

## MSSI와 결합된 사다리꼴 기반 대칭 구조의 분산 맵을 통한 WDM 신호의 왜곡 보상

# Compensation for the Distorted WDM Signals through Dispersion Map of Trapezoid-Based Symmetry Configuration Combined with MSSI

이성렬

목포해양대학교 항해정보시스템 학부

Seong-Real Lee

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

### [요 약]

단일 모드 광섬유가 갖는 색 분산을 제거하거나 줄이기 위해 적절한 길이의 분산 보상 광섬유를 추가적으로 삽입하는 분산 제어에서 전송 거리에 따른 누적 분산 프로파일인 분산 맵 (dispersion map)의 형태 결정은 가장 기본적이며 중요하다. 본 논문에서는 전체 전송 링크 중간에서 광 위상 공역을 통해 Kerr 비선형 효과에 의한 왜곡을 보상하는 MSSI (mid-span spectral inversion)과 결합되는 분산 제어 링크에 적용되는 사다리꼴 기반 다양한 대칭 구조의 분산 맵을 제안하고, 각각의 분산 맵이 파장 분할 다중 (WDM; wavelength division multiplexed) 신호의 왜곡 보상에 미치는 영향을 분석하였다. 시뮬레이션을 통해 제안하는 사다리꼴 모양의 분산 맵의 세부적 형태를 결정하는 요인과 RDPS (residual dispersion per span) 등에 따라 보상 정도가 차이가 있기는 하지만 전반적으로 소광비 (extinction ratio)가 큰 WDM 채널 신호의 왜곡 보상보다 적은 신호의 왜곡 보상에 더욱 효과가 있는 것을 확인하였다.

### [Abstract]

In dispersion management, which involves additionally inserting a dispersion compensation fiber of an appropriate length to eliminate or reduce the chromatic dispersion of a single-mode fiber, determining the form of the dispersion map, which is the cumulative dispersion profile according to the transmission distance, is the most basic and important. In this paper, the various symmetric dispersion map based on trapezoids applied to dispersion-managed links combined with mid-span spectral inversion (MSSI), which compensates for the distortion caused by Kerr nonlinear effects through optical phase conjugation in the middle of the entire transmission link are proposed, and the effect of each dispersion map on distortion compensation of wavelength division multiplexed (WDM) signals is analyzed. Although the degree of compensation varies depending on the factors that determine the detailed shape of the proposed trapezoid-shaped dispersion map and RDPS (residual dispersion per span), overall, it was confirmed that distortion compensation for signals with a small extinction ratio was more effective than distortion compensation for WDM channel signals with a large extinction ratio.

**Key word** : Dispersion management, Trapezoid-based dispersion map, Mid-span spectral inversion, Residual dispersion per span, Extinction ratio.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2024.28.4.552>



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 11 August 2024; Revised 22 August 2024

Accepted (Publication) 25 August 2024 (30 August 2024)

\*Corresponding Author; Seong-Real Lee

Tel: +82-61-240-7264

E-mail: reallee@mmu.ac.kr

## 1. 서론

광섬유 기반 통신 시스템은 지난 수십 년 동안 축적된 기술들을 통해 획기적인 발전을 해왔다. 가입자망, 백홀망(back-haul network) 등 광통신 네트워크를 구성하는 다양한 기술들 중에서도 에르븀 첨가 광섬유 증폭기(EDFA; erbium-doped fiber amplifier) 등의 광섬유 증폭기의 개발과 적용[1], 코히어런트(coherent) 광 전송 기술[2], 그리고 파장 분할 다중 전송(WDM; wavelength division multiplexing) 기술[3] 등은 전송 거리와 용량을 획기적으로 늘릴 수 있게 해주었다.

우선 광섬유 증폭 기술은 전통적인 반도체 레이저 증폭기(SOA; semiconductor optical amplifier)에 비해 광전 변환, 전광 변환 및 신호 재생과 같은 복잡한 공정을 거칠 필요가 없으며 양호한 "투명성"을 지닌 신호의 전체 광 증폭을 직접 수행할 수 있기 때문에 광섬유 스패ن(fiber span) 간격을 늘려 광 링크의 장거리 실현을 가능하게 하였다. 하지만 광섬유 증폭기를 사용하게 됨에 따라 광 강도(intensity)가 커지기 때문에 광 채널 신호에는 강도에 의존하는 비선형 왜곡(이를 'Kerr 비선형 왜곡'이라 부름)이 발생하게 되는데, 이를 송수신기에서 최소화하는 방법 중 하나가 코히어런트 광 전송이다. 그리고 수십 기가 용량의 광 채널들을 각기 다른 파장으로 할당하여 다중화하는 WDM 기술은 수 Tb/s의 전송을 가능하게 했다.

