

원점 대칭 분산 맵과 OPC를 가진 광전송 링크

Optical Transmission Link with Dispersion Map of Antipodal Symmetry and OPC

이성렬

목포해양대학교 항해정보시스템 학부

Seong-Real Lee

Division of Navigational Information System, Mokpo National Maritime University, Jeollanam-do, 58628, Korea

[요 약]

단일 모드 광섬유의 본질적인 색 분산과 비선형 Kerr 효과에 의해 왜곡되는 파장 분할 다중 신호의 보상을 위한 광 위상 공액기를 갖는 분산 제어 링크에서의 보상 효과 제고를 위한 원점 대칭 구조의 분산 맵을 제안하였다. 제안된 모든 형태의 원점 대칭 분산 맵을 갖는 분산 제어 링크는 전통적인 균일 구조의 분산 제어 링크에 비해 파장 분할 다중 채널의 왜곡 보상에 효과적이라는 것을 확인하였다. 특히 알파벳 S자 형태의 분산 맵보다 알파벳 S자를 상하 반전시킨 형태인 분산 맵의 구조를 다양한 형태로 변형시켜도 왜곡 보상에 유리하다는 것을 확인하였다. 제안된 원점 대칭 구조의 분산 맵을 전송 링크에 적용하면 광 네트워크의 토폴로지를 보다 다양하게 구성할 수 있을 것으로 기대된다.

[Abstract]

Dispersion maps of antipodal symmetric type for improvement of compensation effect in dispersion managed link combined with optical phase conjugation, which can compensate for the distorted wavelength division multiplexed (WDM) signals due to chromatic dispersion and nonlinear Kerr effects of single-mode fiber, were proposed. It was confirmed that the proposed all of antipodal symmetric dispersion maps was more effective to compensate for the distorted WDM channels than the conventional link of uniform type dispersion map. Especially, dispersion maps formed like the inversion of alphabet S were more advantageous as the distorted WDM channels were compensated than dispersion maps formed like alphabet S. It was expected that the variety of optical network topology was more expanded by applying the proposed antipodal symmetric dispersion maps into transmission link.

Key word : Antipodal symmetric dispersion map, Optical phase conjugation, Residual dispersion per span, Net residual dispersion, WDM transmission.

<https://doi.org/10.12673/jant.2021.25.4.286>



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 June 2021; Revised 1 August 2021

Accepted (Publication) 18 August 2021 (30 August 2021)

*Corresponding Author; Seong-Real Lee

Tel: +82-61-240-7264

E-mail: reallee@mmu.ac.kr

I. 서론

에르븀 첨가 광섬유 증폭기 (EDFA; erbium-doped fiber amplifiers)에 의해 전송 거리를 신장시키는 광전송 링크에서 색 분산 (chromatic dispersion)에 의한 광 펄스의 시간적 교란 (temporal disturbance)과 비선형 Kerr 효과에 의한 주파수적 교란 (spectral disturbance)은 아이러니컬하게도 전송 거리와 전송 용량에 제한을 준다[1]. 즉 장거리와 대용량 전송을 위해서는 광섬유, 특히 표준 단일 모드 광섬유 (SSMF; standard single-mode fibers)가 갖는 색 분산과 비선형 Kerr 효과를 없애거나 줄여주어야 한다.

다행스럽게도 색 분산의 제거나 완화는 SSMF와 광학적 특성, 특히 분산 계수가 다른 분산 보상 광섬유 (DCF; dispersion compensating fiber)를 추가하여 링크를 구성하는 분산 제어 (DM; dispersion management)를 통해 가능하다[2]-[4]. 또한 비선형 Kerr 효과에 의한 왜곡 보상을 위해 디지털 역 전송 (digital back propagation) [5],[6], 위상 공액 쌍둥이 파동 (phase-conjugated twin waves)의 전송[7], 위상 반응 증폭 (phase-sensitive amplification) [8], 광 솔리톤 (optical soliton) 전송 [9], 그리고 광 위상 공액 (optical phase conjugation) [10]-[13] 등 다양한 기술이 제안되었다.

광 위상 공액은 전체 전송 링크 중 특정한 곳에 광 위상 공액기 (OPC; optical phase conjugator)를 두어 이곳까지 전송되면서 왜곡된 신호를 OPC가 위상 공액시켜 나머지 구간을 전송시키면 원래 신호와 흡사하게 복원할 수 있는 기술이다. DM은 그 자신만으로 비선형 Kerr 효과에 의한 왜곡을 완벽하게 보상할 수 없다는 한계를 갖고 있고, 광 위상 공액은 OPC가 전체 전송 링크 중간이나 그 근처에 있어야 하기 때문에 링크 구조를 유연하게 만들지 못한다는 한계를 갖는다.

하지만 다행스럽게도 이 두 기술을 적절히 결합하면 각각이 갖는 한계를 어느 정도 개선할 수 있다. 본 논문의 저자도 그간의 연구를 통해 DM 링크에 광 위상 공액을 적용하는데 있어 OPC를 전체 전송로 중간이 아닌 곳에 위치시켜도 과장 분할 다중 (WDM; wavelength division multiplexing) 신호를 보상을 통해 고품질로 전송할 수 있다는 것을 보였다 [14]-[16].

