

Non-midway 광 위상 공액과 비대칭 구조의 분산 맵을 통한 WDM 신호의 왜곡 보상

Compensation of WDM Signal Distortion through Non-midway Optical Phase Conjugation and Dispersion Maps of Asymmetric Structure

이 성 렬

목포해양대학교 항해정보시스템 학부

Seong-Real Lee

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

[요 약]

과장 분할 다중 (WDM; wavelength division multiplexed)과 같은 다중 전송 신호의 장거리 전송은 전송 링크에 분산 제어와 광 위상 공액의 적용, 그리고 이들의 결합을 통해 색 분산과 비선형성에 의한 왜곡을 보상할 수 있기 때문에 가능해졌다. 광 위상 공액을 광 전송 링크에 적용하는 데 있어 가장 큰 장애 요소는 핵심 소자인 광 위상 공액기의 위치가 전체 전송 라인 중간에만 위치해야 한다는 것이다. 본 논문은 이러한 OPC의 위치 제약성을 비대칭 분산 맵의 적용을 통해 극복할 수 있다는 것을 보이고 있다. 본 논문에서 고려한 OPC의 위치는 전체 48개의 광섬유 스패 중 8번째와 9번째 광섬유 스패 사이에 존재한다. 또한 분산 맵은 OPC를 중심으로 비대칭한 누적 분산 프로파일을 갖는다. 시뮬레이션 결과 제안한 비대칭 분산 맵의 누적 분산 프로파일 분포의 전체적 모양과 프로파일 기울기의 선택에 따라 WDM 채널의 왜곡 보상 효과를 전통적 분산 맵이 적용된 링크에서보다 늘릴 수 있는 것을 확인하였다.

[Abstract]

Long-haul transmission of multiple transmission signals, such as wavelength division multiplexed (WDM), has become possible, because the signal distortion caused by chromatic dispersion and nonlinearity can be compensated by applying dispersion management, optical phase conjugation and combination of the two methods into the transmission link. The biggest obstacle to applying optical phase conjugation to an optical link is that the optical phase conjugator (OPC) must be located only in the middle of the entire transmission line. This paper shows that the location constraints of OPC can be overcome through the application of an asymmetric dispersion map. The location of the OPC considered in this paper exists between the 8th and 9th fiber spans out of a total of 48 fiber spans. Additionally, the dispersion map has an asymmetric cumulative dispersion profile with respect to the OPC. As a result of the simulation, it was confirmed that the distortion compensation effect of the WDM channel can be increased compared to the link to which the traditional dispersion map is applied, depending on the overall shape of the cumulative dispersion profile distribution of the proposed asymmetric dispersion map and the selection of the profile slope.

Key word : Asymmetric dispersion map, Non-midway Optical phase conjugation, Residual dispersion per span, OPC position.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2023.27.6.855>



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 5 December 2023; Revised 14 December 2023

Accepted (Publication) 18 December 2023 (29 December 2023)

*Corresponding Author; Seong-Real Lee

Tel: +82-61-240-7264

E-mail: reallee@mmu.ac.kr

I. 서론

표준 단일 모드 광섬유 (SSMF; standard single-mode fiber)는 모드 간 분산 (inter-modal dispersion)을 최소화하기 때문에 파장 분할 다중 (WDM; wavelength division multiplexing) 광 네트워크로 구성된 넓은 대역폭의 광통신 시스템에 유리한 것으로 입증되었다 [1]. 하지만 SSMF가 가지는 감쇠(attenuation)와 색 분산(chromatic dispersion)은 광 통신 링크의 성능에 상당한 영향을 미친다.

감쇠로 인해 신호가 크게 저하되기 때문에 장거리 전송을 위해서는 신호의 증폭이 필요하다. 이러한 맥락에서 에르븀 첨가 광섬유 증폭기 (EDFA; erbium-doped fiber amplifier)는 광 신호가 전기 신호 도메인으로 변환되고 결국 다시 광 신호로 변환되는 과정을 거치지 않기 때문에 SSMF 기반 광 전송 링크에서 중추적인 역할을 하고 있다 [1]. 하지만 안타깝게도 EDFA에 의해 전송되는 광 신호의 강도가 증가하게 되면 자기 위상 변조 (SPM; self-phase modulation)와 같은 비선형 Kerr 효과에 의한 왜곡이 추가적으로 발생하게 된다 [2].

