

주기적 구조의 분산 맵과 Non-midway 광 위상 공액기에 의한 왜곡된 WDM 신호의 보상

Compensation for Distorted WDM Signals by Periodic-shaped Dispersion Map and Non-midway Optical Phase Conjugator

권순녀¹ · 이 성렬^{2*}

¹한국복지대학교 AI반도체융합학과, ²목포해양대학교 항해정보시스템 학부

Soon-Nyu Kweon¹ · Seong-Real Lee^{2*}

¹Department of AI Semiconductor Convergence, Korea National University of Welfare, Gyeonggi-do, 17738, Korea

²Division of Navigational Information System, Mokpo National Maritime University, Jeollanam-do, 58628, Korea

[요 약]

초광대역 장거리 전송 링크를 구현하기 위해서는 색 분산과 비선형 Kerr 현상에 의한 광 신호 왜곡을 보상해야 한다. 본 논문에서는 왜곡된 파장 분할 다중 채널을 보상하기 위한 분산 제어와 광 위상 공액을 결합한 링크를 제안하였다. 제안하는 분산 제어 링크에서의 분산 맵 프로파일은 일정한 주기로 반복하는 형태이고, 이러한 분산 제어 링크에서 광 위상 공액기는 전체 전송로 중간뿐만 아니라 여러 다양한 곳에 위치시켰다. 시뮬레이션 결과 제안하는 분산 제어 링크에서 중계 구간의 잉여 분산 (RDPS; residual dispersion per span)을 비교적 큰 값으로 선택하면 광 위상 공액기가 전체 전송로 중간이 아닌 non-midway OPC 시스템에서 왜곡된 파장 분할 다중 채널의 보상을 전통적인 구조의 분산 제어 링크에서 보다 개선시킬 수 있는 것을 확인하였다.

[Abstract]

In order to install ultra wide band and ultra long-haul transmission link based on standard single mode fiber, optical signal distortion due to chromatic dispersion and nonlinear Kerr effect must to be compensated. In this paper, optical link consisted of dispersion management and optical phase conjugation is proposed for compensation of the distorted wavelength division multiplexed (WDM) channels. Dispersion map profile in the proposed dispersion-managed link is configured by periodic repetitive shape, and optical phase conjugator is placed at various position including the midway of total transmission length. It is confirmed from simulation results that when the residual dispersion per span (RDPS) selected in the proposed dispersion-managed link to be large, the compensation of distorted WDM channels in the non-midway OPC system is more improved than the conventional dispersion-managed link.

Key word : Dispersion map, Periodic repetitive shape, Residual dispersion per span, Optical phase conjugation, Non-midway.

<https://doi.org/10.12673/jant.2022.26.1.22>



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 January 2022; Revised 4 February 2022
Accepted (Publication) 23 February 2022 (28 February 2022)

*Corresponding Author; Seong-Real Lee

Tel: +82-61-240-7264

E-mail: reallee@mmu.ac.kr

I. 서론

과장 분할 다중화 (WDM; wavelength division multiplexing) 와 ROADM (reconfigurable optical add/drop multiplexing)은 수 백 Gb/s를 넘어 Tb/s 급 초고속 광전송이 가능하도록 발전되어 왔다. 이러한 발전은 광 전달 매질로 사용하고 있는 표준 단일 모드 광섬유 (SSMF; standard single mode fiber)가 본질적으로 가지고 있는 색 분산 (chromatic dispersion)과 비선형 Kerr 효과에 의한 광 펄스의 시간과 주파수 영역의 왜곡을 보상할 수 있기 때문에 가능했다.

색 분산에 의한 WDM 채널 등의 광 신호 왜곡은 SSMF와 반대의 분산 특성을 갖는 분산 보상 광섬유 (DCF; dispersion compensating fiber)를 SSMF 전이나 후에 삽입하여 광 신호의 시간 퍼짐 (temporal broadening)을 최소화하는 분산 제어 (DM; dispersion management)가 가장 대표적이다[1]-[3].

인접 채널 신호에 왜곡을 유발하는 자기 위상 변조 (SPM; self-phase modulation), 상호 위상 변조 (XPM; cross-phase modulation), 4-광파 혼합 (FWM; four-wave mixing)과 자기 신호에 왜곡을 발생시키는 inter-channel SPM, inter-channel XPM, inter-channel FWM 등의 비선형 Kerr 효과의 제거나 감소는 디지털 back-propagation 등의 디지털 방식 [4],[5], 광 위상 공액 (optical phase conjugation) 등의 광학 방식 [6]-[8]과 광전 변환 회로를 이용하는 광전(optoelectric) 방식 [9], [10]을 통해 가능하다.

각 방식마다 기술적 관점에서 장점과 단점이 있지만 시스템 구성 면에서는 광학 방식으로 비선형 Kerr 효과를 보상하는 것이 유리하다. 하지만 광 위상 공액은 분산 프로파일과 광 전력 프로파일이 광 위상 공액기 (OPC; optical phase conjugator)를 중심으로 대칭되어야 하기 때문에 OPC가 전체 전송로 중간에 위치해야 하는 한계를 갖는다 [6], [11]. 즉 광 위상 공액을 채택한 광전송 링크의 구조는 토폴로지(topology) 면에서 유연성이 떨어진다.

다행스럽게도 광 위상 공액과 DM을 전송 링크에 결합하면 OPC가 중간이 아닌 곳 (이를 ‘non-midway OPC’라고 부름)에 위치하더라도 색 분산과 비선형 Kerr 효과에 의한 왜곡을 동시에 보상할 수 있다 [12]-[16]. 이와 관련하여 저자가 그동안 발표한 연구 결과를 살펴보면, RDPS(residual dispersion per span)가 모든 중계 구간 (fiber span)에서 동일하게 설정된 DM 링크에 OPC를 다양한 곳에 위치시켜도 각 경우에 따라 정도의 차이는 있지만 960 Gb/s WDM 채널들의 왜곡 보상이 효과적으로 이루어지는 것을 확인하였다 [14]-[16].

