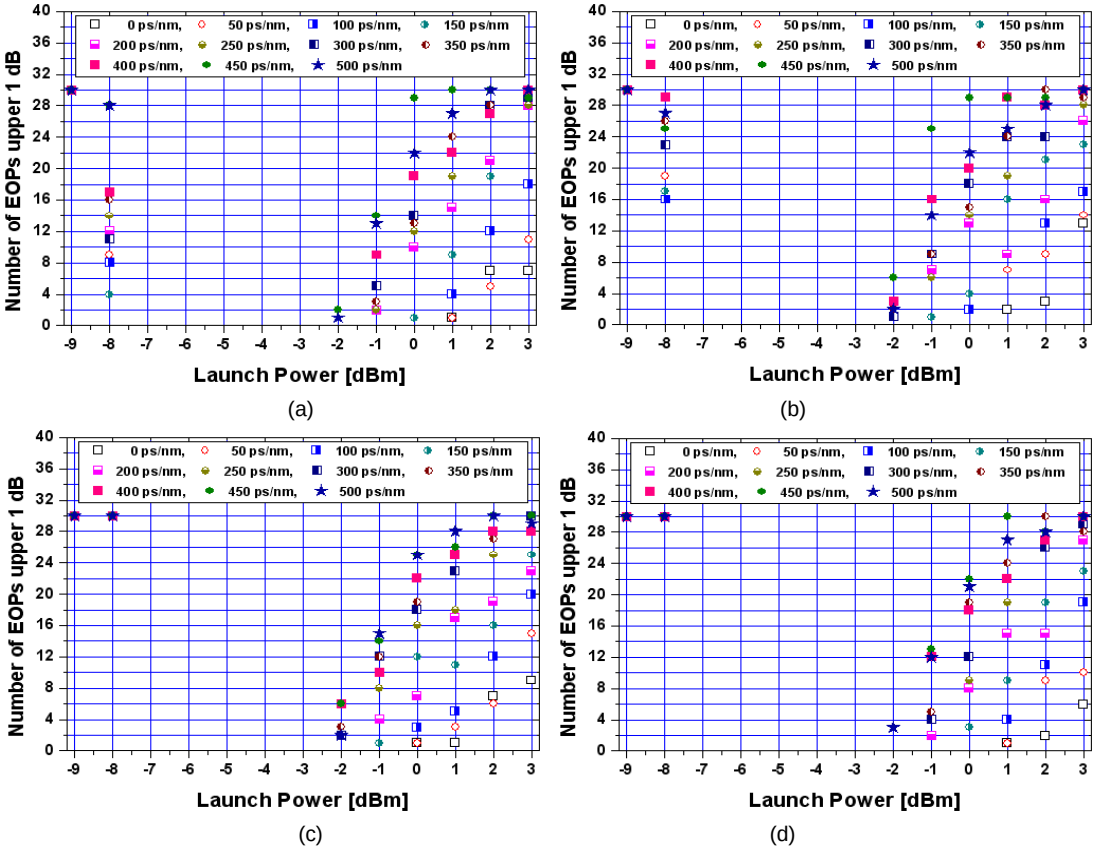


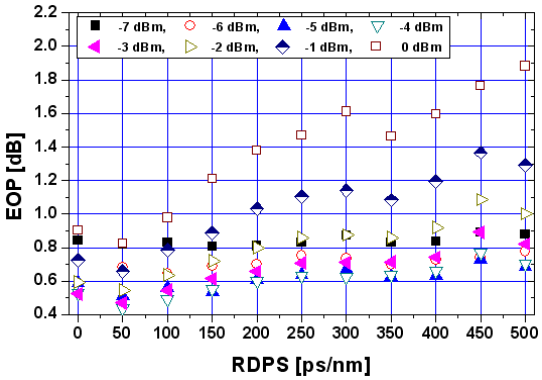
그림 3. 1 dB 이상으로 얻어진 EOP 개수 (a) NRD = 10 ps/nm by precompensation (b) NRD = -10 ps/nm by precompensation (c) NRD = 10 ps/nm by postcompensation (d) NRD = -10 ps/nm by postcompensation

Fig. 3 Number of EOPs upper than 1 dB (a) NRD = 10 ps/nm by precompensation (b) NRD = -10 ps/nm by precompensation (c) NRD = 10 ps/nm by postcompensation (d) NRD = -10 ps/nm by postcompensation

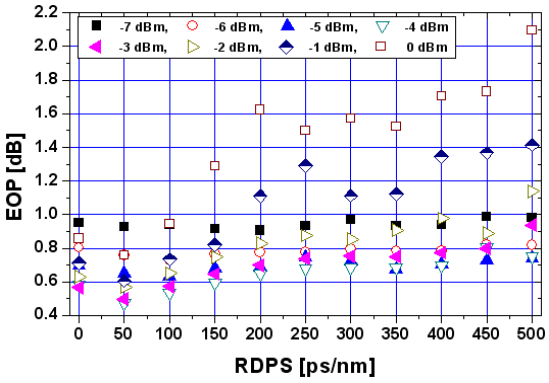
는 EOP 개수를 다시 분석해보면 선치 보상에 의해 NRD를 10 ps/nm로 한 링크와 후치 보상에 의해 NRD를 -10 ps/nm로 한 링크에서의 WDM 채널의 입사 전력 범위가 늘어나는 것을 알 수 있다. 다시 말해 같은 최적 NRD라고 하더라도 10 ps/nm는 선치 보상에 의해, -10 ps/nm는 후치 보상에 의해 결정되는 링크가 성능 개선에 유리한 것을 확인할 수 있다.

