

MSSI와 결합된 분산 제어 링크에서 RZ 펄스의 소광비에 따른 보상 특성

Compensation Characteristics Depending on Extinction Ratio of RZ Pulse in Dispersion-managed Link Combined with MSSI

이성렬
목포해양대학교 항해정보시스템학부

Seong-Real Lee

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

[요 약]

전체 전송 거리의 중간에서 위상 공역파로 반전시키는 MSSI (mid-span spectral inversion)을 분산 제어 링크에 결합시키면 색 분산과 비선형 효과에 의한 파장 분할 다중 (WDM; wavelength division multiplexed) 신호의 왜곡 보상에 매우 효과적이다. 이러한 MSSI 결합 분산 제어 링크에서 분산 맵의 모양, 채널의 데이터율, 채널 파장과 파장 간격 등은 보상 정도에 영향을 미치고, 결과적으로 WDM 신호의 전송 거리와 용량을 결정하게 한다. 본 논문에서는 MSSI 결합 분산 제어 링크에서 WDM 신호를 구성하는 RZ (return-to-zero) 펄스의 소광비에 따른 보상 특성을 분석하였다. 시뮬레이션 결과 소광비가 커질수록 '1'과 '0' 신호의 전력 차이가 증가하여 수신 성능이 좋아지는 일반적인 광전송 시스템에서의 결과가 아닌 분산 맵의 형태와 분산 맵의 구체적 모양을 결정하는 광섬유 스패 당 잉여 분산의 크기에 따라 최상의 보상을 얻을 수 있는 소광비가 결정되어야 한다는 것을 알 수 있었다.

[Abstract]

When mid-span spectral inversion (MSSI), which inverts the propagated wave into phase-conjugated wave in the middle of the entire transmission distance, is combined with dispersion-managed link, it is very effective in compensating for the wavelength division multiplexed (WDM) signal distortion due to chromatic dispersion and nonlinear effects. In this MSSI combined dispersion-managed link, the shape of the dispersion map, channel data rate, channel wavelength and wavelength spacing, etc. affect the compensation and, consequently, determine the transmission distance and capacity of the WDM signal. In this paper, the compensation according to the extinction ratio of the return-to-zero (RZ) pulse that constitutes the WDM signal in the MSSI combined distributed control link was numerically analyzed. As a result of the simulation, it was conformed that the extinction ratio to obtain the best compensation should be determined depending on the shape of the dispersion map and the size of the residual dispersion per span, which determines the specific shape of the dispersion map. These results show a significant difference from the results in a general optical transmission system, where as the extinction ratio increases, the power difference between the '1' and '0' signals increases, thereby improving reception performance.

Key word : Dispersion-management, Extinction ratio, Mid-span spectral inversion, Residual dispersion per span, WDM.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2024.28.1.123>



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 9 January 2024; Revised 20 January 2024
Accepted (Publication) 24 January 2024 (29 February 2024)

*Corresponding Author; Seong-Real Lee

Tel: +82-61-240-7264

E-mail: reallee@mmu.ac.kr

I. 서 론

단일 모드 광섬유 (SMF; single mode fiber) 기반의 디지털 광통신 시스템에서 광 펄스 폭을 시간 영역에서 퍼지게 하는 색 분산 (chromatic dispersion)과 비선형 Kerr 효과 (nonlinear Kerr effect)는 전송 용량과 전송 거리를 제한하는 주요 요인이다 [1]. 이러한 현상과 효과를 극복하기 위해 제안된 많은 기술들 중에 분산 제어 (DM; dispersion management)와 MSSI (mid-span spectral inversion), 그리고 이 둘을 결합해 전송 링크에 적용한 기술은 장거리 1 Tb/p급 파장 분할 다중 (WDM; wavelength division multiplexing) 전송에 매우 효과적이다 [2]-[5].

분산 제어는 전송 링크의 누적 분산량을 영에 가깝게 (near-zero) 하기 위해 SMF와 반대되는 분산 계수를 가지는 분산 보상 광섬유 (DCF; dispersion-compensating fiber)를 부가적으로 삽입하는 링크 설계 기술이다. 비선형 왜곡 보상 효과가 있는 MSSI는 전체 전송로 중간에 위치한 광 위상 공액기 (OPC; optical phase conjugator)가 왜곡되어 도달한 신호에 대해 공액 변환한 후 나머지 구간을 전송시키면 원래 신호와 흡사한 수신 신호를 얻을 수 있는 기술이다.

