

기하학적 구조의 분산 맵으로 설계된 분산 제어 링크를 갖는 MSSI 시스템

MSSI System with Dispersion-Managed Link Designed with Geometric-Schemed Dispersion Map

이성렬*

목포해양대학교 항해정보시스템 학부

Seong-Real Lee*

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

[요 약]

분산 제어 링크를 갖는 MSSI (mid-span spectral inversion) 시스템에서의 24채널 × 40 Gb/s 파장분할 다중 (WDM; wavelength division multiplexed) 신호의 색 분산과 비선형 왜곡 보상 특성을 체계적으로 연구하였다. WDM 신호는 EDFA (erbium-doped fiber amplifier)를 포함한 80 km × 48 광섬유 스패스로 구성된 분산 제어 링크를 통해 전송된다. 이 분산 제어 링크에 적용된 분산 맵은 다양한 구조의 사다리꼴 형태를 갖는다. 본 논문에서 살펴보는 사다리꼴 형태의 분산 맵은 광 위상 공액기 앞과 뒤 구간 각각에서 누적 분산 프로파일이 양이나 음의 한 값을 갖는 구조로 설계되었다. 시뮬레이션을 통해 제안된 사다리꼴 모양의 분산 맵의 적용에 있어 적은 RDPS (residual dispersion per span)으로 분산 맵을 구성하는 경우에 왜곡된 WDM 채널 신호의 보상에 효과적이라는 확인하였다.

[Abstract]

We systematically studied the chromatic dispersion and nonlinear distortion compensation characteristics of 24-channel × 40 Gb/s wavelength division multiplexed (WDM) signal in a mid-span spectral inversion (MSSI) system with dispersion-managed link. WDM signals are transmitted over dispersion-managed link consisting of an 80 km × 48 fiber span including erbium-doped fiber amplifier (EDFA). The dispersion map applied to this dispersion-managed link has trapezoidal shape with various structures. The trapezoid-shaped dispersion map examined in this paper are designed with configuration in which the cumulative dispersion profile has positive or negative value in each section before and after the optical phase conjugator. Through simulation, it was confirmed that the proposed trapezoid-shaped dispersion map is effective in compensating for distorted WDM channel signals when the dispersion map is configured with the small RDPS (residual dispersion per span).

Key word : Dispersion management, Trapezoid-based dispersion map, Mid-span spectral inversion, Residual dispersion per span, Nonlinear distortion.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2024.28.5.732>



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 13 October 2024; Revised 20 October 2024

Accepted (Publication) 25 October 2024 (31 October 2024)

*Corresponding Author; Seong-Real Lee

Tel: +82-61-240-7264

E-mail: reallee@mmu.ac.kr

I. 서론

광섬유 통신에서 사용 파장이 전송 성능에 미치는 영향은 매우 크다. 우리가 C 대역(band)으로 부르는 1530 nm부터 1565 nm 대역은 실리카 광섬유에서 저손실 특성을 나타내기 때문에 장거리 전송용 파장 대역으로 사용하고 있다. 또한 광 정보를 장거리로 보내기 위해서 전송 모드(mode) 수가 적은 단일 모드 광섬유(SMF; single mode fiber)를 주 전송 매체로 채택하고 있다.

그러나 SMF의 전송 모드 수가 적다고 하더라도 색 분산(chromatic dispersion)이 본질적으로 발생하기 때문에 전송 성능, 특히 데이터율을 저하시킨다 [1]. 그리고 SMF를 통해 장거리 전송 링크를 구성하기 위해서는 저손실 특성을 가지고는 있지만 무손실 매체가 아니기 때문에 적당한 간격으로 증폭기가 삽입되어야 한다. 현재는 이러한 역할을 수행하기 위해 광섬유 증폭기를 주로 사용하고 있다. 에르븀 첨가 광섬유 증폭기(EDFA; erbium-doped fiber amplifier)를 사용하게 되면 광 신호의 강도가 커지기 때문에 강도에 의존하는 비선형 왜곡이 추가적으로 발생하게 된다 [2].