전체 전송 링크 중간에 OPC를 위치시키는 것을 MSSI (mid-span spectral inversion)이라 한다. DM 링크에 MSSI를 적용하는 경우 왜곡된 WDM 채널의 보상 정도는 분산 맵 (dispersion map)에 의존하는 것을 앞선 연구를 통해 보였다. 분산 맵은 전송 거리에 따른 누적 분산량 (accumulated dispersion)의 분포를 전체 전송 구간에 대해 표현한 것이다. 분산 맵의 형태는 중계 구간 당 잉여 분산 (RDPS; residual dispersion per span)을 각 중계 구간마다 적용하는 구체적 방법에 따라 결정된다.

MSSI가 적용된 DM 링크에서 OPC의 본질적 특성에 기인하여 설계된 OPC 중심 대칭 구조의 다양한 형태의 분산 맵이 WDM 채널의 왜곡 보상에 미치는 영향을 참고 문헌 [17]에서 살펴보았다. 분석 결과 분산 맵의 모양이 전체 전송 링크 중간에 있는 OPC에 대해 좌우 대칭 (bilateral symmetry)인 구조보

다 원점 대칭 (antipodal symmetry)인 구조가 색 분산과 비선형 Kerr 효과에 의한 왜곡 보상에 유리하다는 것을 확인하였다.

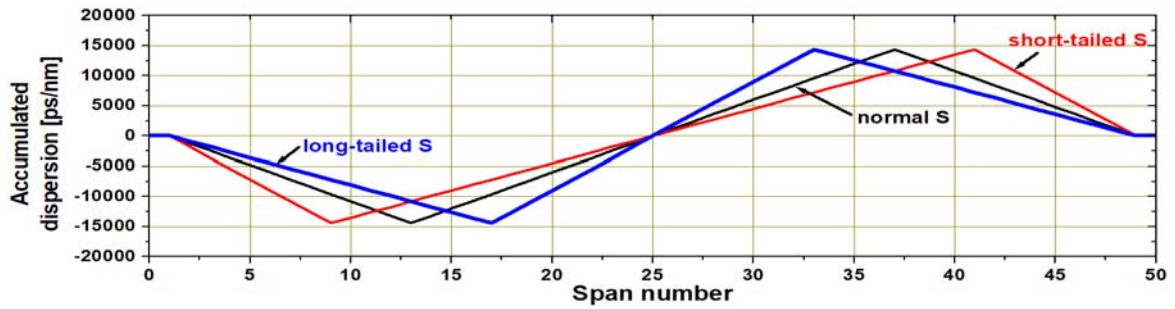
[17]에서 고려한 원점 대칭 구조의 분산 맵들은 전체 전송 링크 중간을 중심으로 한 모양이 알파벳 S로 보이는 “S-분포”와 이와 반대되는 모양, 즉 알파벳 S를 상하 반전시킨 모양으로 보이는 “inverse-S-분포”의 두 가지였다. “S-분포”와 “inverse-S-분포” 모두 각 중계 구간에 적용되는 RDPS를 의도를 가지고 다르게 하면 전체적으로는 “S-분포”와 “inverse-S-분포”를 갖지만 세부적으로는 다양한 형태로 변화를 줄 수 있다. 본 논문은 [17]의 후속 연구 내용과 결과를 보인다. 즉 각 중계 구간에 적용시키는 RDPS의 크기와 적용 패턴을 다르게 하여 만들어지는 다양한 구조의 원점 대칭 분산 맵에 따른 960 Gbps (= 40 Gbps × 24 채널) WDM 신호 왜곡 보상의 영향을 분석해 본다.

II. 전송 링크와 분산 맵 모델링

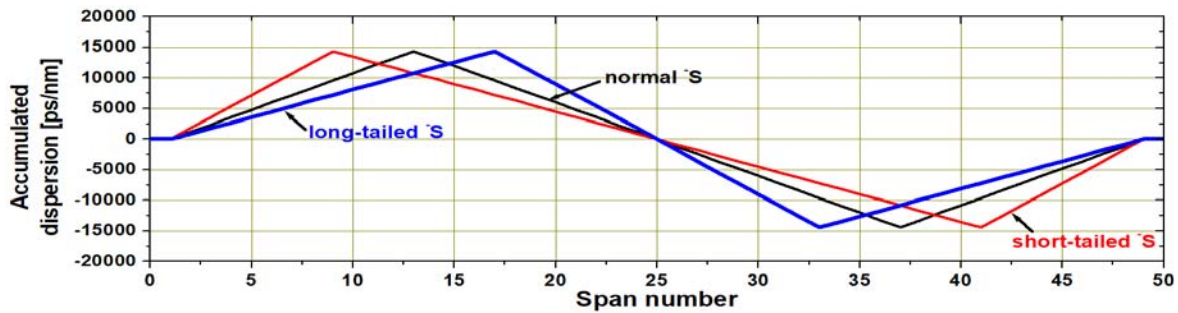
그림 1은 MSSI, 즉 OPC가 전체 전송 링크 중간에 위치한 DM 링크에서의 원점 대칭 구조의 분산 맵을 보인 것이다. 총 중계 구간 개수는 그림 2에 보인 것처럼 50개이고, 25번째 중계 구간과 26번째 중계 구간 사이에 OPC를 위치시켰다. 그림 1(a)의 S 분포 패밀리의 분산 맵은 OPC까지의 전반 전송 구획 (FHS; former half section) 중 앞쪽에서는 전송 거리가 증가할수록, 즉 중계 구간 번호가 증가할수록 누적 분산량을 점진적으로 줄이고, 뒤쪽에서는 전송 거리가 증가할수록 누적 분산량을 점진적으로 늘리는 형태이고, 반면 OPC부터 수신단까지의 후반 전송 구획 (LHS; latter half section) 중 앞쪽에서는 전송 거리가 증가할수록 누적 분산량을 점진적으로 늘리고, 뒤쪽에서는 전송 거리가 증가할수록 누적 분산량을 점진적으로 줄이는 형태이다.