분산 제어만을 링크에 적용하는 경우 비선형 왜곡 보상이 어렵다는 단점과 MSSI를 통한 보상은 광 신호의 파장에 의존하여 광대역 신호인 WDM 전송에서 모든 채널에 대해 균일한 효과를 얻을 수 없다는 한계는 이 두 방식의 결합을 통해 해결될 수 있다는 것을 선행 연구를 통해 보였다 [6]-[9].

분산 제어 링크, 또는 MSSI가 결합된 분산 제어 링크를 통해 WDM 신호에 대한 왜곡 보상에 영향을 미치는 광 신호 차원의 요소는 채널 파장, 채널 간격, 신호 전력, 특히 신호 형식 등이 있다. 저자는 그동안의 연구를 통해 각 요소에 대한 960 Gb/s WDM 신호에 대한 왜곡 보상 특성에 대해 분석하였다. 하지만 WDM 각 채널의 신호 형식에 있어 고려되는 성분 중 소광비 (ER; extinction ratio)에 대한 보상 효과는 분석해 보지 못했다. 따라서 본 연구에서는 기존 연구에서 분석 대상으로 삼았던 RZ(return-to-zero) 형식의 40 Gb/s의 24개 WDM 채널을 MSSI가 결합된 분산 제어 링크를 통해 전송하는 경우 각 RZ 신호의 소광비에 따른 보상 특성을 분석해 보고자 한다.

II. 시뮬레이션을 위한 분산 제어 링크 모델링

그림 1은 본 연구에서 모델링한 960 Gb/s WDM 시스템과 MSSI가 결합된 총 50개의 광섬유 스펠 (fiber span)으로 구성된 분산 제어 링크의 구조를 나타낸 것이다. 각 광섬유 스펠은 midway-OPC 이전의 전반 구획 (FHS; former half section)에서는 SMF 앞에 DCF가 오고, 후반 구획 (LHS; latter half section)에서는 SMF 뒤에 DCF가 오도록 구성하였다. 이는 저자의 여타 논문들에서 확인되었던 최선의 보상을 위해 필요한 midway-OPC를 중심으로 한 분산 프로파일의 대칭성을 확보

표 1. 광섬유 파라미터

Table 1. Fiber parameters.

Parameters	SMF	DCF
Length	80 km	Variable
Attenuation coefficient	0.2 dB/km	0.6 dB/km
Dispersion coefficient	17 ps/nm/km	-100 ps/nm/km
Dispersion slope	0.07 ps/nm ² /km	0.09 ps/nm ² /km
Nonlinear coefficient	1.35 W ⁻¹ km ⁻¹	5.06 W ⁻¹ km ⁻¹

하기 위한 배열이다. 각 광섬유 스펠을 구성하는 SMF와 DCF의 주요 파라미터와 그 값은 표 1에 정리했다.

표 1에서 DCF의 길이가 ‘가변(variable)’인 것은 그림 2에 보인 분산 맵 (dispersion map)의 전체적 모양과 관계가 있기 때문이다. 좀 더 구체적으로 설명하면 그림 2의 분산 맵의 전체적 형태, 즉 분산 프로파일은 각 광섬유 스펠의 잉여 분산량인 RDPS (residual dispersion per span)의 부호와 크기에 의해 결정된다. 표 1을 통해 알 수 있듯이, 본 논문에서 모든 광섬유 스펠에서 SMF 길이와 분산 계수를 각각 80 km와 17 ps/nm/km로 설정했기 때문에 DCF의 분산 계수가 -100 ps/nm/km인 경우 DCF 길이가 13.6km일 때 각 광섬유 스펠의 RDPS는 0 ps/nm가 된다. 하지만 DCF 길이가 13.6 km보다 작으면 RDPS는 양, 또는 13.6 km보다 크면 음이 된다. FHS를 구성하는 광섬유 스펠들 중 2번 스펠부터 13번 스펠까지의 RDPS를 모두 일정한 크기의 양의 값이 되게 하고, 14번 스펠부터 25번 스펠까지는 같은 크기의 음의 값이 되도록 한 반면, LHS에서의 RDPS 부호와 크기를 FHS와는 반대로 할당하면 그림 2에서 ‘S⁻¹ 형태’의 분산 맵을 구성할 수 있다. 한편 광섬유 스펠의 RDPS의 부호를 ‘S⁻¹ 형태’와 반대로 하면 ‘S 형태’의 분산 맵을 얻을 수 있다.