비선형 Kerr 효과에 의한 왜곡을 보상하는 광학 기술 중에서 광 위상 공액 (OPC; optical phase conjugation)은 실행 가능한 기술로 입증되었다 [3]-[6]. 이 기술은 전체 전송 링크에 광 위상 공액기 (OPC; optical phase conjugator)를 추가하는 비교적 간단한 수정만을 필요로 하고, 변조 형식과 관계없이 고속 및 이기종 신호를 처리할 수 있다. 또한 WDM과 같은 다중 전송에도 효과적이라고 알려져 있다. 하지만 광 위상 공액에서 대칭성은 우수한 성능을 위해 확보해야 하는 핵심 요소이다. 즉, 전송 링크가 가지는 광 전력 및 누적 분산 프로파일이 OPC에 대해 대칭일 때 비선형 왜곡 보상이 효과적으로 나타난다 [4]. 이 특성에 기인하여 OPC를 전체 전송 링크 중간에만 위치시켜야 하는 시스템을 midway-OPC 시스템이라고 부른다.

반면 SSMF에서 제거 불가능한 신호 파장에 의존하는 색 분산은 광 펄스폭의 퍼짐을 초래하여 데이터 속도를 제한한다 [2]. 다행히도 SSMF와 반대의 분산 특성을 갖는 분산 보상 광섬유 (DCF; dispersion-compensating fiber)를 주기적, 또는 반복적으로 SSMF에 연결하여 링크를 구성하면 전체 누적 분산을 영에 가깝게 (near-zero) 하여 광 펄스폭의 퍼짐을 방지하거나 줄일 수 있다. 이러한 기술을 분산 제어 (DM; dispersion management)라고 하고 [7],[8], 전체 전송 링크를 구성하는 각 광섬유 스패 (fiber span)마다 누적되는 분산을 안배하여 만들어진 전송 링크 전체에 대한 분산 분포 프로파일을 분산 맵 (dispersion map)이라고 한다 [9].

WDM 전송을 위한 SSMF 기반 장거리 전송 시스템에 midway-OPC와 분산 제어 링크를 동시에 적용하면 WDM 채널의 색 분산과 비선형 효과에 기인하는 신호 왜곡 보상이 효과적으로 이루어지는 것을 앞선 연구들을 통해 확인하였다 [10]-[12]. 본 논문은 저자의 선행 연구를 다른 관점에서 확장한 연구 결과를 담고 있다. 구체적으로 설명하면 광 위상 공액이

적용된 링크에서의 이론적 한계인 OPC에 대한 광 전력 및 누적 분산 프로파일의 대칭성을 극복할 수 있는 링크 설계 방안을 제안하고 분석해 보고자 한다. 우선 본 논문에서 고찰하는 OPC는 전체 전송 라인 중간이 아닌 곳인 8개의 광섬유 스패와 40개의 광섬유 스패 사이에 위치한다. 즉 non-midway OPC 시스템에서의 WDM 채널 보상을 살펴본다. 그리고 분산 제어 링크에 적용되는 분산 맵은 non-midway OPC를 중심으로 비대칭 분포를 가진다. 또한 제안하는 분산 맵은 다른 연구에서와 달리 반복적 분포 패턴이 아닌 단일 분포 패턴을 갖는다. 즉 다른 설계 연구에서 제안한 분산 맵보다 간단한 구조를 갖는다.

본 논문에서 제안하는 비대칭성 분산 맵을 갖는 non-midway OPC 시스템을 통해 전송되는 WDM 신호는 다른 선행 논문에서와 같이 960 Gb/s의 전송 속도로 설계되었으며, 이를 위한 WDM 송신기, 수신기와 OPC의 구조와 방식도 다른 선행 논문과 동일하게 하였다.

II. 분산 제어 링크

그림 1은 960 Gb/s WDM 전송을 위한 송신기, 수신기, OPC 및 분산 제어 링크 구조를 나타낸 것이다. 분산 제어 링크는 총 48개 (즉 $n = 48$)의 중계 구간으로 구성되고, OPC는 MUX (multiplexer)로부터 8번째 광섬유 스패 다음에 위치한다 (이를 앞으로 간단히 ‘08vs40 시스템’이라고 부름).