전송 스패(span)를 구성하는 SMF에 추가적으로 분산 보상 광섬유(DCF; dispersion compensation fiber)를 추가해서 누적 분산량을 조절하는 분산 제어(DM; dispersion management)는 색 분산에 의한 왜곡을 보상하는 대표적 기술이다 [3]-[5]. 그리고 전체 전송 링크 중간에 광 위상 공액기(OPC; optical phase conjugator)를 두어 왜곡 신호의 위상 공액으로 변환하여 나머지 구간을 전송시키서 원 신호를 복원하는 광 위상 공액 기술은 비선형 왜곡 신호에 대한 보상에 효과적이다 [6]-[8]. OPC를 전체 전송로 중간에 위치시켜 위상 반전을 피하는 것을 MSSI(mid-span spectral inversion)이라 한다.

저자는 파장 분할 다중(WDM; wavelength division multiplexing)과 같은 광대역 전송에서의 색 분산과 비선형 효과에 의한 신호 왜곡 보상을 위해서는 이 두 기술이 결합되어야 한다는 것을 보였다 [9]-[11].

MSSI와 DM을 결합하여 링크를 설계하는데 있어 가장 중요하게 고려해야 할 것은 각 광섬유 스패마다 축적된 분산량을 전송 거리에 따라 표현한 분산 맵(dispersion map)의 모양이 전체 전송 링크 중간, 즉 OPC의 위치에 대해 대칭적이어야 한다는 것이다. 저자는 선행 연구에서 사각파(rectangular) 모양, 삼각파(tri-angular) 모양, 사인파(sine-wave) 모양 등 다양한 대칭 구조의 분산 맵 프로파일을 제안하였고, 이들 모두 전통적 분산 맵(conventional dispersion map)을 적용한 링크보다 WDM 채널의 왜곡 보상 효과가 개선되는 것을 보였다.

가장 최근에 시뮬레이션을 통해 분석한 대칭 구조 분산 맵은 사다리꼴 모양의 분산 맵이다[11]. WDM 신호의 소광비(ER; extinction ratio)가 낮을수록 사다리꼴 분산 맵이 전통적인 분산 맵보다 보상에 더욱 효과적이라는 것을 확인하였다. 그리고 중간 OPC(이를 midway OPC라고 부름)를 중심으로 전반 전송 구획(FHS; former half section)에서 누적 프로파일은 양(positive)

의 값으로 시작하는 대칭 대칭(antipodal symmetry) 구조의 사다리꼴 분산 맵이 그 반대 형태의 분산 맵보다 보상 효과를 좋게 하는 것도 확인하였다 [11].

DM이 적용된 MSSI 시스템에서 WDM 채널의 왜곡 보상에 영향을 미치는 요소는 WDM 채널의 수, 데이터율, 변조 형식, 광섬유 스패 수, 스패의 길이 등이다. 이와 더불어 분산 맵 프로파일은 midway OPC에 대해 대칭적인 조건을 만족했다라도 분산 맵 프로파일의 형태와 구성 조건에 따라 보상 정도와 수신 성능이 달라질 수 있다. 지난 연구에서 제안하고 분석한 사다리꼴 분산 맵은 뒤에서 구체적으로 설명하겠지만 FHS와 후반 전송 구획(LHS; latter half section) 모두에서 누적 분산 프로파일의 기본 형태가 두 번 반복하는 구조이다.

본 논문에서 시뮬레이션을 통해 분석하고자 하는 분산 맵의 형태도 사다리꼴 구조이다. 지난 연구와 달라진 것은 FHS와 LHS에서 누적 분산 프로파일의 기본 형태가 한 번만 나타난다는 것이다. 누적 분산 프로파일의 기본 형태가 같더라도 링크 전체에서 반복하는 패턴에 따라 보상 특성이 달라질 수 있다는 것을 보이기 위하여 본 논문의 목적이다. 본 논문에서 살펴보는 사다리꼴 분산 맵이 적용된 DM 링크를 통해 전송되는 WDM 신호는 24 채널 \times 40 Gb/s (= 960 Gb/s)로 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

II. 분산 맵의 설계

그림 1은 960 Gb/s WDM 송신부, DM 링크, midway OPC와 WDM 수신부 전체를 나타낸 것이다. 모든 구성부들은 지난 연구 [11]에서와 동일한 구조와 사양으로 설계되었다. 즉 총 48개의 광섬유 스패(optical fiber span)으로 DM 링크가 구성되었고, 각 광섬유 스패는 SMF에 DCF를 추가해 누적 분산량을 조절하도록 하였다.