본 논문의 목적인 WDM 채널 신호인 RZ 파형의 소광비에 따른 보상 특성은 그림 2에 보인 2개의 분산 맵의 영향과 각 분산 맵의 전체적 분산 프로파일을 결정하는 RDPS의 크기의 영향, 즉 분산 프로파일의 기울기의 영향을 분석해서 이루어진다. 본 논문에서 RDPS는 130 ps/nm부터 1300 ps/nm까지 (130 ps/nm 간격) 고려했다.

WDM 채널들의 왜곡 보상에 영향을 미치는 분산 제어 링크의 설계 파라미터로는 RDPS 외에 전체 잉여 분산 (NRD; net residual dispersion)도 있다. 이는 각 광섬유 스펠마다 누적되거나 제거된 각각의 분산을 전송 링크 전체에 걸쳐 더한 값으로 정의된다. 본 연구에서 살펴보는 그림 2의 분산 맵의 기본 설계 방향은 FHS와 LHS 모두 중간 지점까지는 누적 분산 프로파일이 증가/감소하는 반면 나머지 구간에서는 반대로 감소/증가하는 구조로 하였기 때문에 결과적으로 NRD는 0 ps/nm가 된다. 하지만 최상의 왜곡 보상을 얻을 수 있는 NRD는 0 ps/nm가 아닌 그 근처의 다른 값으로 설정되어야 한다 [10]. 이것은 NRD를 0 ps/nm를 포함한 다른 값으로 설정해 주어야 한다는 것을 의미한다. 본 연구에서는 첫 번째 광섬유 스펠의 DCF가 이러한 역할을 수행하도록 하였다.

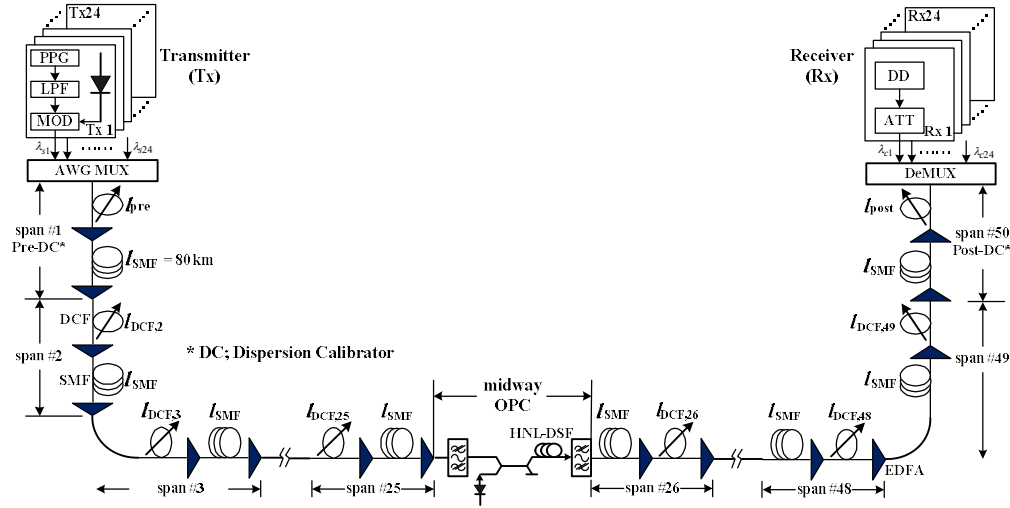


그림 1. 분산 제어 링크와 WDM 시스템의 구조
 Fig. 1. Configuration of dispersion-managed link and WDM system.