그림 1(a)에서 FHS와 LHS 모두 중간 지점에서 분산 분포가 좌우 대칭되는 모양을 “normal S”라고 명명했고, 이 모양과 비교하여 분산 맵 전체 중 앞부분과 뒷부분이 가운데 부분보다 긴 경우, 즉 FHS에서 누적 분산량이 감소되는 중계 구간 수가 누적 분산량이 증가되는 중계 구간 수보다 많고 동시에 LHS에서도 누적 분산량이 감소되는 중계 구간 수가 누적 분산량이 증가되는 중계 구간 수보다 많은 분포를 “long-tail S”로 명명했다. 또한 “normal S”와 비교하여 분산 맵 전체 중 앞부분과 뒷부분이 가운데 부분보다 짧은 경우, 즉 FHS에서 누적 분산량이 감소되는 중계 구간 수가 누적 분산량이 증가되는 중계 구간 수보다 적고 동시에 LHS에서도 누적 분산량이 감소되는 중계 구간 수가 누적 분산량이 증가되는 중계 구간 수보다 적은 분포를 “short-tail S”로 명명했다.

그림 1(b)의 inverse-S 분포 패밀리의 3가지 분산 맵은 그림 1(a)의 3가지 분산 맵 각각의 누적 분산 분포 모양이 상하 반전된 모양이 되기 때문에 “normal S”, “long-tailed S” 그리고



(a) "S-distribution" family



(b) "inverse-S-distribution" family

그림 1. 분산 맵
Fig. 1. Dispersion maps.

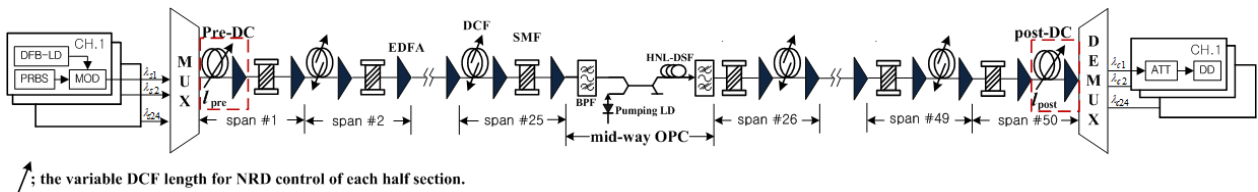


그림 2. 24x40 Gbps WDM 전송 시스템 구조
Fig. 2. Configuration of 24x40 Gbps WDM transmission system.

"short-tailed S"라고 명명했다.

그림 1(a)와 1(b) 각각의 분산 맵은 각 중계 구간의 RDPS를 통해 얻을 수 있다. "normal S"와 "normal S"는 FHS에서 1번을 제외한 나머지 24개 중계 구간 중 12개씩 동일 크기의 RDPS를 부호만 바꿔 적용하고, LHS에서는 50번을 제외한 나머지 24개 중계 구간 중 12개씩 동일 크기의 RDPS를 부호만 바꿔 적용해서 얻을 수 있다. 즉 2번부터 13번 중계 구간의 모든 12개 중계 구간에는 음의 RDPS를, 14번부터 25번 중계 구간의 모든 12개 중계 구간에는 동일 크기의 양의 RDPS를 적용하고, 26번부터 37번 중계 구간의 모든 12개 중계 구간에는 동일 크기의 양의 RDPS를, 38번부터 49번 중계 구간의 모든 12개 중계 구간에는 동일 크기의 음의 RDPS를 적용하면 "normal S"의 분산 맵을 얻을 수 있다. 반면 "normal S" 분포를 위해 적용한 RDPS의 부호를 반대로 적용하면 "normal S"의 분산 맵을 얻을 수 있다.

위와 같은 방법으로 FHS에서 1번을 제외한 나머지 24개 중계 구간 중 앞쪽의 16개, 뒤쪽의 8개 각각에 대해 RDPS의 부호를 다르게 적용하고, LHS에서 50번을 제외한 나머지 24개 중

간 구간 중 앞쪽의 8개, 뒤쪽의 16개 각각에 대해 RDPS의 부호를 다르게 적용하면 그림 1의 "long-tailed S"와 "long-tailed S" 분포를 얻을 수 있다. 반면 FHS에서 1번을 제외한 나머지 24개 중계 구간 중 앞쪽의 8개, 뒤쪽의 16개 각각에 대해 RDPS의 부호를 다르게 적용하고, LHS에서 50번을 제외한 나머지 24개 중계 구간 중 앞쪽의 16개, 뒤쪽의 8개 각각에 대해 RDPS의 부호를 다르게 적용하면 그림 1의 "short-tailed S"와 "short-tailed S" 분포를 얻을 수 있다.