코히어런트 광 전송이 Kerr 비선형 왜곡의 영향을 줄여줄 수 있지만 송수신기 구성을 까다롭게 하고 결과적으로 시스템 구성을 복잡하게 만들기 때문에 전통적인 강도 변조(IM; intensity modulation) 기반 광통신 시스템에서 전송 거리를 늘리고자 하려면 단일 모드 광섬유(SMF; single mode fiber)가 갖는 색 분산 효과와 Kerr 비선형 효과를 없애거나 최소화할 수 있는 방법이 적용되어야 한다. 적절한 길이의 분산 보상 광섬유(DCF; dispersion compensating fiber)를 삽입해 SMF에서 축적된 분산량을 제거하거나 줄여주는 분산 제어(DM; dispersion management) [2],[4], 전송 링크 중간에서 그동안 전송된 신호를 공역 변환한 후 나머지 구간을 전송시키면 원래 신호와 흡사한 수신 신호를 얻을 수 있는 광 위상 공역(optical phase conjugation) [5],[6] 등이 색 분산 효과와 Kerr 비선형 효과의 제거 또는 감소에 효과적이다.

본 논문의 저자는 그동안의 연구에서 영향을 미치는 수많은 SMF 스패스로 구성된 장거리 링크에 DM과 광 위상 공역을 동시에 적용하면 색 분산 효과와 Kerr 비선형 효과의 제거 또는 감소가 이루어져 1 Tb/s 급 WDM 신호를 고품질로 보낼 수 있다는 것을 보였다 [7]-[9].

광 위상 공역 링크에서 광 위상 공역기(OPC; optical phase conjugator)가 전체 전송 링크의 중간에 위치한 구조를 MSSI(mid-span spectral inversion)이라 한다. MSSI와 DM을 결합하여 링크를 설계하는데 있어 가장 중요하게 고려해야 할 것은 각 광섬유 스패스마다 축적된 분산량을 전송 거리에 따라 표현한 분산 맵(dispersion map)의 모양이 전체 전송 링크 중간, 즉 OPC

의 위치에 대해 대칭적이어야 한다는 것이다. 분산 맵 프로파일이 전체 전송 링크 중간에 대해 대칭적인 조건을 만족했다면 분산 맵 프로파일의 형태와 구성 조건에 따라 WDM 채널의 수, 데이터율, 변조 형식, 광섬유 스패스 수, 스패스의 길이 등과 관계하여 보상 정도와 수신 성능이 달라진다.

전체 전송 링크 중간에 대해 대칭적인 분산 맵 프로파일은 다양하게 만들 수 있다. 저자는 선행 연구에서 사각형(rectangular) 모양, 삼각형(tri-angular) 모양, 정현파(sine-wave) 모양 등 다양한 대칭 구조의 분산 맵 프로파일을 제안하였고, 전통적 분산 맵(conventional dispersion map)을 적용한 링크보다 WDM 채널의 왜곡 보상 효과가 개선되는 것을 보였다.

2장에서 다시 설명하겠지만 사다리꼴 모양의 프로파일도 전체 전송 링크 중간에 대해 대칭적인 분산 맵을 구성할 수 있다. 본 논문에서는 MSSI와 DM을 통한 WDM 채널 보상과 장거리 전송을 위해 필요한 대칭 구조의 분산 맵 설계의 다양성을 확보한다는 목적의 일환으로 사다리꼴 모양 기반 대칭 구조의 분산 맵을 제안하고 이들이 앞선 저자의 연구와 같은 조건의 링크와 WDM 전송 시스템에 적용된 경우에서의 보상 특성을 살펴보고자 한다.

## II. 분산 제어 링크

그림 1은 본 연구에서 살펴볼 960 Gb/s (= 40 Gb/s × 24 채널) WDM 송수신부와 이들을 연결한 전송 링크를 나타낸 것이다. 전송 링크는 총 48개의 광섬유 스패스로 구성되었고, 각 광섬유 스패스는 SMF에 DCF를 추가해 누적 분산량을 조절하도록 하였다. 광섬유 스패스를 구성하는 SMF 길이는 모든 스패스마다 80 km로 일정하게 하였고, 분산 계수는 17 ps/nm/km로 설정하였기 때문에 각 스패스의 SMF에서 축적되는 분산량은 1,360 ps/nm가 된다. 하지만 각 스패스의 누적 분산량은 추가된 DCF의 길이와 분산 계수에 의해 감소된다. 각 스패스가 결과적으로 갖게 되는 누적 분산량을 RDPS(residual dispersion per span)으로 정의하고, RDPS는 SMF의 길이와 분산 계수의 곱에서 DCF의 길이와 분산 계수의 곱을 뺀 값으로 구해진다.