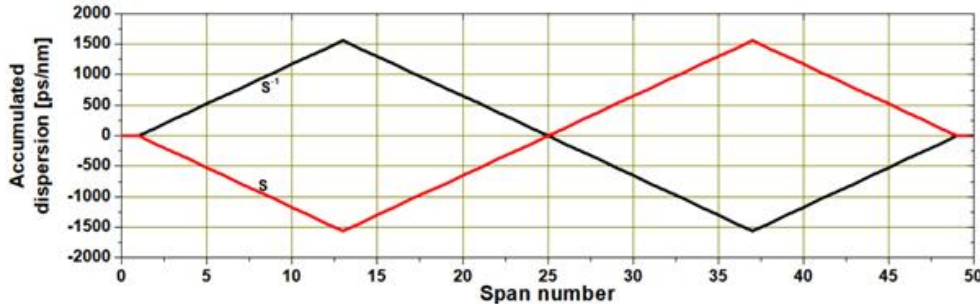


그림 2. 분산 맵
 Fig. 2. Dispersion maps.

III. WDM 시스템과 RZ 신호 모델링

그림 1에 표현한 24개의 송신기(Tx)는 각각 독립적인 40 Gb/s 127(=2⁷-1) 의사 랜덤 비트 시퀀스 (PRBS; pseudo-random bit sequence)를 생성하고 이 PRBS는 DFLD (distributed feedback laser diode)를 통해 강도 변조 (IM; intensity modulation) 되어 RZ 신호를 만들도록 하였다. RZ 형식의 출력 전기장은 다음과 같이 2차 슈퍼 가우스 펄스로 가정했다.

$$U(0, T) = \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{2m} \right], \quad (1)$$

여기서, T_0 는 최대 광 강도(intensity)의 1/e-지점이 되는 폭이고, m 은 슈퍼 가우스 펄스의 정도입니다. m 은 슈퍼 가우스 펄스의 모양을 결정하는 값으로 본 논문에서는 2로 설정했다. 또한 식 (1)의 RZ 펄스의 duty cycle은 0.5로, 주파수 처프(chirp)는 0으로 가정했다.

식 (1)에서 j 번째 채널의 펄스 포락선 진폭 (pulse envelope amplitude) $A_j(z, T)$ 는 아래 식 (2)와 같고, 여기서 P 는 피크 전력이다.

$$A_j(z, T) = \sqrt{P} \exp \left(-\alpha \frac{z}{2} \right) U(z, T) \quad (2)$$

식 (2)에서 P 는 비트 ‘1’과 ‘0’에 따라 값을 달리 해야 하는데 소광비, ER은 아래 식 (3)과 같이 ‘1’과 ‘0’의 광 출력 비율을 의미한다.

$$ER = \frac{P_1}{P_0}, \quad (3)$$

여기서, P_1 과 P_0 는 각각 ‘1’과 ‘0’의 광 피크 출력이다. ER의 로그 형식은 $ER(\text{dB}) = 10 \log_{10} ER$ 로, 본 연구에서는 ER을 5 dB부터 20 dB까지 (2.5 dB 간격) 고려하였다.

그림 1의 midway OPC를 포함한 분산 제어 링크를 전파해 온 WDM 채널들은 직접 검파 (DD; direct detection) 방식에 의해 복원되도록 모델링하였다. 또한 midway OPC는 HNL-DSF (highly nonlinear - dispersion shifted fiber)를 통해 공역파를 발생시키도록 하였다. WDM 송신기, 수신기, 그리고 OPC의 주요 파라미터는 저자의 앞선 논문들과 동일하게 설정하였다.

IV. 성능 평가 방법

광 전송 링크를 통해 손실과 비선형 효과의 영향을 겪으면서 전파하는 각 채널들은 비선형 슈뢰딩거 방정식 (NLSE; nonlinear Schrödinger equation)에 의해 표현된다[11]. 본 논문에서 40 Gb/s의 24 채널 WDM 전송을 위한 NLSE의 수치적 시뮬레이션은 단계 분할 푸리에 (SSF; split-step Fourier) 기법[11]에 따라 Matlab으로 구현하여 수행되었다.