그림 1의 전송 링크에 적용되는 분산 맵의 구조는 그림 2에 보였다. 저자의 앞선 연구에서 얻은 결과에 따라 OPC 위치를 중심으로 전반 전송 구획 (FTS; former-half transmission section)에서의 분산 누적 변화 패턴이 후반 전송 구획 (LTS; latter-half transmission section)에서의 그것과 반대로 되도록 설계하였다. 즉 그림 2(a)에 보인 바와 같이 FTS에서는 첫 번째 광섬유 스패부터 4번째 광섬유 스패까지는 누적 분산이 선형적으로 증가하고 나머지 4개의 광섬유 스패에서는 같은 기울기로 감소하도록 한 반면 LTS에서는 9번째 광섬유 스패부터 28번째 광섬유 스패까지는 누적 분산이 선형적으로 감소하고 나머지 20개의 광섬유 스패에서는 같은 기울기로 증가하도록 하였다 (이 구조를 ‘POS-NEG(positive-negative)’ 구조로 부르기로 함). 아울러 그림 2(a)와는 반대되는 형태의 분산 맵인 ‘NEG-POS’ 구조 (그림 2(b))도 고려하였다.

각 광섬유 스패에서 누적되는 분산은 스패를 구성하는 SSMF 길이 \times SSMF의 분산 계수의 값에 DCF 길이 \times DCF의 분산 계수의 값을 더한 RDPS (residual dispersion per span)의 부호가 양일 때는 증가하고, 음일 때는 감소하게 된다. 본 논문에서 SSMF의 길이는 모든 광섬유 스패에서 80 km로, SSMF의 분산 계수는 17 ps/nm/km로 하였고, DCF의 분산 계수는 -100 ps/nm/km로 하였다. 따라서 각 광섬유 스패에서 DCF의 길이가 13.6 km로 설정되면 RDPS는 0 ps/nm가 되고, DCF의 길이가 13.6 km보다 길면 음, 짧으면 양이 된다.

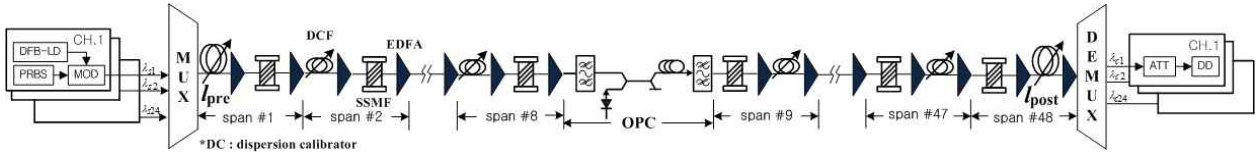


그림 1. 분산 제어 링크와 WDM 시스템의 구조
 Fig. 1. Configuration of dispersion-managed link and WDM system.