전체 링크의 중간, 즉 24번째 광섬유 스패스 다음에 OPC를 위치시켜 MSSI를 통해 각 WDM 채널의 Kerr 비선형 왜곡을 보상하도록 하였다. 저자의 선행 연구 결과를 살펴보면 효과적인 MSSI를 위해서는 전체 분산 프로파일 구조가 midway OPC를 중심으로 대칭되어야 하고, 각 광섬유 스패스의 구성도 대칭될 필요가 있다. 이러한 이유로 그림 1에 보인 전송 링크를 구성하는 OPC 이전과 이후의 모든 광섬유 스패스는 각각 SMF 앞과 뒤에 DCF가 삽입되는 구조로 설계하였다.

모든 광섬유 스패스의 SMF의 손실 계수는 0.2 dB/km, 비선형 계수는  $1.35 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 로 가정하였다. 그리고 DCF의 손실 계수는 0.6 dB/km, 분산 계수는  $-100 \text{ ps/nm/km}$ , 비선형 계수는  $5.06 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 로 가정하였다. 하지만 DCF의 길이는 RDPS 값에 따라

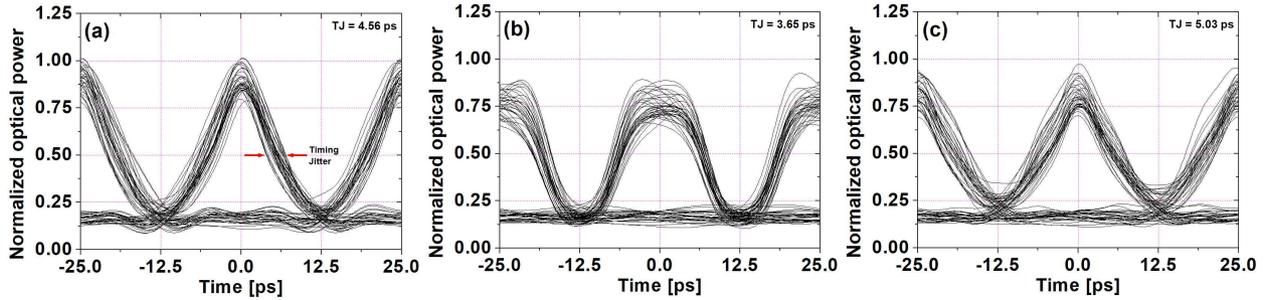


그림 3. 2-8-2, PN, ER = 7.5 dB, RDPS = 130 ps/nm인 경우 아이 다이어그램. (a) NRD = 10 ps/nm, (b) NRD = 0 ps/nm, (c) = -10 ps/nm.

Fig. 3. Eye diagrams in case of 2-6-2, PN, ER = 7.5 dB, RDPS = 150 ps/nm. (a) NRD = 10 ps/nm, (b) NRD = 0 ps/nm, (c) = -10 ps/nm.

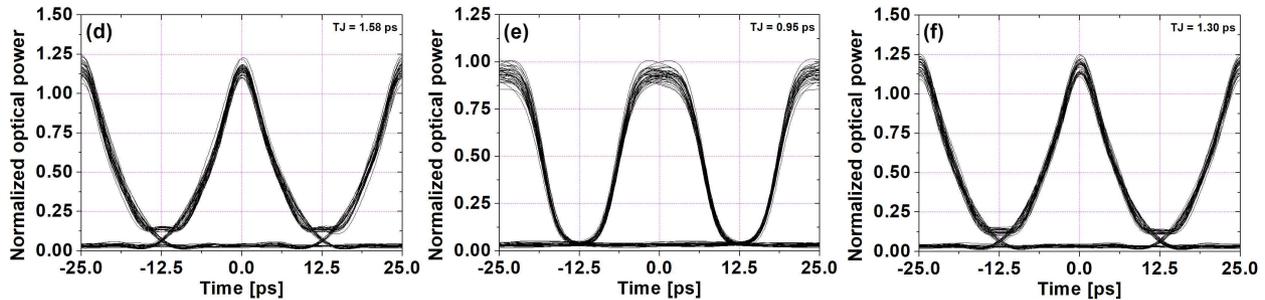


그림 4. 6-0-6, NP, ER = 15 dB, RDPS = 1300 ps/nm인 경우 아이 다이어그램. (a) NRD = 10 ps/nm, (b) NRD = 0 ps/nm, (c) = -10 ps/nm.