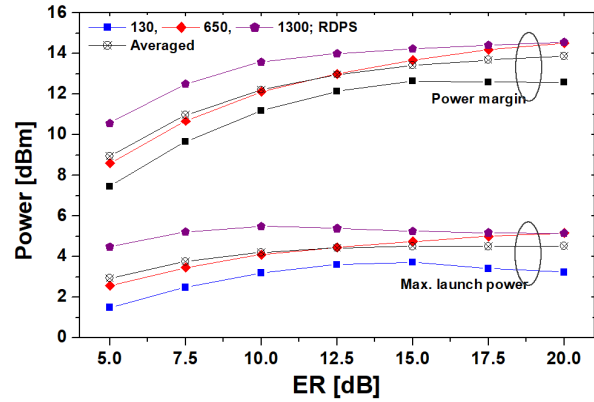
WDM 각 채널의 보상 성능 평가는 수신 광 신호의 아이 다이어그램 (eye diagram) 기반으로 이루어졌다. 즉 24개 채널들 중 수신 성능이 가장 안 좋은 채널의 아이 다이어그램으로부터 눈 열림 패널티 (EOP; eye opening penalty)를 측정하여 평가하였다. 수신 신호의 보상 품질을 평가하는 기준값은 EOP에 대해서는 1-dB로 하였다. 여기서 1-dB EOP는 10^{-12} 의 비트 에러율 (BER; bit error rate)에 상응하는 값이다.

V. 시뮬레이션 결과 및 검토

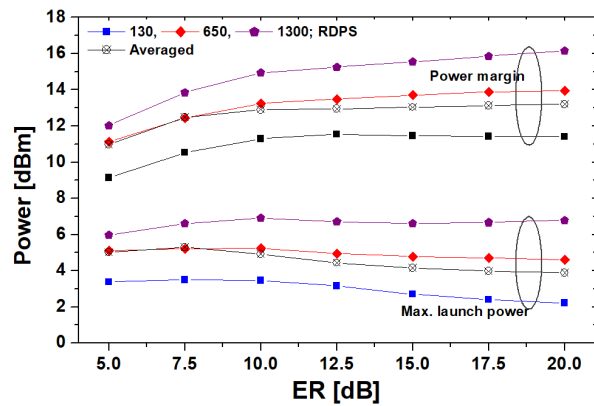
그림 3은 RDPS의 크기가 130, 260, 1300 ps/nm로 설정된 그림 2의 분산 맵이 적용된 분산 제어 링크를 통해 WDM 채널 신호인 RZ 펄스를 전송시켰을 때 RZ 펄스의 소광비에 따른 최대 입사 전력과 전력 마진 (margin)을 나타낸 것이다. 좀 더 구체적으로 설명하면 그림 3은 24개 채널 중 보상 성능이 가장 안 좋은 최악 채널의 1-dB EOP가 되는 최대 입사 전력과 이 전력에서 최소 입사 전력을 뺀 전력 마진을 구한 결과를 나타낸 것이다. 또한 그림 3의 결과들은 모두 분산 제어 링크의 NRD가 10 ps/nm로 설정된 경우에서 얻은 것이다. 그림 3(a)는 그림 2의 S 모양과 S⁻¹ 모양의 분산 맵에서의 보상 특성을 비교하기 위한 대상으로 전통적 분산 맵 (conventional dispersion map)이 적용된 경우의 결과이다. 전통적 분산 맵은 모든 광섬유 스패의 RDPS를 0 ps/nm로 균일하게 분포시킨 구조를 말한다.

식 (2)와 (3)을 통해 알 수 있듯이 일반적으로 RZ 펄스의 소광비가 커질수록 ‘1’과 ‘0’의 구분이 명확해지기 때문에 수신 성능이 더욱 개선될 수 있을 것으로 예상된다. 하지만 그림 3의 결과들을 살펴보면 NRD = 10 ps/nm로 설정된 경우 ER이 크다고 보상 특성이 좋아지는 것이 아니라는 것을 확인할 수 있다. 그림 3을 살펴보면 S⁻¹ 분산 맵에서는 ER이 10 dB인 광 펄스 전송 시 가장 우수한 보상이 이루어지는 것을 알 수 있고, 또한 S 분산 맵에서도 ER이 10 dB를 기준으로 그 이상 증가시켜도 보상 효과가 크게 개선되지 않는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 RZ 펄스의 ER을 증가시키는 것은 변조기 설계만 어렵게 할 뿐이며, 최상의 보상을 위해서는 분산 맵 형태와 이의 프로파일을 결정하는 RDPS 등에 따라 최적의 ER을 선택해야 한다는 것을 시사한다고 하겠다.