그림 1에서 확인할 수 있듯이 분산 맵 분포가 원점 대칭이 되려면 OPC가 위치한 중간 지점에서 잉여 분산이 0 ps/nm가 되어야 한다. 그런데 "normal S"와 "normal S"를 제외한 나머지 4개 분포에서는 RDPS 부호가 동일하게 적용되는 중계 구간 수가 다르다. 즉 8개와 16개로 1:2(또는 2:1)의 관계를 갖는다. 따라서 부호뿐만 아니라 RDPS 크기도 1:2(또는 2:1)의 관계로 설정되어야 OPC가 위치한 중간 지점에서 잉여 분산이 0 ps/nm이 된다.

표 1. 적용된 RDPS (단위 : ps/nm)

Table 1. The applied RDPSs (unit : ps/nm)

section kinds	front FHS	rear FHS	front LHS	rear LHS
normal S type 1	-150	+150	+150	-150
normal S type 2	-800	+800	+800	-800
long-tailed S type 1	-100	+200	+200	-100
long-tailed S type 2	-600	+1200	+1200	-600
short-tailed S type 1	-200	+100	+100	-200
short-tailed S type 2	-1200	+600	+600	-1200

시뮬레이션 분석의 편이를 위해 각 전송 반 구획을 두 부분으로, 총 4 부분으로 나누었다. 이는 같은 부호와 크기의 RDPS가 적용되는 부분으로 각각 front FHS, rear FHS, front LHS와 rear LHS라고 부른다. “normal S”와 “normal S”에서 front FHS는 2번(#2)부터 13번(#13)까지의 중계 구간, rear FHS는 #14부터 #25까지의 중계 구간, front LHS는 #26부터 #37까지의 중계 구간, rear LHS는 #38부터 #49까지의 중계 구간이 각각 해당된다. 그리고 “long-tailed S”와 “long-tailed S”에서 front FHS는 #2부터 #17까지의 중계 구간, rear FHS는 #17부터 #25까지의 중계 구간, front LHS는 #26부터 #33까지의 중계 구간, rear LHS는 #34부터 #49까지의 중계 구간이 각각 해당된다. 반면 “short-tailed S”와 “short-tailed S”에서 front FHS는 #2부터 #9까지의 중계 구간, rear FHS는 #10부터 #25까지의 중계 구간, front LHS는 #26부터 #41까지의 중계 구간, rear LHS는 #42부터 #49까지의 중계 구간이 각각 해당된다.

표 1은 그림 1(a)의 세 종류 분산 맵을 위한 각 구간별로 적용된 RDPS를 정리한 것이다. 표 1에 표현된 모든 RDPS 값의 부호를 반대로 적용하면 그림 1(b)의 세 종류의 분산 맵을 얻을 수 있다. 각각의 분산 맵 분포에 있어 RDPS의 크기가 WDM 채널의 보상에 미치는 영향도 살펴보고자 각 경우마다 두 가지의 크기를 고려하였다. 각 분산 맵에서 크기가 다른 두 경우를 각각 type 1과 type 2로 구분하였다.

그림 2의 링크 구조에서 1번 중계 구간과 50번 중계 구간은 전체 잉여 분산 (NRD; net residual dispersion)을 조절하는 역할 (이를 DC (dispersion calibrator)라고 부름)을 수행하도록 설계하였다. 그림 2에서 50번 중계 구간의 DCF 길이, 즉 l_{post} 는 LHS의 NRD를 0 ps/nm가 되도록 고정시키고 FHS의 1번 중계 구간에서 DCF 길이, 즉 l_{pre} 만을 통해 전체 링크에서의 NRD를 조절하도록 하는 pre-DC과 1번 중계 구간의 DCF 길이, 즉 l_{pre} 는 FHS의 NRD를 0 ps/nm가 되도록 고정시키고 LHS의 50번 중계 구간에서 DCF 길이, 즉 l_{post} 만을 통해 전체 링크에서의 NRD를 조절하도록 하는 post-DC를 통해 NRD를 조절하도록 하였다.

그림 2에서 모든 SSMF의 길이(l_{SMF})는 80 km, 손실 계수(α_{SMF})는 0.2 dB/km로 비선형 계수 (γ_{SMF})는 1.35 W⁻¹km⁻¹ (@1,550 nm)로 설정하였다. 반면 DCF의 손실 계수 (α_{DCF})는 0.6 dB/km로 비선형 계수 (γ_{DCF})는 5.06 W⁻¹km⁻¹ (@1,550 nm)로 설정하였다.

그림 1의 24 채널 WDM 전송을 위한 송신기(Tx)들의 중심 파장은 100 GHz (즉 0.8 nm) 간격으로 1,550 nm부터 1,568.4 nm로 가정하였고, 그 광원은 분포 변환 레이저 다이오드 (DFB-LD; distributed feedback laser diode)로 가정하였다. 각 DFB-LD는 서로 독립적인 128(=2⁷) 의사 랜덤 비트열 (PRBS; pseudo random bit sequence)에 의해 소광비 (ER; extinction ratio)가 10 dB인 2차 가우시안 펄스의 RZ (return-to-zero)를 발생시키는 것으로 모델링하였다.