Fig. 4. Eye diagrams in case of 6-0-6, NP, ER = 15 dB, RDPS = 1500 ps/nm. (a) NRD = 10 ps/nm, (b) NRD = 0 ps/nm, (c) = -10 ps/nm.

변하도록 하였다.

그림 2는 그림 1의 전송 링크에 적용되는 분산 맵의 한 예를 보인 것이다. Midway OPC를 기준으로 전반과 후반 링크의 분산 맵 프로파일은 누적 분산량이 양(positive)과 음(negative)이 반복하도록 하였고, 이 분포가 원점 대칭되도록 설계하였다. 누적 분산량 프로파일의 양과 음의 반복은 12개 스패마다 동일한 사다리꼴 분포 형태를 반전해서 만든다. 그림 2에서 보는 바와 같이, 전반에서는 양-음 반복, 후반에서는 음-양 반복 구조 (이를 ‘PN’ 배열이라 부름)와 반대로 전반에서는 음-양 반복, 후반에서는 양-음 반복 구조 (이를 ‘NP’ 배열이라 부름)로 나뉜다.

본 논문에서 고려한 사다리꼴 형태는 그림 2에 표시한 ascent-flat-descent 분포를 만드는 광섬유 스패 수에 따라 2-8-2, 3-6-3, 4-4-4, 5-2-5, 6-0-6의 총 5가지이다. 그림 2는 PN 배열과 NP 배열의 2-8-2 분포의 분산 맵 프로파일을 보인 것이다. 사다리꼴 분산 프로파일 분포를 만들기 위해서는 연속된 광섬유 스패에서 동일한 부호와 크기의 RDPS를 갖도록 해야 한다. 그림 2에 표기한 ascent는 같은 크기의 양의 RDPS가 연속되었기 때문에 누적 분산량이 증가하는 구간이고, 반면 descent는 같은 크기의 음의 RDPS가 연속되었기 때문에 누적 분산량이 감소하는 구간이 된다. 한편 flat는 연속된 광섬유 스패에서의 RDPS가 0 ps/nm이기 때문에 만들 수 있다. 본 논문에서는 분산 프로파일에서 ascent/descent 구간의 기울기를 결정하는

RDPS 크기를 130 ps/nm 간격으로 130 ps/nm부터 1,300 ps/nm 까지 변화를 주어 각각의 경우에 대한 WDM 채널의 왜곡 보상 효과를 살펴보았다.

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 스패마다 누적되거나 제거된 각각의 분산을 전송 링크 전체에 걸쳐 더한 값으로 정의된다. 본 연구에서 살펴보는 그림 2의 분산 맵의 기본 구조는 사다리꼴이기 때문에 결과적으로 NRD는 0 ps/nm가 된다. 하지만 최상의 왜곡 보상을 얻을 수 있는 NRD는 0 ps/nm가 아닌 그 근처의 다른 값으로 설정될 수도 있다. 이것은 NRD를 0 ps/nm를 포함한 다른 값으로 설정해 주어야 한다는 것을 의미한다. 본 연구에서는 첫 번째 광섬유 스패의 DCF가 이러한 역할을 수행하도록 하였다.

### III. WDM 시스템, Midway OPC, 성능 평가

그림 1에 표현한 24개의 송신기(Tx)는 각각 독립적인 40 Gb/s  $127(=2^7-1)$  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 (return-to-zero) 신호를 만들도록 하였다.

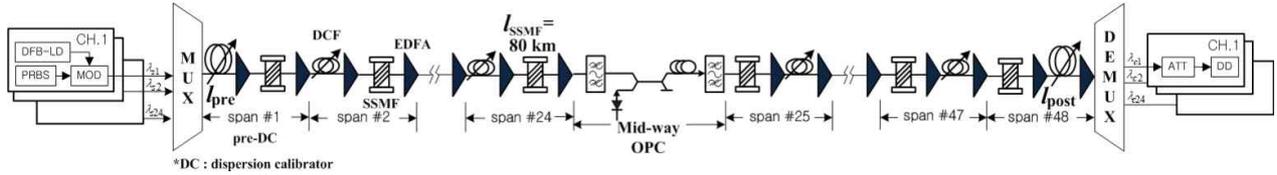


그림 1. 분산 제어 링크와 WDM 시스템의 구조  
 Fig. 1. Configuration of dispersion-managed link and WDM system.