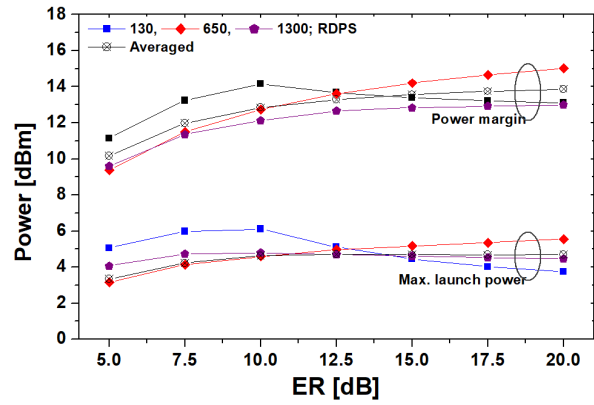
그림 4는 그림 3의 결과를 좀 더 세부적으로 분석하기 위한 것으로 동일한 조건에서 전통적 분산 맵에서의 전력 마진에 대한 S 분산 맵과 S⁻¹ 분산 맵 각각에서의 전력 마진 차이를 RDPS



(a) conventional



(b) S-shape



(c) S⁻¹-shape

그림 3. 최악 채널의 최대 입사 전력과 전력 마진

Fig. 3. Maximum launch power and power margin of the worst channel.

변화에 따라 구한 것이다. 우선 두 구조에서의 전력 마진이 서로 반대 특성으로 나타나는 것을 알 수 있다. 즉 S 분산 맵에서는 RDPS가 1300 ps/nm인 경우 광 펄스의 ER에 관계없이 전통적 구조에서의 전력 마진보다 개선된 결과를 얻을 수 있는 반면에 S⁻¹ 분산 맵에서는 RDPS가 130 ps/nm인 경우 광 펄스의 ER에 관계없이 전통적 구조에서의 전력 마진보다 개선된 결과를 얻을 수 있다. 고려한 모든 RDPS에 대해서는 S 분산 맵에서 광 펄스의 ER을 5 dB로 한 경우에 대해서는 RDPS 값에 상관

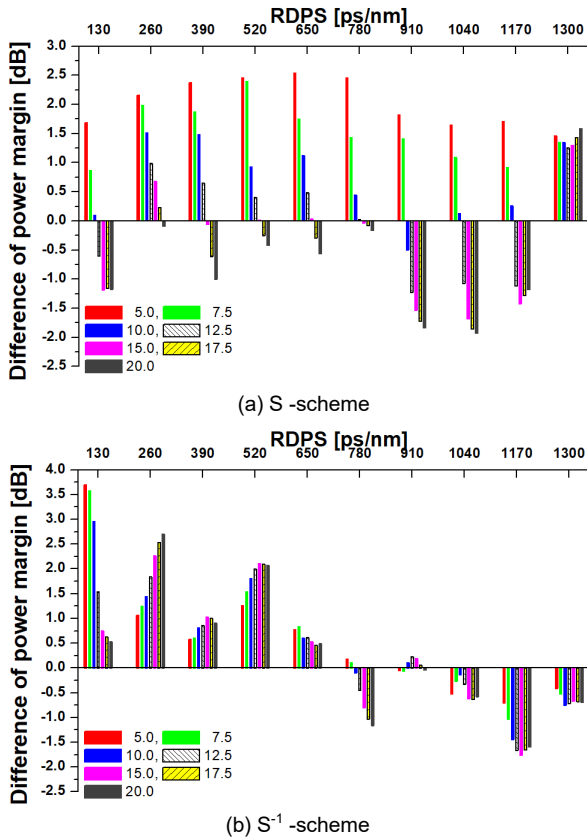


그림 4. 전력 마진의 차이
Fig. 4. Difference of power margin.