우선 SMF의 설계 파라미터는 다음과 같다. 80 km의 길이, 손실 계수는 0.2 dB/km, 분산 계수는 17 ps/nm/km, 비선형 계수는 $1.35 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$. 그리고 DCF의 손실 계수는 0.6 dB/km, 분산 계수는 -100 ps/nm/km , 비선형 계수는 $5.06 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 로 가정하였다. 하지만 DCF의 길이는 RDPS(residual dispersion per span) 값에 따라 변화하도록 하였다. RDPS는 광섬유 스패마다 누적되는 잉여 분산량으로 정의되고, 이는 SMF의 길이와 분산 계수의 곱에서 DCF의 길이와 분산 계수의 곱을 뺀 값으로 구해진다. 본 논문에서는 SMF의 길이, 분산 계수, 그리고 DCF의 분산 계수의 값을 고정하였기 때문에 DCF의 길이 변화로 RDPS에 변화를 주었다.

전송 링크를 통해 MSSI가 나타나야 하기 때문에 24번째 광섬유 스패와 25번째 스패 사이에 midway OPC를 위치시켰다. 분산 맵의 형태가 midway OPC를 중심으로 대칭되어야 효과적 보상을 얻을 수 있는 것을 저자의 선행 연구 결과를 통해 확인하였다. 특히, midway OPC를 중심으로 대칭 대칭(antipodal

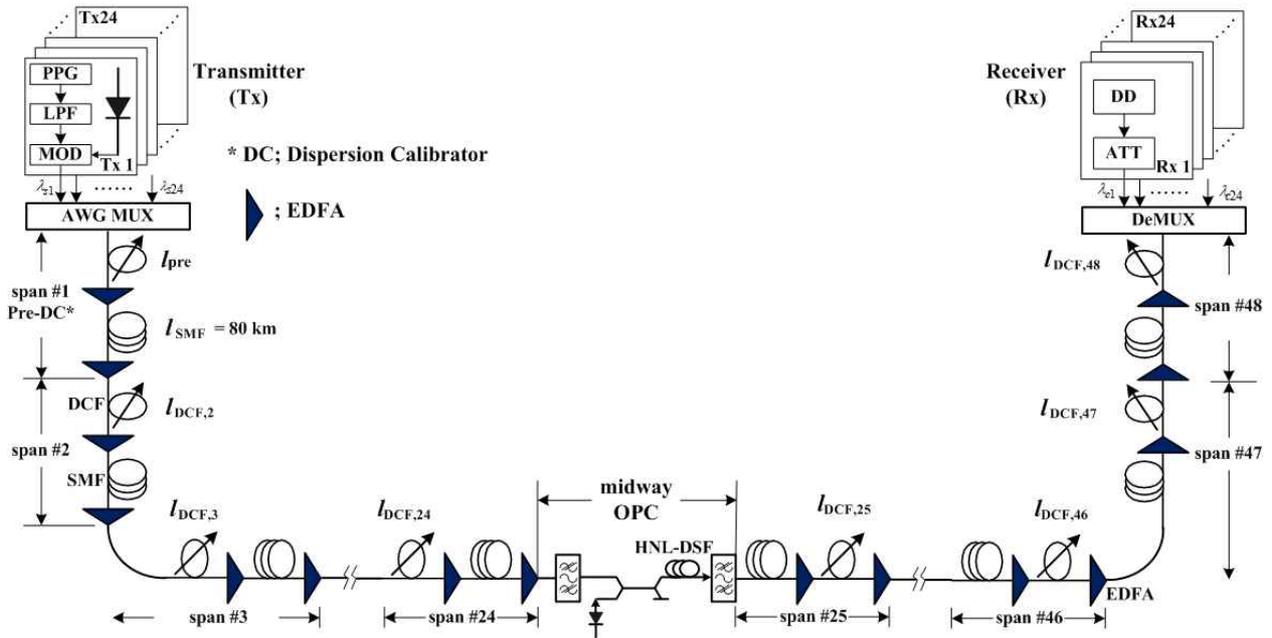


그림 1. 분산 제어 링크와 WDM 시스템의 구조 [11]

Fig. 1. Configuration of dispersion-managed link and WDM system [11].