그림 4 (a)와 (b)는 각각 선치 보상에 의해 NRD를 10 ps/nm로 설정된 링크와 후치 보상에 의해 NRD를 -10 ps/nm로 설정된 링크에서의 30개 랜덤 패턴에 의한 EOP 중 가장 최악으로 얻어진 EOP를 입사 전력과 평균 RDPS에 따라 나타낸 것이다. 고려한 WDM 채널의 모든 입사 전력 범위에 대해 가장 수신 성능을 양호하게 만드는 랜덤 분포에 의한 최상의 평균 RDPS는 50 ps/nm인 것을 알 수 있다.

그림 5는 그림 4에 나타낸 랜덤 분포 RDPS의 링크에서 얻어진 최악의 EOP (EOP_{ran})와 균일 분포 RDPS의 링크에서 얻어진 EOP (EOP_{uni})의 편차를 나타낸 것이다. 균일 분포 RDPS를 갖는 링크에서 얻어진 EOP와의 편차 관점에서 살펴보면 그림 4의 결과와는 달리 편차가 가장 적은 최상의 평균 RDPS는 100 ps/nm인 것을 알 수 있다. 하지만 그림 4에서 얻은 최상의 평균 RDPS인 50 ps/nm에서의 EOP 편차도 크지 않고, 또한 그림 4를 다시 살펴보면 랜덤 분포의 RDPS가 100 ps/nm인 경우에서도 고려한 모든 입사 전력의 최악의 EOP가 1 dB 이하인 것을 확인할 수 있다.



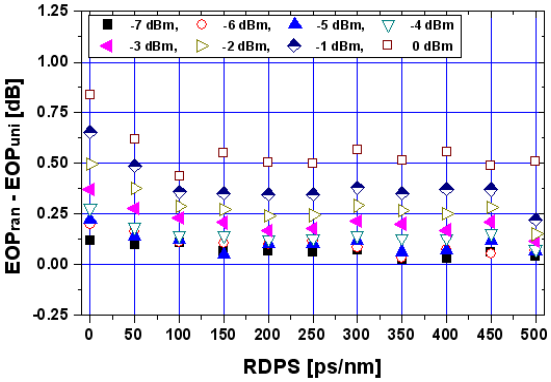
(a)



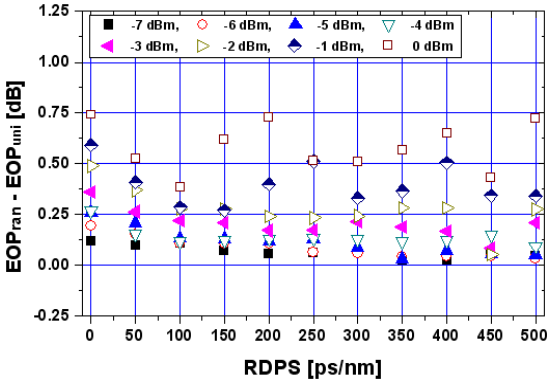
(b)

그림 4. 랜덤 분포의 RDPS에 따른 최악의 EOP (a) NRD = 10 ps/nm by precompensation (b) NRD = -10 ps/nm by postcompensation

Fig. 4 The worst EOP as a function of RDPS randomly distributed (a) NRD = 10 ps/nm by precompensation (b) NRD = -10 ps/nm by postcompensation



(a)



(b)

그림 5. 랜덤 분포의 RDPS에 따른 EOP 편차 (a) NRD = 10 ps/nm by precompensation (b) NRD = -10 ps/nm by postcompensation

Fig. 5 The deviation of EOP as a function of RDPS randomly distributed (a) NRD = 10 ps/nm by precompensation (b) NRD = -10 ps/nm by postcompensation

그림 4와 그림 5의 결과를 종합적으로 분석하면, 고려한 WDM 채널의 모든 입사 전력 범위에 대해 수신 성능을 양호하게 만들고 균일 분포의 RDPS로 구성된 링크에서의 수신 성능과 차이가 크지 않은 랜덤 분포에 의한 최상의 평균 RDPS는 50 ps/nm와 100 ps/nm라고 할 수 있다. 즉 중계 구간의 RDPS를 랜덤하게 분포시켜 링크를 구성하고자 하는 경우 잉여 분산을 완전히 제거(0 ps/nm)하지 않고 잉여 분산을 어느 정도 허용하는 50 - 100 ps/nm로 평균값을 갖도록 하는 것이 가장 최적이라는 것을 확인하였다. SPM에 의한 비선형 왜곡은 입사 전력이 비교적 큰 WDM 채널을 전송하는 경우 더욱 증가하는데 입사 전력에 따른 SPM 효과를 약화시키기 위해서는 중계 구간에 0 ps/nm가 아닌 어느 정도 크기의 RDPS로 광 신호를 퍼지게 하여 (broaden) 순시 전력을 감소시킬 필요가 있기 때문에 이러한 결과가 나온 것이라고 판단된다.