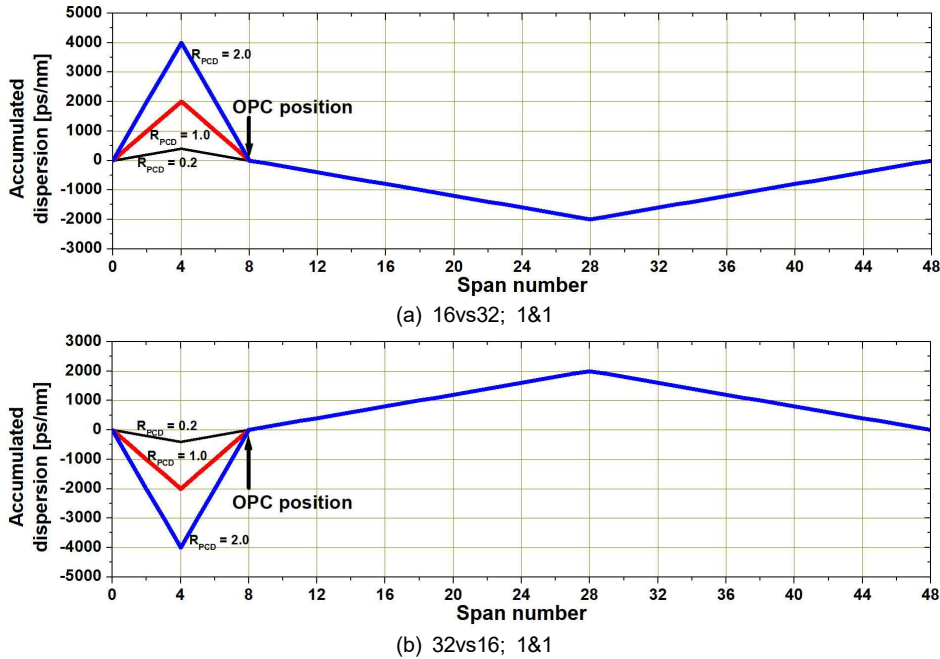


그림 2. 분산 맵
 Fig. 2. Dispersion maps.

각 전송 구획에서의 누적 분산 프로파일의 기울기는 각 광섬유 스펠이 갖는 RDPS 크기에 의해 결정된다. 본 연구에서 설계한 분산 맵은 그림 2에서 알 수 있듯이 LTS에서의 1개의 누적 분산 프로파일에 대해 FTS에서의 누적 분산 프로파일 형태는 3개를 고려하였다. FTS와 LTS에서의 각 광섬유 스펠이 갖는 RDPS의 크기(절대값)가 모두 동일하면 FTS를 구성하는 광섬유 스펠의 개수가 LTS보다 5배 적기 때문에 누적 분산 프로파일의 기울기는 5배 작아진다. 다른 관점에서 보면 이 경우 FTS의 누적 분산 프로파일의 최대치의 절대값은 LTS에서보다 5배 적다. 저자는 이러한 관계를 R_{PCD} (rate of peak cumulative dispersion)으로 정의했고, 이 값은 FTS에서의 누적 분산 최대치를 LTS에서의 누적 분산 최대치로 나누어서 구할 수 있다.

본 논문에서 고려한 R_{PCD} 는 0.2, 1, 2의 3가지이다. 앞서 설명했듯이 $R_{PCD}=0.2$ 는 모든 광섬유 스펠에게 할당되는 RDPS의 크기가 동일한 경우이다. 반면 이외는 반대로 FTS를 구성하는 8개의 광섬유 스펠마다 동일하게 할당되는 RDPS의 크기를 LTS를 구성하는 광섬유 스펠에 할당하는 RDPS 크기보다 5배 크게 하면 R_{PCD} 는 1이 되고, 10배 크게 하면 R_{PCD} 는 2가 된다.

그림 1의 분산 제어 링크를 구성하는 각 광섬유 스펠에서 SSMF의 길이는 모두 80 km이고, SSMF의 분산 계수는 17 ps/nm/km이므로

SSMF에서 누적되는 분산은 1,360 ps/nm이다. 따라서 각 광섬유 스펠에 추가된 DCF의 길이의 변화를 통해 RDPS를 결정하더라도 각 광섬유 스펠의 RDPS는 1,360 ps/nm를 초과할 수 없다. 본 연구에서는 그림 2의 분산 맵에서 누적 분산 프로파일의 기울기 변화를 주기 위해 선택되는 RDPS의 크기를 1,300 ps/nm까지만 고려하였다.

우선 R_{PCD} 값에 따라 구분되는 3가지 분산 맵 모두 LTS에서의 RDPS 크기는 100 ps/nm 부터 1300 ps/nm까지 100 ps/nm 간격으로 변화되도록 하였다. 이러한 동일 조건에서 FTS를 구성하는 광섬유 스펠에 할당되는 RDPS의 크기는 R_{PCD} 에 따라 달라져야 한다. 먼저 $R_{PCD}=0.2$ 인 분산 맵에서는 FTS에서의 RDPS 크기는 LTS와 같은 크기로 변화되어야 한다. 그리고 $R_{PCD}=1$ 인 분산 맵에서는 FTS에서의 RDPS 크기는 10 ps/nm 부터 260 ps/nm까지 10 ps/nm 간격으로, $R_{PCD}=2$ 인 분산 맵에서는 FTS에서의 RDPS 크기는 10 ps/nm 부터 130 ps/nm까지 10 ps/nm 간격으로 변화하도록 하였다.