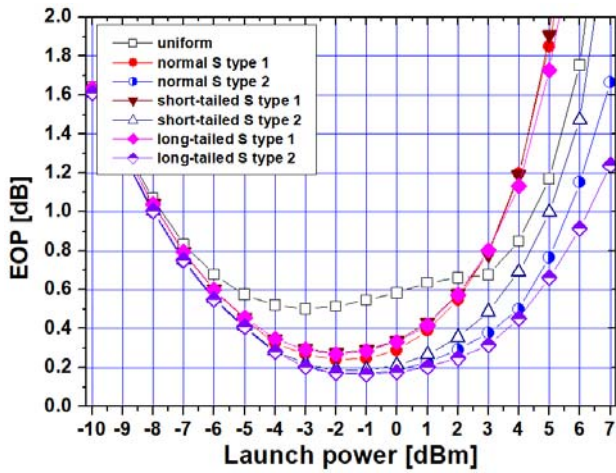
수신기는 5 dB의 잡음 지수를 갖는 전치 증폭기, 1 nm 대역폭의 광 필터, PIN 다이오드, 버터워스 형태의 펄스 정형 필터와 판별 회로로 구성된 직접 검파 (direct detection) 방식의 수신기로 모델링하였다. 수신 대역폭은 0.65 x 비트율로 가정하였다. 전체 전송로 중간에 위치한 OPC는 HNL-DSF (highly nonlinearity – dispersion shifted fiber)를 비선형 매질로 갖는 구조로 모델링하였고, 그 세부 구성과 파라미터 값은 저자의 DM 관련 논문과 동일하게 모델링하였다 [14]–[17].

광전송 링크를 통해 손실과 비선형 효과의 영향을 겪으면서 전파하는 각 채널들은 비선형 슈뢰딩거 방정식 (NLSE; nonlinear Schrödinger equation)에 의해 표현된다[18]. 본 논문에서 40 Gbps의 24 채널 WDM 전송을 위한 NLSE의 수치적 분석은 단계 분할 푸리에 (SSF; split-step Fourier) 기법[18]에 따라 Matlab으로 구현하여 이루어졌다.

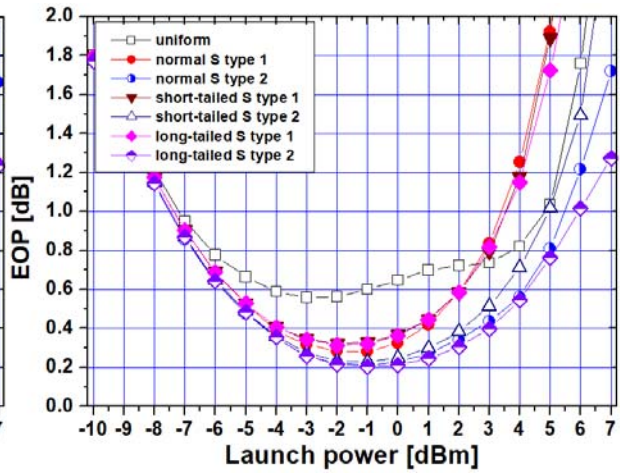
III. 시뮬레이션 결과 및 검토

앞선 관련 연구들을 통해 pre-DC로 NRD를 조절하는 경우 모든 채널을 최상으로 보상할 수 있는 최적의 NRD는 0 ps/nm가 아닌 10 ps/nm이고, post-DC로 조절하는 경우 최적 NRD는 -10 ps/nm인 것을 확인하였다. 그림 2의 WDM 시스템을 위한 그림 1의 분산 맵이 적용된 전송 링크에서도 동일한 결과가 얻어졌다. 그림 3은 그림 1과 같은 분산 맵이 각각 적용된 링크에 40 Gbps의 WDM 채널 24개를 전송시켰을 때 수신 성능이 최악인 채널의 눈 열림 페널티 (EOP; eye opening penalty)를 입사 전력에 따라 나타낸 것이다. 우선 입사 전력을 3 dBm 이하로 전송하면 모든 경우에 있어 RDPS 균일 분포 (그림 3에서 “uniform”)에 비해 보상 성능이 우수해지는 것을 알 수 있다. 균일 분포는 모든 중계 구간의 RDPS를 0 ps/nm로 일정하게 적용한 DM 링크를 의미한다. 즉 가장 단순한 DM 링크 구조보다 분산 맵을 S 분포나 inverse S 분포로 구성하면 전송 품질을 더욱 개선시킬 수 있는 것을 알 수 있다.