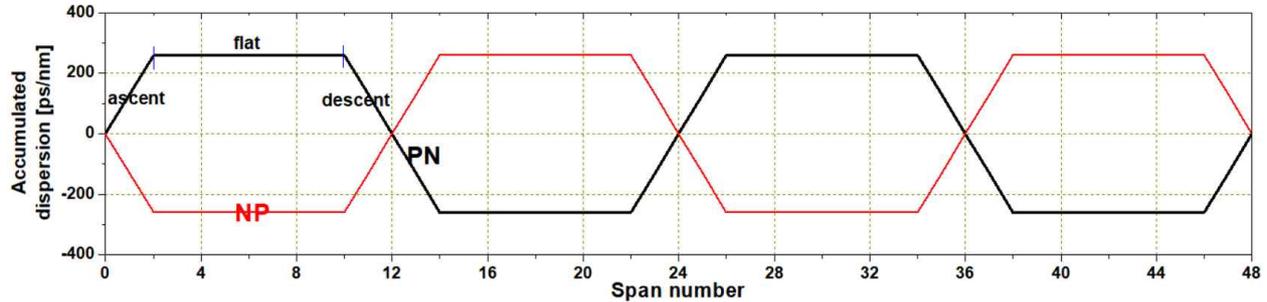


그림 2. 분산 맵  
 Fig. 2. Dispersion maps.

RZ 형식의 출력 전기장은 슈퍼 가우스 펄스로 가정하였고, 가우스 펄스의 소광비 (ER; extinction ratio)는 7.5 dB, 10 dB, 15 dB 로 가정하였다.

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.

전송 링크를 통해 손실과 비선형 효과의 영향을 겪으면서 전파하는 각 채널들은 비선형 슈뢰딩거 방정식 (NLSE; nonlinear Schrödinger equation)에 의해 표현된다[10]. 본 논문에서 40 Gb/s의 24 채널 WDM 전송을 위한 NLSE의 수치적 시뮬레이션은 단계 분할 푸리에 (SSF; split-step Fourier) 기법[10]에 따라 Matlab으로 구현하여 수행되었다.

WDM 각 채널의 성능 평가는 수신 광 신호의 아이 다이어그램 (eye diagram) 기반으로 이루어졌다. 즉 24개 채널들 중 수신 성능이 가장 좋지 않은 채널의 아이 다이어그램으로부터 타이밍 지터 (TJ; timing jitter)를 측정하여 평가하였다. 수신 신호의 기준 타이밍 지터 값은 한 채널의 펄스 폭인 25 ps의 10%에 해당하는 2.5 ps로 가정하였다.

IV. 시뮬레이션 결과 및 검토

그림 3과 그림 4는 NRD가 10 ps/nm, 0 ps/nm, -10 ps/nm로 설정된 링크를 통해 입사 전력이 5 dBm WDM 신호를 전송한 경우 수신 성능이 최악인 채널의 아이 다이어그램을 나타낸 것이다. 그림 3은 130 ps/nm의 RDPS로 생성시킨 PN 분포 2-8-2

구조의 분산 맵을 갖는 링크에 소광비가 7.5 dB인 WDM 채널의 RZ 펄스를 전송한 경우에서 얻어진 결과이다. 반면 그림 4는 1,300 ps/nm의 RDPS로 생성시킨 NP 분포 6-0-6 구조의 분산 맵을 갖는 링크에 소광비가 15 dB인 WDM 채널의 RZ 펄스를 전송한 경우에서 얻어진 결과이다. 그림 3과 그림 4 각각의 3가지 경우의 아이 다이어그램을 분석해 보면, NRD가 0 ps/nm로 설정된 링크에서 타이밍 지터 특성이 가장 양호한 것을 알 수 있다. 즉 본 논문에서 분석하는 사다리꼴 형태의 분산 맵의 종류, 분산 프로파일의 반복 구조, RDPS 크기와 소광비에 관계 없이 타이밍 지터를 최소화 할 수 있는 NRD는 0 ps/nm인 것을 보여주고 있다.

분산 맵의 가장 간단하면서 전통적인 형태는 모든 광섬유 스펙마다 일정한 RDPS 값을 가지도록 하는 것으로, 이를 ‘균일 분포’의 분산 맵이라고 부르기로 하자. 그림 5는 본 논문에서 살펴보는 사다리꼴 모양의 분산 맵을 적용한 분산 제어 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 2.5 ps의 타이밍 지터를 만드는 입사 전력의 허용 폭 (즉 최대 입사 전력과 최소 입사 전력의 차이 값)이다. 그림 5는 모든 분산 제어 링크의 NRD가 0 ps/nm로 설정된 경우에서 얻어진 결과이다.