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 FTS와 LTS 모두 중간 지점까지는 누적 분산 프로파일 이 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 [13]. 이것은 NRD를 0 ps/nm을 포함한 다른 값으로 설정해 주어야 한다는 것을 의미한다. 본 연구에서는 첫 번째 광섬유 스패의 DCF가 이러한 역할을 수행하도록 하였다.

III. WDM 시스템 모델링과 성능 평가

그림 1의 왼쪽과 오른쪽에 표현한 24 채널 각각의 WDM 송신기와 수신기는 각각 강도 변조 (IM; intensity modulation)과 직접 검파 (DD; direct detection) 방식으로 모델링하였다. 또한 분산 제어 링크 내에 있는 OPC는 공액파를 발생시키는 비선형 매질로 HNL-DSF (highly nonlinear - dispersion shifted fiber)를 채택하였다. WDM 송신기, 수신기, 그리고 OPC의 주요 파라미터는 저자의 앞선 논문들과 동일하게 설정하였다.

광 전송 링크를 통해 손실과 비선형 효과의 영향을 겪으면서 전파하는 각 채널들은 비선형 슈뢰딩거 방정식 (NLSE; nonlinear Schrödinger equation)에 의해 표현된다[14]. 본 논문에서 40 Gb/s의 24 채널 WDM 전송을 위한 NLSE의 수치적 시뮬레이션은 단계 분할 푸리에 (SSF; split-step Fourier) 기법[14]에 따라 Matlab으로 구현하여 수행되었다.

제안한 non-midway OPC (즉 08vs40 시스템)를 갖는 분산 제어 링크를 통한 WDM 각 채널의 보상 성능 평가는 수신 광 신호의 아이 다이어그램 (eye diagram) 기반으로 이루어졌다. 24 개 채널들 중 수신 성능이 가장 안 좋은 채널의 아이 다이어그램으로부터 눈 열림 패널티 (EOP; eye opening penalty)와 타이밍 지터 (timing jitter)를 측정하여 평가하였다. 수신 신호의 보상 품질을 평가하는 기준값은 EOP에 대해서는 1-dB, 타이밍 지터에 대해서는 2.0 ps로 하였다. 여기서 1-dB EOP는 10^{-12} 의 비트 에러율 (BER; bit error rate)에 상응하는 값이고, 2.0 ps는 WDM 한 채널 데이터율인 40 Gb/s 신호 주기의 8%에 해당하는 값이다.

IV. 시뮬레이션 결과 및 검토

그림 3은 각 전송 구획에서의 누적 분산 변화 패턴과 각 패턴에서의 R_{PCD} 값에 따라 구분되는 6가지 분산 맵 각각이 그림 1의 분산 제어 링크에 적용된 경우의 최악 채널의 최대 입사 전력을 RDPS 크기 변화에 따라 구한 것이다. 6가지 분산 맵 구조 모두 NRD는 10 ps/nm로 설정시켰다. 최대 입사 전력은 EOP에 대해서는 1-dB가 되는 입사 전력을 의미하고, 타이밍 지터에 대해서는 2.0 ps가 되는 입사 전력 값이다. 그림 3에 보인 최대 입사 전력을 통한 제안된 분산 맵에서의 보상 정도 판단을 위