없이 전통적 구조에서의 전력 마진보다 개선된 결과를 얻을 수 있고, S⁻¹ 분산 맵에서는 RDPS를 적은 값으로 설정한 경우에 대해 광 펄스의 ER에 상관없이 전통적 구조에서의 전력 마진보다 개선된 결과를 얻을 수 있는 것을 확인할 수 있다.

저자의 다른 연구 결과와 마찬가지로 분산 제어 링크의 NRD가 10 ps/nm 외의 다른 값을 가져도 1-dB EOP를 얻을 수 있는 입사 전력이 존재한다. 즉 NRD가 10 ps/nm가 아닌 다른 값으로 변화되더라도 1-dB EOP를 얻을 수 있는 입사 전력이 줄기는 하지만 존재한다. 일반적으로 NRD가 10 ps/nm보다 커지거나 작아지면 1-dB EOP를 얻을 수 있는 입사 전력은 적어지게 되어 결과적으로 임의의 NRD에 대한 1-dB EOP를 만드는 입사 전력을 연결하면 폐곡면을 얻을 수 있다. 이 폐곡면의 면적을 성능 면에서 정의하면 유효 입사 전력과 NRD의 곱 (product of effective power and NRD)이 된다. 이 유효 입사 전력 NRD의 곱 (이하 ‘곱’으로 표현함)이 커질수록 해당 분산 맵을 적용했을 때 고품질 보상이 이루어지는 WDM 채널의 입사 전력과 분산 제어 링크의 NRD의 허용폭이 증가하게 된다.

그림 5는 RDPS의 크기가 260, 650, 그리고 1300 ps/nm로 선택되어 구성된 S와 S⁻¹ 분산 맵을 적용한 경우에서 얻은 유효 입사 전력 NRD의 곱을 전통적 분산 맵에서의 유효 입사 전력 NRD의 곱에 대한 차이를 RZ 펄스의 ER에 따라 구한 것이다. 앞서의 그림 4에서의 결과와 마찬가지로 유효 입사 전력 NRD

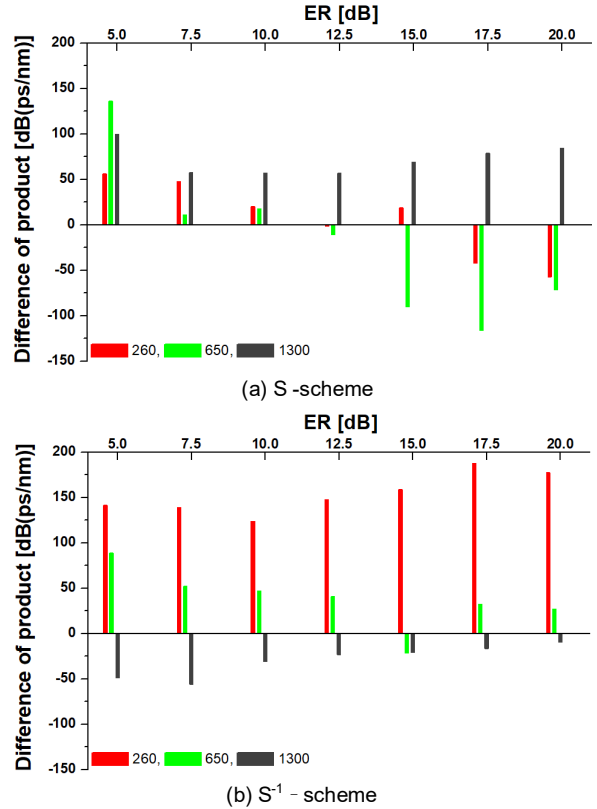


그림 5. 입사 전력과 유효 NRD의 곱의 차이
Fig. 5. Difference of product.

의 곱이 분산 맵의 모양에 따라 서로 반대 특성으로 나타나는 것을 알 수 있다. 즉 분산 맵을 구성하는 RDPS가 비교적 적은 구조에서는 S⁻¹ 형태가, RDPS가 크게 설정된 구조에서는 S 형태가 NRD와 입사 전력 면에서 융통성 확보에 유리하다는 것을 확인할 수 있다.