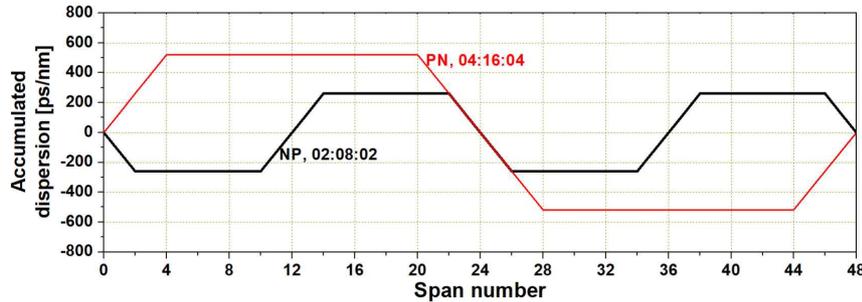


그림 2. 분산 맵

Fig. 2. Dispersion maps.

symmetry) 구조가 보상에 가장 효과적인 것을 확인하였다. 그림 2는 그림 1의 DM 링크에 적용되는 분산 맵의 한 예를 보인 것으로 midway OPC에 대해 대칭 대칭인 것을 알 수 있다. 즉 midway OPC를 기준으로 전반과 후반 링크의 분산 맵 프로파일은 지난 연구에서와 마찬가지로 양(positive)과 음(negative)의 누적 분산량이 midway OPC를 중심으로 대칭되도록 하였다.

그림 2에서 ‘NP, 02:08:02’로 표시한 분산 맵은 지난 연구에서 검토한 분산 맵의 한 예이다. 지난 연구에서 고려한 누적 분산량 프로파일의 양과 음의 반복 간격은 12개 광섬유 스패이다. 그렇기 때문에 그림 2에 보였듯이 ‘NP, 02:08:02’의 분산 맵은 전반과 후반 전송 구획 각각에서 두 번 반복하는 구조를 갖는다. 여기서 NP는 FHS에서의 누적 분산 프로파일이 음(N)-양(P)으로 분포하고 있다는 나타낸 것이다.

반면 본 연구에서 살펴보는 분산 맵의 기본 형태는 지난 연구에서처럼 사다리꼴 분포 형태를 기본으로 하지만 전반과 후반 전송 구획 각각에서 한 번만 나타나는 구조를 갖는다. 이러

한 구조는 지난 연구에서와는 달리 누적 분산 프로파일이 FHS에서는 양, LHS에서는 음 (이를 ‘PN’ 구조라 부름), 그리고 FHS에서는 음, LHS에서는 양 (이를 ‘NP’ 구조라 부름)로 나누었다.

본 논문에서 고려한 사다리꼴 형태는 그림 2에 표시한 ascent-flat-descent 분포를 만드는 광섬유 스패 수에 따라 04:16:04, 06:12:06, 08:08:08, 10:04:10, 12:00:12의 총 5가지이다. 여기서 ascent, descent, flat의 의미는 지난 연구 [11]과 동일하다. 또한 지난 연구에서와 마찬가지로 분산 프로파일에서 ascent/descent 구간의 기울기를 결정하는 RDPS 크기를 130 ps/nm 간격으로 130 ps/nm부터 1,300 ps/nm까지 변화를 주었다. 그리고 WDM 채널들의 왜곡 보상에 영향을 미치는 주요 요소인 전체 잉여 분산 (NRD; net residual dispersion)의 변화는 첫 번째 광섬유 스패의 DCF의 길이 변화를 통해 나타나도록 하였다.

III. 시스템 모델링과 성능 평가 방법

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 궤환 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 7.5 dB인 2차 가우시안 펄스의 RZ (return-to-zero)를 발생시키는 것으로 모델링하였다. 여기서 7.5 dB의 ER은 [11]에서 얻은 결과와 관련되어 있다.