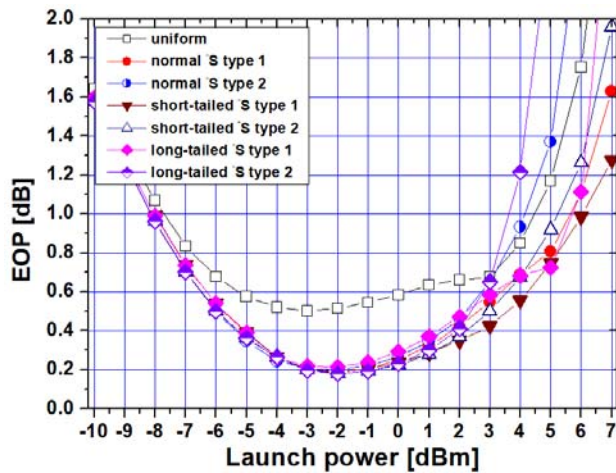
S 분포 패밀리는 pre-DC에 의해 NRD가 10 ps/nm로, post-DC에 의해 NRD가 -10 ps/nm로 설정된 링크에서 “long-tailed S type 2”, 즉 전체 전송로 중간에 있는 OPC 근처에서 누적 분산량이 큰 기율기로 증가하는 분산 맵을 갖는 DM 링크에서 가장 우수한 보상이 이루어지는 것을 그림 3(a)와 3(b)를 통해 확인할 수 있다. 반면 inverse-S 분포 패밀리는 pre-DC에 의해 NRD가 10 ps/nm로, post-DC에 의해 NRD가 -10 ps/nm로 설정된 링크에서 “short-tailed S type 1”, 즉 전체 전송로 중간에 있는 OPC 근처에서 누적



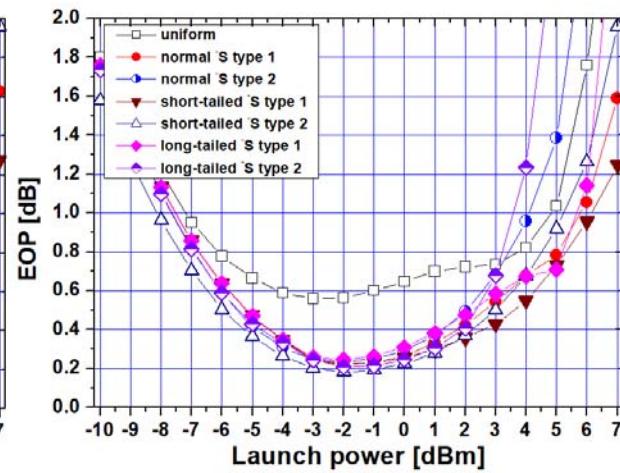
(a) Various S distributions : pre-DC



(b) Various S distributions : post-DC



(c) Various inverse-S distributions : pre-DC



(d) Various inverse-S distributions : post-DC

그림 3. 입사 전력에 따른 눈 열림 패널티

Fig. 3. Eye opening penalty as a function of launch power.

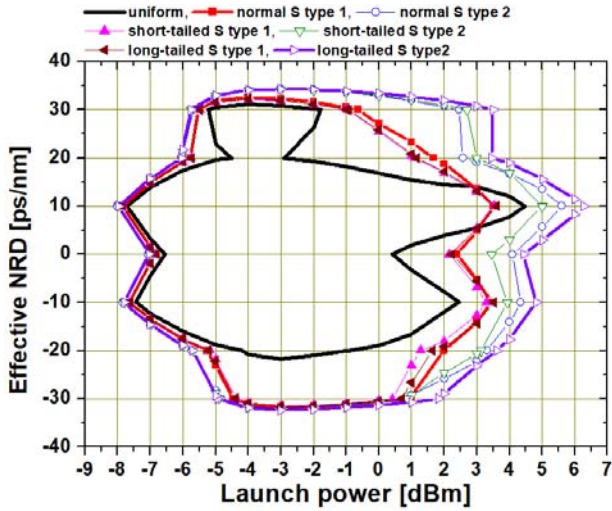
분산량이 완만한 기율기로 감소하는 분산 맵을 갖는 DM 링크에서 가장 우수한 보상이 이루어지는 것을 그림 3(c)와 3(d)를 통해 확인할 수 있다.

일반적으로 EOP로 광 신호 품질을 평가하는 경우 성능 기준으로 1 dB를 설정한다. 그 이유는 광통신 시스템에서 고품질 수신 성능 기준인 10^{-12} 비트 에러율 (BER ; bit error rate)에 상응하는 값이기 때문이다 [19]. 제안된 분산 맵을 갖는 링크를 통해 보상된 24개 채널을 위한 최상의 NRD는 ± 10 ps/nm이기는 하지만 그 외의 NRD에서도 WDM 채널의 EOP를 1 dB 이하로 할 수 있다. 1 dB 이하의 EOP를 얻을 수 있는 NRD의 최소값부터 최대값 범위를 유효 NRD 범위 (effective NRD range)로 정의하여 저자는 그동안의 연구에서 분석의 도구로 사용하였다. 그림 4(a)는 NRD 조절이 pre-DC에 의해 수행되는 링크에서 그림 1(a)에 나타난 S 분포 패밀리의 분산 맵 각각에 대한 유효 NRD 범위를 입사 전력에 따라 나타낸 것이다. 한편 그림 4(b)는 NRD 조절이 post-DC에 의해 수행되는 링크에서 그림 1(b)에 나타난 inverse-S 분포 패밀리의 분산 맵 각각에 대한 유효 NRD 범위를 입사 전력

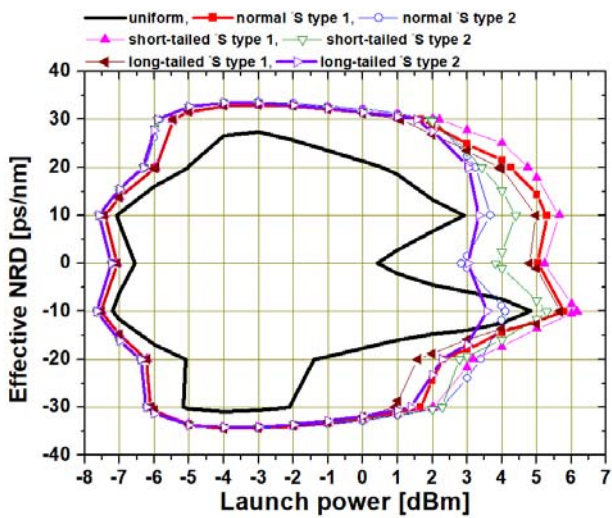
에 따라 나타낸 것이다.