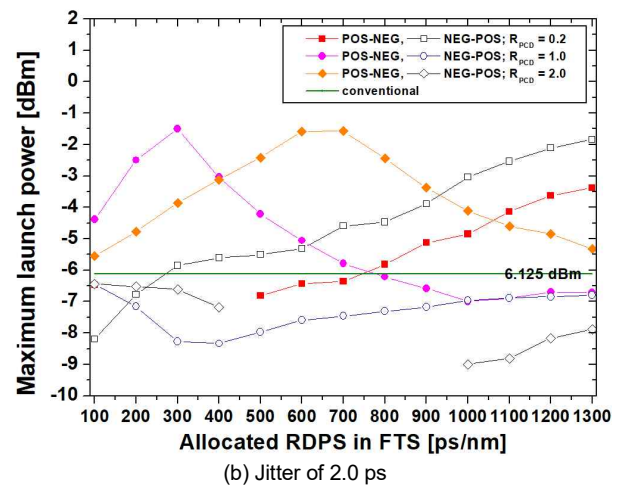
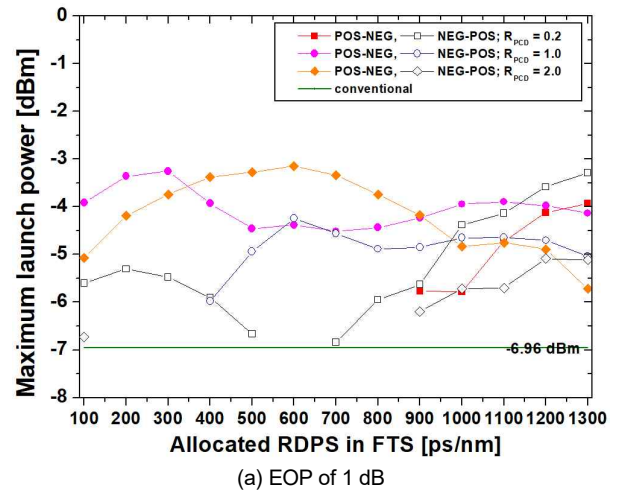


그림 3. 최악 채널의 최대 입사 전력
 Fig. 3. Maximum launch power of the worst channel.

해 전통적 분산 맵 (conventional dispersion map)을 통한 결과도 동시에 나타냈다. 여기서 전통적 분산 맵은 모든 광섬유 스패의 RDPS를 0 ps/nm로 균일하게 분포시킨 구조를 말한다. 그림 3(a)에 표시된 -6.96 dB는 전통적 분산 맵이 그림 1의 링크에 적용됐을 때의 최악 채널의 1-dB EOP를 결과하는 입사 전력이고, 그림 3(b)의 -6.125 dB는 2.0 ps 타이밍 지터를 결과하는 입사 전력이다.

우선 임의로 선택한 최대 RDPS 값으로 설계된 8개 DM에서 pre-DC에 의한 NRD 변화에 따른 최악 채널의 눈 열림 패널티 (EOP; eye opening penalty)를 분석해 보았다. 분석 결과 저자의 다른 연구에서와 마찬가지로 8개의 DM 모두 NRD가 10 ps/nm로 설정된 경우에 가장 우수한 보상이 이루어짐을 확인하였다. 향후 분석에 사용된 8개 분산 제어 링크 모두 pre-DC에 의해 NRD가 10 ps/nm로 설정된 링크를 기본으로 한다.

그림 3을 살펴보면 우선 EOP 특성에 있어 할당된 RDPS 크기에 의존하기는 하지만 제안하는 6개 분산 맵 모두 전통적 구조에서보다 왜곡 보상이 우수하게 나타나는 것을 알 수 있다. 반면 타이밍 지터 특성에 있어서는 할당된 RDPS 크기 전반에

결쳐 $R_{PCD} = 0.2$ 의 구조에서는 NEP-POS 분포에서, $R_{PCD} = 1$ 과 2에서는 POS-NEP 분포에서 양호한 보상을 얻을 수 있는 것을 확인할 수 있다. EOP와 타이밍 지터를 동시에 고려해 그림 3의 결과를 살펴보면 각 광섬유 스펙에 할당되는 RDPS 크기가 300 ps/nm 전후로 비교적 작은 경우에는 $R_{PCD} = 1$ 의 기술기를 갖는 POS-NEP 분포의 분산 맵을, 각 광섬유 스펙에 할당되는 RDPS 크기가 600 ps/nm 전후의 중간 값을 갖는 경우에는 $R_{PCD} = 2$ 의 기술기를 갖는 POS-NEP 분포의 분산 맵을, 각 광섬유 스펙에 할당되는 RDPS 크기가 1000 ps/nm 이상으로 비교적 큰 경우에는 $R_{PCD} = 0.2$ 의 기술기를 갖는 NEP-POS 분포의 분산 맵을 적용할 때 전통적 분산 맵보다 보상 효과를 높일 수 있는 것을 확인할 수 있다.