수신기는 5 dB의 잡음 지수를 갖는 전치 증폭기, 1 nm 대역폭의 광 필터, PIN 다이오드, 버터워스 형태의 펄스 정형 필터와 편발 회로로 구성된 직접 검파 (direct detection) 방식의 수신기로 모델링하였다. 수신 대역폭은 0.65 x 비트율로 가정하였다. 전체 전송로 중간에 위치한 midway 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 [9]-[11].

전송 링크를 통해 손실과 비선형 효과의 영향을 겪으면서 전파하는 각 채널들은 비선형 슈뢰딩거 방정식 (NLSE; nonlinear Schrödinger equation)에 의해 표현된다[12]. 본 논문에서 40 Gb/s의 24 채널 WDM 전송을 위한 NLSE의 수치적 시뮬레이션은 단계 분할 푸리에 (SSF; split-step Fourier) 기법[12]에 따라 Matlab으로 구현하여 수행되었다.

WDM 각 채널의 성능 평가는 수신 광 신호의 아이 다이어그램 (eye diagram) 기반으로 얻어지는 눈 열림 패널티 (EOP; eye opening penalty)로 평가하였다. 수신 신호의 기준 EOP는 1 dB로 하였다.

IV. 시뮬레이션 결과 및 검토

그림 3은 본 연구에서 고려한 5가지 사다리꼴 분산 맵으로 설계된 링크를 통해 WDM 채널들을 전송했을 때 얻어지는 최악 채널의 전력 마진 (power margin)과 균일 분포 분산 맵을 적용했을 때 얻어지는 전력 마진의 차이를 계산하여 보인 것이다. 여기서 전력 마진은 보상된 수신 신호의 1 dB EOP를 만드는 입사 전력의 허용 폭 (즉 최대 입사 전력과 최소 입사 전력의 차이 값)이다. 그리고 각 DM 링크의 NRD는 10 ps/nm로 설정되었다.

그림 3의 결과들을 분석해 보면, 우선 누적 분산 프로파일의 기울기를 결정하는 RDPS가 적은 값으로 선택된 경우에서 사다리꼴 모양의 분산 맵의 구체적 모양, 즉 xx-yy-xx 구조에 큰 영향을 받지 않고 왜곡된 WDM 채널의 보상에 효과를 높일 수 있다는 것을 알 수 있다. 좀 더 구체적으로 얘기하면 누적 분산 프로파일이 NP인 경우에는 RDPS = 260 ps/nm에서, PN인

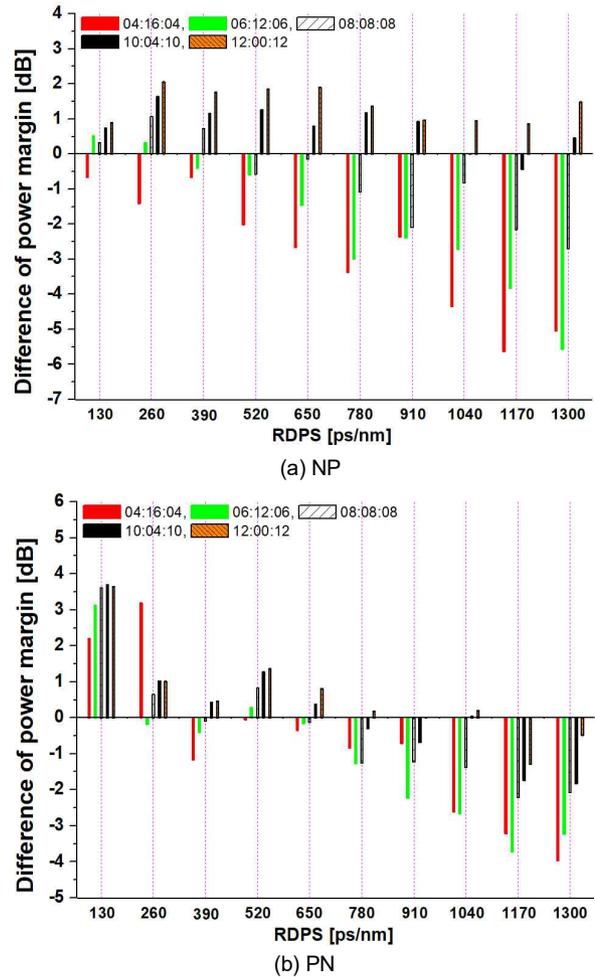


그림 3. 전력 마진 차이.