그림 5의 결과들을 분석해 보면, 우선 사다리꼴 모양의 분산 맵의 반복 구조가 NP인 경우보다 PN인 경우 (그림 5의 (a), (c), (e))가 WDM 왜곡 보상에 더욱 효과적이라는 것을 확인할 수 있다. 사다리꼴 기반의 분산 맵은 소광비가 적은 WDM 펄스의 왜곡 보상에 더욱 유리한 것도 알 수 있다. 이는 그림 5 (a)와 (b), (c)와 (d), (e)와 (f) 순으로 양(positive)의 전력 마진 차이를 나타내는 막대 수가 많다는 것을 통해 알 수 있다. 그리고 그림

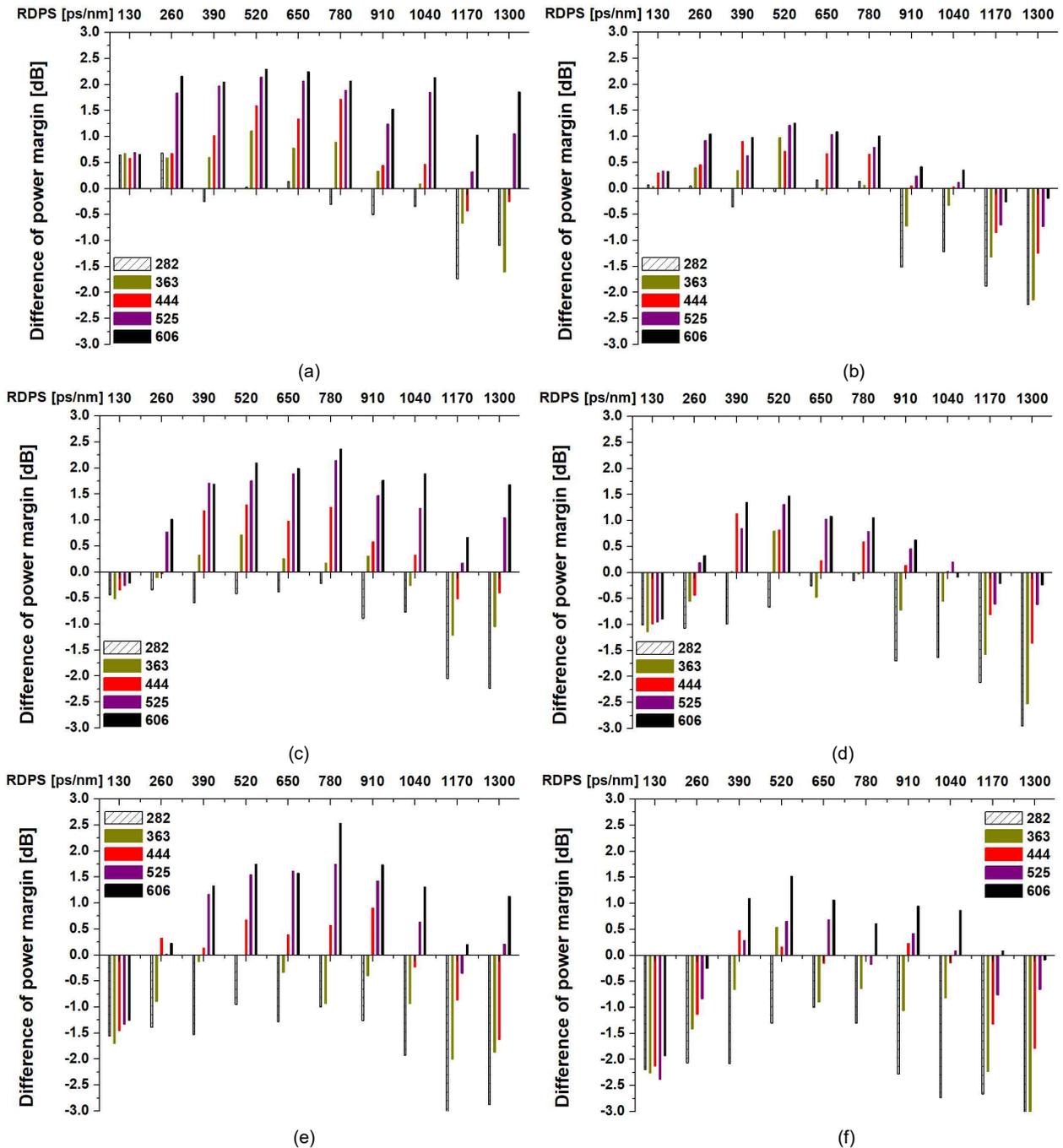


그림 5. 전력 마진 차이. (a) PN, ER = 7.5 dB, (b) NP, ER = 7.5 dB, (c) PN, ER = 10 dB, (d) NP, ER = 10 dB, (e) PN, ER = 15 dB, (f) NP, ER = 15 dB,  
 Fig. 5. Difference of power margin. (a) PN, ER = 7.5 dB, (b) NP, ER = 7.5 dB, (c) PN, ER = 10 dB, (d) NP, ER = 10 dB, (e) PN, ER = 15 dB, (f) NP, ER = 15 dB,