그림 3에 보인 결과는 전송 링크의 NRD가 10 ps/nm로 설정된 경우에서 얻은 것으로, 이는 저자의 다른 관련 연구에서 도출한 결과와 동일하게 NRD = 10 ps/nm에서 최대 입사 전력을 얻을 수 있었기 때문이다. 하지만 6가지 분산 맵 각각을 전송 링크에 적용하고 NRD에 변화를 준 경우 10 ps/nm가 아닌 다른 값에서도 1-dB EOP와 2.0 ps 타이밍 지터를 얻을 수 있는 입사 전력이 존재한다. 각 분산 맵에 대해 NRD 값에서의 1-dB EOP와 2.0 ps 타이밍 지터를 얻을 수 있는 입사 전력을 구하고 그 값들을 연결하면 폐곡면을 얻을 수 있다. 이 폐곡면의 면적을 성능 면에서 정의하면 유효 입사 전력과 NRD의 곱 (product of effective power and NRD)이고, 이 값이 클수록 해당 분산 맵을 적용했을 때 고품질 보상을 할 수 있는 WDM 채널의 입사 전력과 분산 제어 링크의 NRD의 마진(margin)이 커진다는 것을 의미한다.

그림 4(a)와 (b)는 6가지 분산 맵을 적용한 경우에서 각각 1-dB EOP와 2.0 ps를 얻을 수 있는 유효 입사 전력과 NRD의 곱을 RDPS 크기에 따라 나타낸 것이다. 그래프 내에 황으로 나타낸 선은 전통적 분산 맵을 사용했을 때의 값으로 1-dB EOP 기준에 대해서는 56.5 dBm · (ps/nm)이고, 2.0 ps 타이밍 지터에 대해서는 131.3 dBm · (ps/nm)로 얻어졌다. 그림 4의 결과를 보면 그림 3의 최대 입사 전력 특성과 마찬가지로 각 광섬유 스펙에 할당되는 RDPS 크기가 작은 경우에는 $R_{PCD} = 1$ 의 기술기를 갖는 POS-NEP 분포의 분산 맵을, RDPS 크기가 중간 정도인 경우에는 $R_{PCD} = 2$ 의 기술기를 갖는 POS-NEP 분포의 분산 맵을, 각 광섬유 스펙에 할당되는 RDPS 크기가 큰 경우에는 $R_{PCD} = 0.2$ 의 기술기를 갖는 NEP-POS 분포의 분산 맵을 적용할 때 입사 전력과 NRD 적용의 융통성이 커지는 것을 확인할 수 있다.

V. 결론

1 Tb/p급 WDM 채널들의 장거리 전송에 필요한 색 분산과 비선형성에 의한 왜곡을 보상할 수 있는 OPC가 전체 전송 라인 중간이 아닌 곳에 위치한 경우에도 분산 제어 링크에 적용하는

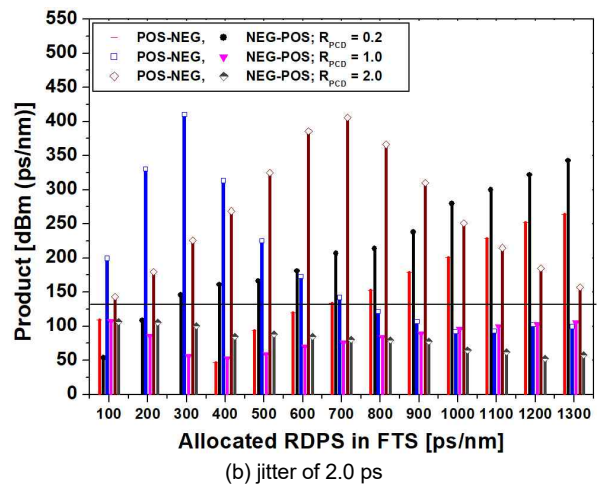
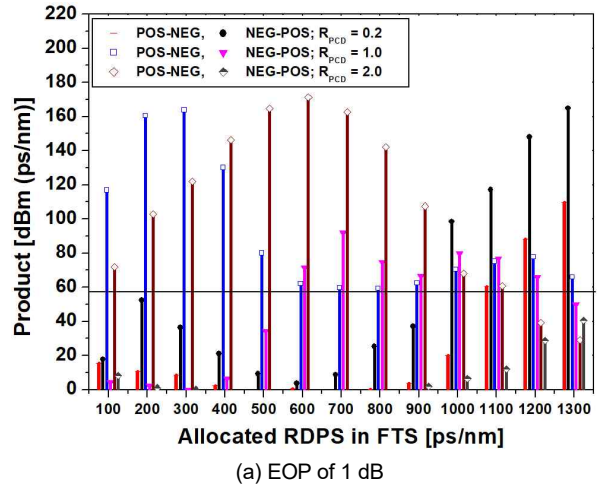