Fig. 3. Difference of power margin.

경우에서는 RDPS = 130 ps/nm로 선택되면 다른 경우에 비해 보상 효과를 높일 수 있다는 것을 알 수 있다.

그림 3으로부터 확인할 수 있는 또 다른 결과는 누적 분산량 분포의 평평한 부분이 적은 분산 맵 (특히 10:04:10, 12:00:12) 이 PN이 아닌 NP으로 대칭된 구조에서 고려한 모든 RDPS에 대해 WDM 채널의 왜곡 보상이 전반적으로 양호하다는 것이다.

지난 연구 결과와 마찬가지로 DM 링크의 NRD가 10 ps/nm 외의 다른 값을 가져도 1 dB EOP를 얻을 수 있는 입사 전력이 존재한다. 일반적으로 NRD가 10 ps/nm/km보다 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 launch power and NRD)이 된다. 이 유효 입사 전력과 NRD의 곱 (이하 ‘product’로 표현함)이 커질수록 해당 분산 맵을 적용했을 때 고품질 보상이 이루어지는 WDM 채널의 입사 전력과 분산 제어 링크의 NRD의 허용폭이 증가하게 된다.

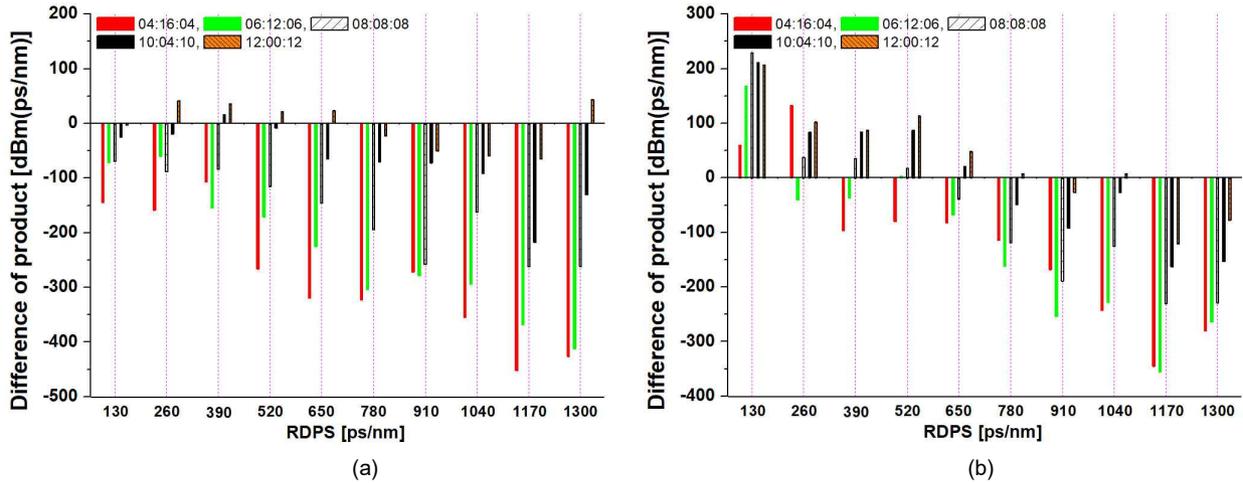


그림 4. 유효 입사 전력과 NRD의 곱 차이. (a) NP, (b) PN.
 Fig. 4. Difference of product of effective power and NRD. (a) NP, and (b) PN,

그림 4는 본 연구에서 고려한 5가지 모양의 분산 맵을 적용한 분산 제어 링크를 통해 WDM 채널들을 전송했을 때 얻어지는 product와 균일 분포 분산 맵을 적용했을 때 얻어지는 product의 차이를 나타낸 것이다. 그림 4의 결과들을 살펴보면 그림 5에서 얻어진 전력 마진 결과의 양상과는 조금 다르다는 것을 확인할 수 있다.