5의 결과들을 통해 확인할 수 있는 또 다른 사실은 그림 2의 사다리꼴 기반 대칭 구조의 분산 맵 모양을 특징짓는 주요한 파라미터인 RDPS의 크기는 너무 적지도 크지도 않아야 RZ 펄스의 소광비, 분산 프로파일의 반복 패턴에 크게 영향받지 않고 보편적으로 보상 효과를 나타낼 수 있다는 것도 확인할 수 있다.

저자의 다른 연구 결과와 마찬가지로 분산 제어 링크의

NRD가 0 ps/nm 외의 다른 값을 가져도 2.5 ps의 타이밍 지터를 얻을 수 있는 입사 전력이 존재한다. 일반적으로 NRD가 0 ps/nm/km보다 커지거나 작아지면 2.5 ps의 타이밍 지터를 얻을 수 있는 입사 전력은 적어지게 되어 결과적으로 임의의 NRD에 대한 2.5 ps의 타이밍 지터를 만드는 입사 전력을 연결하면 폐곡면을 얻을 수 있다. 이 폐곡면의 면적을 성능 면에서 정의하

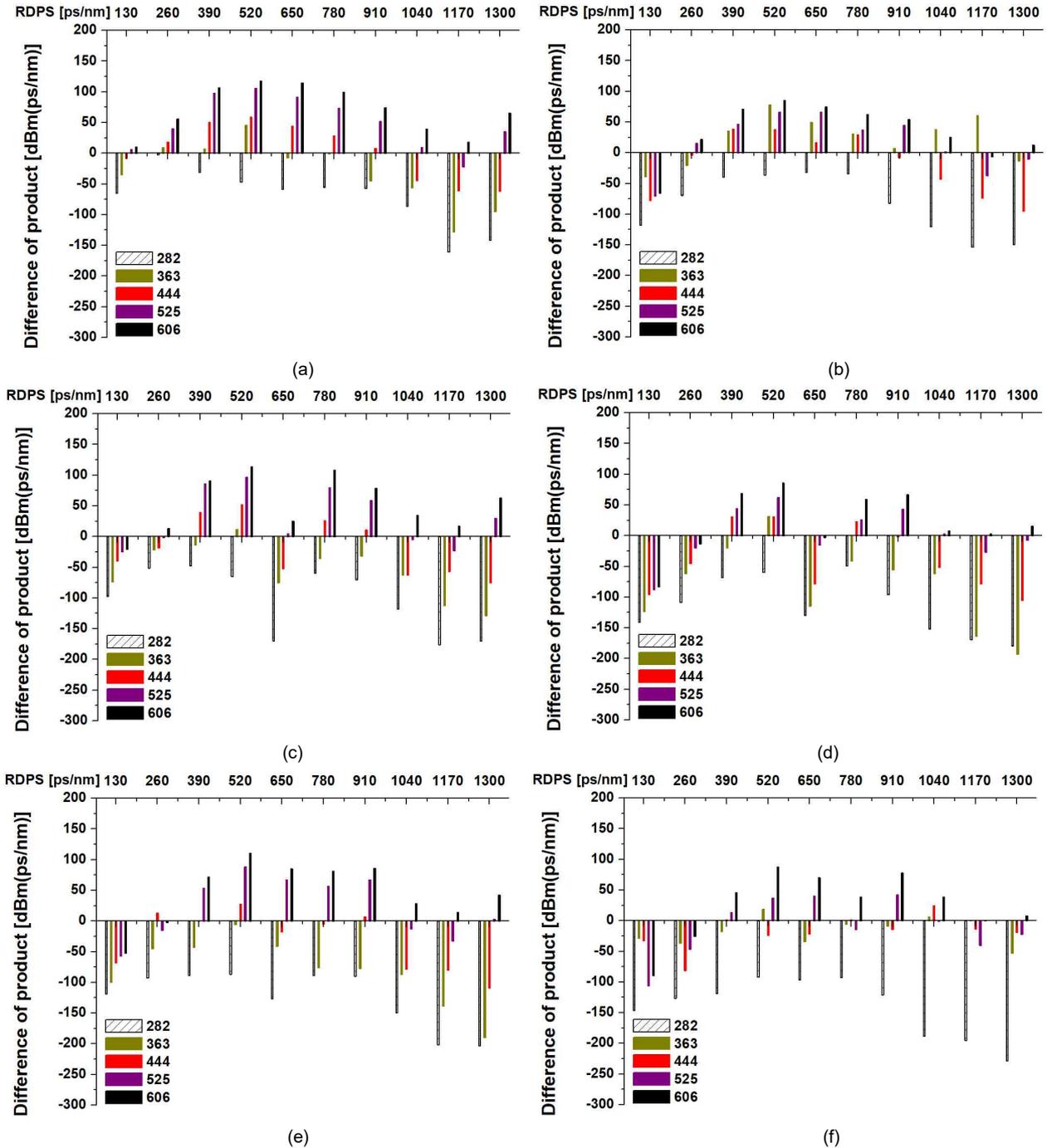


그림 6. 유효 입사 전력과 NRD의 곱의 차이. (a) PN, ER = 7.5 dB, (b) NP, ER = 7.5 dB, (c) PN, ER = 10 dB, (b) NP, ER = 10 dB, (e) PN, ER = 15 dB, (b) NP, ER = 15 dB,

Fig. 6. Difference of product of effective launch power and NRD. (a) PN, ER = 7.5 dB, (b) NP, ER = 7.5 dB, (c) PN, ER = 10 dB, (b) NP, ER = 10 dB, (e) PN, ER = 15 dB, (b) NP, ER = 15 dB,

면 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 6은 사다리꼴 모양의 분산 맵을 적용한 분산 제어 링크

를 통해 WDM 채널들을 전송했을 때 얻어지는 product와 균일 분포 분산 맵을 적용했을 때 얻어지는 product의 차이를 나타낸 것이다. 그림 6의 결과들을 살펴보면 그림 5에서 얻어진 전력 마진 결과의 양상과 비슷하다고 볼 수 있다.

하지만 균일 분포의 분산 맵과의 product 차이 값이 양인 막대 수가 그림 5의 결과에 비해 적다는 것을 알 수 있다. 이 결과

는 본 논문에서 제안하고 살펴보는 그림 2의 사다리꼴 기반 대칭 구조의 분산 맵은 유효 입사 전력과 NRD의 곱의 개선을 통한 융통성 신장보다는 타이밍 지터를 2.5 ps 이하로 유지할 수 있는 WDM 채널의 전력 마진을 늘리는데 좀 더 유리하다는 것을 의미한다고 판단할 수 있다.

## VI. 결 론

지금까지 다양한 구조의 사다리꼴 모양의 분산 맵이 960 Gb/s WDM 신호 왜곡 보상에 미치는 영향을 수치적으로 분석해 보았다. 본 논문에서 제안하는 사다리꼴 모양의 분산 맵의 세부적 형태, 즉 잉여 분산량의 상승/하강 기술기, RDPS 등에 따라 보상 정도가 차이가 있기는 하지만 전반적으로 소광비가 적은 WDM 채널의 변조 형식인 RZ 파형 전송에 효과가 있는 것을 확인하였다.