그림 4. 입사 전력과 유효 NRD의 곱
Fig. 4. Product of launch power and effective NRD.

분산 맵이 OPC에 대해 비대칭 구조를 띄워도 효과적 보상이 이루어질 수 있다는 것을 보였다. 물론 분산 제어 링크 설계 조건에 대한 제약이 없는 것은 아니지만 각 광섬유 스펙에 할당되는 RDPS 크기에 따라 분산 맵의 누적 분산 프로파일 분포 형태와 FTS와 LTS에서의 분산의 누적 비율 등을 적절히 선택하면 전통적 분산 맵을 적용한 경우에서보다 최대 입사 전력과 NRD를 증가시킬 수 있다는 것을 알 수 있었다.

본 논문에서 분석한 광 전송 시스템은 OPC 위치를 중심으로 구분되는 FTS의 광섬유 스펙 수와 LTS의 광섬유 스펙 수의 비율이 1:5인 시스템이다. 즉 OPC의 위치가 전체 전송 라인 중간이 아닌 송신기 쪽으로 매우 크게 치우쳐진 구조이다. 광 위상 공역을 통한 왜곡 보상에 있어 OPC의 위치는 보상 품질에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 즉 OPC 위치가 전체 전송로의 중간에서 벗어날수록 수신 성능이 매우 크게 감소한다. 하지만 이러한 이유로 OPC를 중간에 위치시키는 것은 광 위상 공역의 효율성을 떨어트린다. 그렇기 때문에 OPC 위치 변화에 대한 성능 저하를 줄여줄 수 있는 다양한 기술들이 제안되어 왔다.

본 논문의 결과는 non-midway OPC 시스템에서 분산 맵의

적절한 설계와 파라미터 설정만으로도 WDM 채널들의 왜곡 보상을 얻을 수 있고, 그로인해 OPC 위치에 제약을 크게 받지 않는 장거리 WDM 전송 시스템 구축이 가능하다는 것을 보였다. 향후 연구에서는 08vs40 시스템이 아닌 다양한 OPC 위치의 시스템에서의 최적 분산 맵 구조 설계에 대해 연구하고자 한다.

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, Online (Paper ID: 100263), Aug. 2022.
- [2] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, 3rd ed. San Francisco:CA, Academic Press, 2001.
- [3] 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.
- [4] P. Minzioni and A. Schiffrini, "Unifying theory of compensation techniques for intrachannel nonlinear effects," *Optics Express*, Vol. 13, Issue 21, pp. 8460-8468, 2005.
- [5] M.A.Z. Al-Khateeb, M.E. McCarthy, C. Sanchez, and A.D. Ellis, "Nonlinearity compensation using optical phase conjugation deployed in discretely amplified transmission systems," *Optics Express*, Vol. 26, Issue 18, pp. 23945-23959, 2018.
- [6] 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, Issue 3, pp. 1618-1628, 2017.
- [7] B.-H. Choi, M. Attygalle, Y. J. Wen, and S. D. Dods, "Dispersion map optimisation and dispersion slope mismatch effects for 40 channel \times 10 Gbit/s transmission over 3000 km using standard SMF and EDFA amplification," *Optics Communications*, Vol. 242, Issue 4-6, pp. 525-532, Dec. 2004.
- [8] M. Suzuki, "Dispersion managed solitons and their application to high-capacity optical submarine cable systems," *Optik*, Vol. 280, Online (Paper ID: 170771), June 2023.
- [9] 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 (Paper ID: 167006), Sept. 2021.
- [10] 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.
- [11] 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 (Paper ID: 10456), Sept. 2023.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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