그림 4를 살펴보면 유효 NRD 범위가 폐곡선의 형태를 띤다. 이 폐곡선의 면적이 넓을수록 DM 링크 설계 시 NRD와 입사 전력의 마진을 높일 수 있다. 이 유효 NRD 등고선의 면적을 정량적 지표로 사용하여 모든 경우에 대한 보상 성능을 분석할 수 있다. 유효 NRD 등고선 면적은 결국 NRD와 입사 전력의 곱 (product of NRD and launch power)이 되고, 그 결과를 그림 5에 나타냈다.

그림 5의 결과를 분석해보면, 본 연구에서 제안한 원점 대칭 분산 맵으로 설계된 DM 링크에 MSSl를 적용하면 균일 분포의 링크에서보다 NRD와 입사 전력의 곱이 증가하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 고려한 10가지의 분산 맵 구조들만 놓고 분석해보면, 우선 S 분포 패밀리 중에서는 long-tailed S type 2의 분산 맵을 적용한 링크에서, 반면 inverse-S 분포 패밀리 중에서는 short-tailed S type 1의 분산 맵을 적용한 링크에서 NRD와 입사 전력의 곱이 가장 크다는 것을 확인할 수 있다.



(a) Various S distributions : pre-DC



(b) Various inverse-S distributions : post-DC

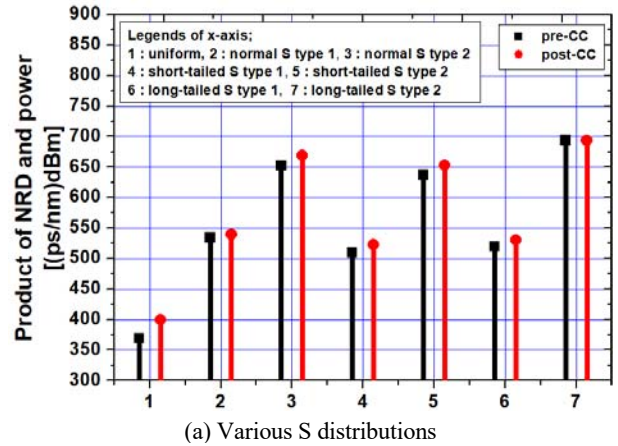
그림 4. 입사 전력에 따른 유효 NRD

Fig. 4. Effective NRDs as a function of launch power.

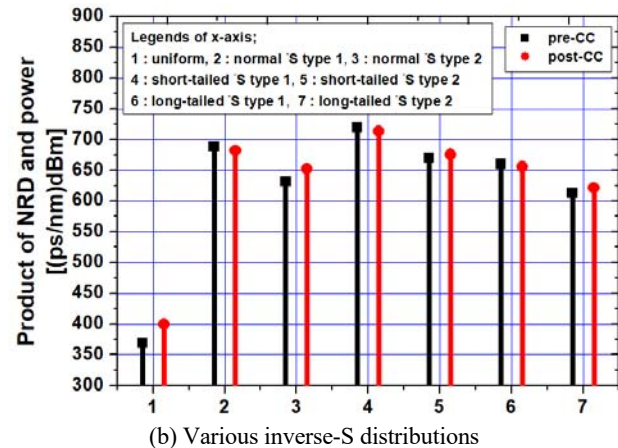
하지만 전반적으로 S 분포 패밀리의 분산 맵보다 inverse-S 분포 패밀리의 분산 맵이 선택된 RDPS의 크기와 크게 상관없이 WDM 채널의 보상에 유리하다는 것을 알 수 있다. 또한 각 분산 맵에 적용한 RDPS 크기가 보상에 미치는 영향을 살펴보면 S 분포 패밀리의 분산 맵에서는 RDPS가 큰 경우에서, 반면 inverse-S 분포 패밀리의 분산 맵에서는 RDPS가 적은 경우에서 NRD와 입사 전력의 곱이 조금은 개선되는 것을 알 수 있다.

IV. 결론

색 분산과 비선형 Kerr 효과에 의해 왜곡되는 40 Gbps × 24 채널 WDM 신호의 보상을 위해 OPC가 적용된 분산 제어 링크에서 다양한 형태의 원점 대칭 구조의 분산 맵을 제안하고 그 보상 특성을 살펴보았다.



(a) Various S distributions



(b) Various inverse-S distributions

그림 5. NRD와 입사 전력의 곱

Fig. 5. The product of NRD and launch power.