좀 더 구체적으로 설명하면 분산 맵의 대칭 분포가 NP인 경우에 있어서는 몇 가지 구조를 제외한 대부분의 분산 맵을 통해 얻을 수 있는 product가 균일 분포의 product보다 작아서 융통적 링크 구성을 어렵게 한다는 것이다. 반면 분산 맵의 대칭 분포가 PN인 경우에 있어서는 RDPS가 130 ps/nm로 적게 선택되면 분산 맵 모양에 따라 차이는 있지만 5개 분산 맵 형태 모두 균일 분포의 분산 맵이 적용된 경우보다 증가된 product를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

VI. 결론

지금까지 다양한 구조의 사다리꼴 모양의 분산 맵이 960 Gb/s WDM 신호 왜곡 보상에 미치는 영향을 수치적으로 분석해 보았다. 제안한 5가지의 분산 맵을 분산 제어 링크에 적용하는 경우 전력 마진 개선 측면에서는 midway OPC를 중심으로 전반 구획에서는 음의 누적 분산을, 후반 구획에서는 양의 누적 분산(즉 NP 구조)을 갖도록 설계하는 것이 유리하다는 것을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 한편 입사 전력과 NRD의 탄력적 적용 측면에서는 전반 구획에서는 양의 누적 분산을, 후반 구획에서는 음의 누적 분산(즉 PN 구조)을 갖도록 설계하는 것이 유리하다는 것을 확인하였다. 두 경우 모두 각 분산 맵의 구체적 모양을 결정하는데 중요한 역할을 하는 RDPS를 적게 선택해야 보상 효과를 높일 수 있는 것도 알 수 있었다.

세부적인 구조는 다르지만 전체적 누적 분산 프로파일의 구

조가 비슷한 분산 맵을 통한 WDM 신호의 왜곡 보상 효과를 살펴본 지난 연구 [11]의 결과를 포함하여 종합적으로 분석해보면, 반 전송 구획에서의 기본 누적 분산 프로파일이 몇 번 반복하느냐에 따라서 RDPS가 보상에 미치는 영향, 대칭 대칭 분포의 형태가 보상에 미치는 영향 등이 달라질 수 있다는 것을 본 연구를 통해 확인할 수 있었다.

REFERENCES

- [1] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 4-th ed. Hoboken: New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [2] M. Suzuki, "Dispersion managed solitons and their application to high-capacity optical submarine cable systems," *Optik*, Vol. 280, Article No:170771, June 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2023.170771>.
- [3] 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, Issue 1, pp. 58-66, Jan. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1109/JLT.2012.2227942>.
- [4] M. Noshad and A. Rostami, "FWM minimization in WDM optical communication systems using the asymmetrical dispersion-managed fibers," *Optik*, Vol. 123, Issue 9, pp. 758-760, May 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2011.06.022>.
- [5] 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, Article No: 167006, Sept. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.167006>.

- [6] A. D. Ellis, M. A. Z. A. Khateeb, and M. E. McCarthy, "Impact of optical phase conjugation on the nonlinear Shannon limit," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 35, Issue 4, pp. 792-798, Feb. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2606548>.
- [7] I. Kim, O. Vassilieva, Y. Akasaka, P. Palacharla, and T. Ikeuchi, "Enhanced spectral inversion for fiber nonlinearity mitigation," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 30, Issue 23, pp. 2040-2043, Dec. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/LPT.2018.2875595>.
- [8] H. Zhang, Q. Zhang, C. Huang, and C. Shu, "Transmission impairment mitigation for single-sideband signals by optical phase conjugation," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 32, Issue 3, pp. 150-153, Feb. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/LPT.2019.2962712>.
- [9] 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, Article No: 10456, Sept. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/app131810456>.
- [10] 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. DOI: <https://doi.org/10.56977/jicce.2023.21.2.103>.
- [11] S. -R. Lee, "Compensation for the distorted WDM signals through dispersion map of trapezoid-based symmetry configuration combined with MSSl," *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 28, No. 4, pp. 552-558, Aug. 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.12673/jant.2024.28.4.552>.
- [12] 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