Ⅴ. 요약 및 결론

SPM과 GVD의 상호 작용에 의한 WDM 신호의 왜곡을 보상하기 위해 OPC와 DM이 적용된 시스템을 유연하게 구성하는데 필수적인 RDPS가 랜덤하게 분포하는 전송 링크에서의 성능을 분석하였다. 또한 랜덤 분

포 RDPS의 링크를 통해 유연한 광 네트워크 구축이 가능한지를 살펴보기 위하여 동일한 조건 하에서 RDPS를 균일하게 분포시킨 전송 링크에서의 시스템 성능과 비교해 살펴보았다.

중계 구간의 RDPS가 랜덤하게 분포하는 링크를 통해 WDM 전송을 하고자 하는 경우 입사 전력을 비교적 적게 제한하면 평균 RDPS 값에 크게 의존하지 않고 우수한 전송이 이루어지는 것을 확인하였다.

그러나 WDM 채널들의 입사 전력이 0 dBm 정도로 증가하면 SPM에 의한 광 신호 왜곡이 증가하게 된다. 이러한 고전력 신호 전송을 위한 링크를 랜덤한 분포의 RDPS로 구성하는 경우에는 평균 RDPS를 0 ps/nm가 아닌 50 - 100 ps/nm로 비교적 적은 값이 유지되게 설정해야 한다는 것을 동시에 확인하였다.

결론적으로 본 연구에서 제안한 RDPS를 랜덤하게 분포하는 전송 링크를 통해 유연한 광 네트워크 구성이 가능한 것을 확인하였고, 이를 위해서는 전송하고자 하는 WDM 채널의 입사 전력과 평균 RDPS 사이에 균형(trade off)이 있어야 한다는 것을 알 수 있었다.

REFERENCES

[1] M. Suzuki, and N. Edagawa, "Dispersion-managed high-capacity ultra-long-haul transmission," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 21, no. 4, pp. 916-929, 2003.

[2] L. Gruner-Nielsen, M. Wandel, P. Kristensen, C. Jorgensen, L. V. Jorgensen, B. Edvold, B. Palsdottir, and D. Jakobsen, "Dispersion-compensating fibers," *Journal of Lightwave Technology*, vol.23, no.11,pp.3566-3579, 2005.

[3] X. Xiao, S. Gao, Y. Tian, and C. Yang, "Analytical optimization of the net residual dispersion in SPM-limited dispersion-managed systems," *Journal of Lightwave Technology*, vol.24, no.5, pp.2038-2044, 2006.

[4] H. Wei, and D. V. Plant, "Simultaneous nonlinearity suppression and wide-band dispersion compensation using optical phase conjugation," *Optics Express*, vol. 12, no. 9, pp. 1938-1958, 2004.

[5] S. L. Jansen, D. van den Borne, M. Krummrich, , S. Sp¨alter, and G. D. Khoe, "Long-haul DWDM transmission systems employing optical phase conjugation," *IEEE Journal Selected Topics In Quantum Electronics*, vol.12, no.4, pp.505-520, 2006.

[6] S. Watanabe, and M. Shirasaki, "Exact compensation for both chromatic dispersion and Kerr effect in a transmission fiber using optical phase conjugation," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 14, no. 3, pp. 243-248, 1996.

[7] X. Xiao, C. Yang, S. Gao, and Y. Tian, "Partial compensation of Kerr nonlinearities by optical phase conjugation in optical fiber transmission systems without power symmetry," *Optics Communications*, vol. 265, no. 1, pp. 326-330, 2006.

[8] P. Minzioni, F. Alberti, and A. Schiffini, "Optimized link design for nonlinearity cancellation by optical phase conjugation," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 16, no. 3, pp. 813-815, 2004.

[9] A. Chowdhury, and R. J. Essiambre, "Optical phase conjugation and pseudolinear transmission," *Optics Letters*, vol. 29, no. 10, pp. 1105-1107, 2004.

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

[11] S. R. Lee, "Dispersion managed optical transmission links with optimized optical phase conjugator," *International Journal of Maritime Information and Communication Sciences*, vol.7, no.3, pp. 372-376, 2009.

[12] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 3rd ed., New York, NY:Wiley, 2002.

[13] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics* 3rd ed.. San Francisco, SF:Academic Press, 2001.

이성렬(Seong-Real Lee)

1990년 2월 한국항공대학교 통신정보공학과 (공학사)
1992년 8월 한국항공대학교 대학원 통신정보공학과 (공학석사)
2002년 2월 한국항공대학교 대학원 통신정보공학과 (공학박사)
2002년 6월 ~ 2004년 2월 (주)에이티엔 기술연구소장
2004년 3월 ~ 현재 국립목포해양대학교 해양정보통신공학과 부교수
※ 관심분야 : WDM 시스템, 광의 비선형 현상 분석, 광 솔리톤 전송