시뮬레이션을 통해 제안하는 모든 원점 대칭 분산 맵이 적용된 링크에서의 보상 특성이 균일 분포, 즉 직선 형태의 전통적인 분산 맵의 링크에서의 보상 특성보다 우수한 것을 확인하였다. 특히 S 분포 패밀리의 경우는 OPC를 근처의 누적 분산량이 크게 변화하는 형태가 우수하고, inverse-S 분포 패밀리의 경우는 OPC를 근처의 누적 분산량이 완만하게 변화하는 형태가 우수하다는 것을 확인하였다. 그리고 S 분포 패밀리의 분산 맵을 만드는 RDPS가 큰 경우에서, inverse-S 분포 패밀리의 분산 맵에서는 RDPS가 적은 경우에서 NRD와 입사 전력의 곱이 다소 개선되어 유연한 네트워크 구조를 설계하는데 유리하다는 것을 알 수 있었다.

References

- [1] A. Al-Hayder, *et al.*, "Transmitting audio via fiber optics under nonlinear effects and optimized tuning parameters based on co-simulation of MATLAB and OptiSystem™," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, Vol. 10, No. 3, pp. 3253-3260, June 2020.

- [2] S. Waiyapot, S. K. Turitsyn, and V. K. Mezentsev, "Optical regeneration at 40 Gb/s in dispersion-managed transmission lines with in-line synchronous modulators," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 20, No. 12, pp. 2220-2228, Dec. 2002.
- [3] X. Liu, Y. Qiao, and Y. Ji, "Reduction of the fiber nonlinearity impairment using optical phase conjugation in 40 Gb/s CO-OFDM systems," *Optics Communications*, Vol. 283, pp. 2749-2753, 2010.
- [4] M. D. Pelusi, "WDM signal all-optical precompensation of Kerr nonlinearity in dispersion-managed fibers," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 25, No. 1, pp. 71-74, 2013.
- [5] D. Rafique, J. Zhao, and A. D. Ellis, "Digital back-propagation for spectrally efficient WDM 112 Gbit/s PM QAM transmission," *Optics Express*, Vol. 19, No. 6, pp. 5219-5224, 2011.
- [6] E. Ip and J. M. Kahn, "Compensation of dispersion and nonlinear impairments using digital backpropagation," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 26, No. 20, pp. 3416-3425, 2008.
- [7] X. Liu, A. R. Chraplyvy, P. J. Winzer, R. W. Tkach, and S. Chandrasekhar, "Phase-conjugated twin waves for communication beyond the Kerr nonlinearity limit," *Nature Photonics*, Vol. 7, No. 7, pp. 560-568, 2013.
- [8] S. L. I. Olsson, B. Corcoran, C. Lundström, T. A. Eriksson, M. Karlsson, and P. A. Andrekson, "Phase-sensitive amplified transmission links for improved sensitivity and nonlinearity tolerance," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 33, No. 3, pp. 710-721, 2015.
- [9] A. Hasegawa, "Soliton-based optical communications: an overview," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 6, Issue 6, pp. 1161-1172, 2000.
- [10] H. Hu, R. M. Jopson, A. H. Gnauck, S. Randel, and S. Chandrasekhar, "Fiber nonlinearity mitigation of WDM-PDM QPSK/16-QAM signals using fiber-optic parametric amplifiers based multiple optical phase conjugations," *Optics Express*, Vol. 25, No. 3, pp. 1618-1628, Feb. 2017.
- [11] M. Morshed, L. B. Du, and A. J. Lowery, "Mid-span spectral inversion for coherent optical OFDM systems: fundamental limits to performance," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 31, No. 1, pp. 58-66, Jan. 2013.
- [12] M. Morshed, L. B. Du, B. Foo, M. D. Pelusi, B. Corcoran, and A. J. Lowery, "Experimental demonstrations of dual polarization CO-OFDM using mid-span spectral inversion for nonlinearity compensation," *Optics Express*, Vol. 22, No. 9, pp. 10455-10466, 2014.
- [13] I. Sackey, F. Da Ros, J. K. Fischer, T. Richter, M. Jazayerifar, C. Peucheret, K. Petermann, and C. Schubert, "Kerr nonlinearity mitigation: mid-link spectral inversion versus digital backpropagation in 5×28-Gbps PDM 16-QAM signal transmission," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 33, No. 9, pp. 1821-1827, May 2015.
- [14] S. R. Lee, "Dispersion-managed optical links combined with asymmetrical optical phase conjugation for compensating for distorted WDM signals," *Journal of Information and Communication Convergence Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 71-77, Jun. 2016.
- [15] H. B. Yim and S. Real Lee, "Compensation for the distorted WDM signals through dispersion-managed optical links combined with non-midway optical phase conjugation," *International Journal of Control and Automation*, Vol. 11, No. 9, pp. 1-10, 2018.
- [16] S. R. Lee, "Dispersion-managed optical transmission link adding of non-midway OPC," *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 24, No. 5, pp. 408-414, Oct. 2020.
- [17] J. P. Chung and S. R. Lee, "Symmetric-type dispersion maps in dispersion-managed optical link with mid-span spectral inversion," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, Vol. 20, No. 1, pp. 222-230, Oct. 2020.
- [18] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, 3rd ed. San Francisco:CA, Academic Press, 2001.
- [19] N. Kikuchi and S. Sasaki, "Analytical evaluation technique of self-phase modulation effect on the performance of cascaded optical amplifier systems," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 13, No. 5, pp. 868-878, 1995.



이 성 렬 (Seong-Real Lee)

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