그림 5로부터 확인할 수 있는 중요한 사실은 그림 2의 분산 맵들을 통해 보상하는데 있어 ER이 5 dB로 가장 작은 RZ 신호 전송에서 RDPS의 크기와 구체적 분산 맵 모양에 큰 영향을 받지 않으면서 전통적 분산 맵 대비 성능 개선 효과가 가장 우수하게 나타난다는 것이다. 앞서 언급했듯이 ER을 작게 하면 할수록 ‘1’과 ‘0’의 광 전력 차이가 더욱 적어져 수신 성능이 저하되는 것이 일반적이지만 본 논문에서 제안한 분산 맵들은 이러한 일반적 특성을 극복할 수 있는 구조라고 판단할 수 있다. 즉 RDPS의 크기와 관계되기는 하지만 그림 2의 분산 맵은 전통적 분산 맵에 비해 ER이 작은 RZ 펄스의 왜곡 보상에도 효과적이라는 것을 확인할 수 있다.

VI. 결론

지금까지 MSSI가 결합된 분산 제어 링크를 통해 960 Gb/s WDM 신호의 왜곡을 보상하는데 있어 WDM 각 채널들 전송 부호인 RZ 펄스의 소광비에 따른 보상 특성을 살펴보았다. 일

반적으로 펄스의 소광비가 클수록 '1'과 '0'의 명확한 구분이 이루어져서 수신 성능이 좋아지지만 본 논문에서 고려한 두 가지의 분산 맵을 적용한 전송 링크를 통해서선 선택된 RDPS 크기와 그로부터 형성되는 분산 맵 구조에 따라 최상의 보상을 얻을 수 있는 소광비가 결정되는 것을 확인할 수 있었다.

아울러 분산 제어 링크의 유효 입사 전력 NRD 값을 통한 융통성 확보 면에서 살펴본 결과에서는 본 논문에서 고려한 소광비 중 가장 작은 값인 5 dB 소광비의 RZ 신호에 대한 보상 효과가 전통적 분산 맵에서의 보상에 비해 크게 개선되는 것을 알 수 있었다.

본 논문에서 다룬 RZ 펄스의 소광비에 따른 MSSSI와 분산 제어 링크에서의 보상 특성 분석 결과는 향후 WDM 채널들의 장거리 전송 링크 설계의 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대하고 있다.

REFERENCES

- [1] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 3rd ed. New York:NY, Jhon Wiley & Sons Inc., 2002.
- [2] W. Cao, "Improved compensation of intrachannel four-wave mixing in dispersion-managed transmission links with mid-span optical phase conjugation," *Optics Communications*, Vol. 530, Online publication, Paper number 129185, 2023.
- [3] M. Suzuki, "Dispersion managed solitons and their application to high-capacity optical submarine cable systems," *Optik*, Vol. 280, Online publication, Paper number 170771, June 2023.
- [4] H. J. Abd, S. A. Gitaffa, and M. G. Al-Hamiri, "Impact of optimized pulse shaping on optical transmission performance in the availability of different dispersion maps," *Optik*, Vol. 241, Online publication, Paper number 167006, Sept. 2021.
- [5] P. Minzioni and A. Schiffrini, "Unifying theory of compensation techniques for intrachannel nonlinear effects," *Optics Express*, Vol. 13, Issue 21, pp. 8460-8468, 2005.
- [6] S.-R. Lee, "MSSI system with dispersion-managed link configured with random-inverse dispersion maps," *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 27, No. 4, pp. 457-462, Aug. 2023.
- [7] J.-P. Chung and S.-R. Lee, "Compensation of the distorted WDM signals by symmetric dispersion map with nonuniform zero-crossing place of accumulated dispersion in midway-OPC system," *Applied Sciences*, Vol. 13, Online publication, Paper number 10456, Sept. 2023.
- [8] J.-P. Chung and S.-R. Lee, "Dispersion-managed optical link configured antipodal-symmetric dispersion maps with respect to midway optical phase conjugator," *Journal of Information and Communication Convergence Engineering*, Vol. 21, No. 2, pp. 103-109, Jun. 2023.
- [9] 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. 22-230, Oct. 2020.
- [10] R. I. Killey, H. J. Thiele, V. Mikhailov, and P. Bayvel, "Reduction of intrachannel nonlinear distortion in 40-Gb/s-based WDM transmission over standard fiber," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 12, No. 12, pp. 1624-1626, 2000.
- [11] 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), 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