RZ 펄스의 소광비가 적다는 것은 ‘0’과 ‘1’의 전력 차이가 크지 않아 소광비가 큰 신호의 전송에 비해 수신 에러 발생 확률이 증가할 수 있다. 이러한 본질적 한계를 본 논문에서 제안한 사다리꼴 모양의 분산 맵을 WDM 전송 링크에 적용하면 어느 정도 효과적으로 극복할 수 있다는 것이 본 연구의 성과라고 할 것이다.

## REFERENCES

[1] T. Mukherjee, A. Majumdar, and S. Gangopadhyay, “Effect of Kerr nonlinearity on signal and pump intensities in EDFA comprising single-mode step index fiber: Estimation by a simple but accurate mathematical formalism,” *Results in Optics*, Vol. 8, Article No: 100263, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rio.2022.100263>.

[2] 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: 10.1109/JLT.2012.2227942.

[3] 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>.

[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, Article No: 167006, Sept. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.167006>.

[5] 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: 10.1109/JLT.2016.2606548.

[6] 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: 10.1109/LPT.2018.2875595.

[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, Article No: 10456, Sept. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/app131810456>.

[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. DOI: <https://doi.org/10.56977/jicce.2023.21.2.103>.

[9] 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. DOI: <https://doi.org/10.12673/jant.2023.27.4.457>.

[10] 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