지금까지의 non-midway OPC 관련 저자의 연구는 각 중계 구간의 RDPS가 하나의 동일한 값인 경우로, 이렇게 설계된 DM 링크의 분산 프로파일, 즉 분산 맵 (dispersion map)은 매우 간단해지는 장점을 갖는다. 하지만 DM의 전체적 구성이 다소 복잡하게 설계되더라도 non-midway OPC를 통한 WDM 채널의 보상 정도를 더욱 개선시키는 것이 초고속 광전송 시스템

의 유연한 구현에 더욱 적합할 것이다.

본 연구에서는 960 Gb/s (= 40 Gb/s × 24 채널) WDM 채널 전송을 위한 DM 링크에 OPC가 추가되는 링크 구조에서 OPC 위치가 전체 전송로 중간에서 크게 이격되더라도 색 분산과 비선형 Kerr 효과에 의한 왜곡을 효과적으로 보상할 수 있는 분산 맵을 제안하고자 한다. 제안하는 분산 맵의 구조는 전체 전송로에서 주기성을 띠도록 하였다. 좀 더 구체적으로 설명하면 8개 중계 구간 간격으로 분산 맵의 프로파일이 반복하도록 설계하였고, 이 구조의 링크에서 OPC는 전체 중계 구간 수의 1:9, 2:8, 3:7, 4:6, 5:5, 6:4, 7:3, 8:2, 그리고 9:1에 해당하는 곳에 위치하도록 하였다.

II. 분산 맵과 non-midway OPC

그림 1은 본 연구에서 고찰하고 있는 960 Gb/s WDM 전송을 위한 링크의 구조를 나타낸 것이다. 전체 전송로는 $n = 80$ 개의 중계 구간을 가진다. OPC는 m 번째 중계 구간 다음에 위치하도록 하였고, m 은 8개의 중계 구간 간격으로 달라지도록 하였다. 시뮬레이션 결과의 해석의 간편성을 위해 OPC의 위치를 $m/8$ 대 $(n-m)/8$ 으로 표현하였다. 즉 OPC 위치에 따라 1vs9, 2vs8, 3vs7, 4vs6, 5vs5, 6vs4, 7vs3, 8vs2, 1vs9의 구조 각각에서의 960 Gb/s WDM 채널의 왜곡 보상 특성을 살펴보았다.

그림 1에서 보는 바와 같이 각 중계 구간은 SSMF와 DCF로 구성된다. 그림 1에서 SSMF의 길이(l_{SMF})는 모든 중계 구간에서 80 km로 동일하게 하였다. SSMF의 손실 계수 (α_{SMF})는 0.2 dB/km, 분산 계수 (D_{SMF})는 17 ps/nm/km, 그리고 비선형 계수 (γ_{SMF})는 $1.35 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ (@1,550 nm)로 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 DCF의 분산 계수 (D_{DCF})는 -100 ps/nm/km, 손실 계수 (α_{DCF})는 0.6 dB/km로, 비선형 계수 (γ_{DCF})는 $5.06 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ (@1,550 nm)로 설정하였다.

RDPS는 각 중계 구간에 누적되는 잉여 분산량, 즉 $(l_{SMF} \times D_{SMF}) - (l_{DCF} \times D_{DCF})$ 으로 정의된다. 본 연구에서 l_{SMF} , D_{SMF} 와 D_{DCF} 를 고정시켰기 때문에 DCF의 길이, 즉 l_{DCF} 에 의해 ± 20 ps/nm부터 $\pm 1,340$ ps/nm까지 ± 20 ps/nm 간격으로 RDPS가 변화되도록 하였다.

그림 2는 RDPS에 의해 형성되는 전체 전송 링크의 분산 맵을 보인 것이다. 앞서 언급한 8개의 중계 구간 주기로 분산 맵의 프로파일 형태가 반복되도록 하였다. 그림 2의 분산 맵을 살펴보면, 그 형태가 2가지로 구분된다. 8개 중간 구간 단위로 하나는 삼각파 (triangular-wave) 모양이 양(positive)의 누적 분산 (accumulated dispersion)을 가지고 다음에 음(negative)의 누적 분산을 갖는다. 이를 우리는 삼각파 형태 (triangular-wave form)라 칭하였다. 반면 나머지 하나는 삼각파 형태의 프로파일과 반대의 모양을 띤다. 이를 역 삼각파 형태 (inverse triangular-wave form)라 칭했다.

결과적으로 본 연구에서 제안하는 전송 링크는 OPC 위치

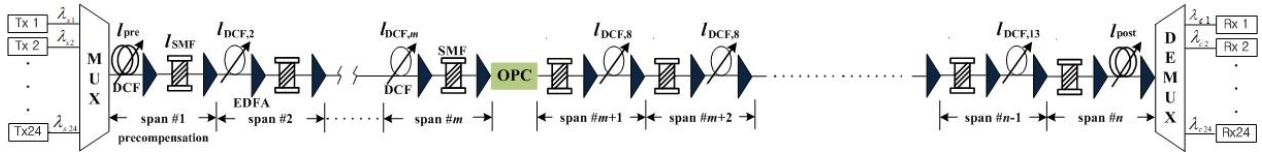


그림 1. 960 Gb/s WDM 전송 시스템 구조
 Fig. 1. Configuration of 960 Gb/s WDM transmission system.

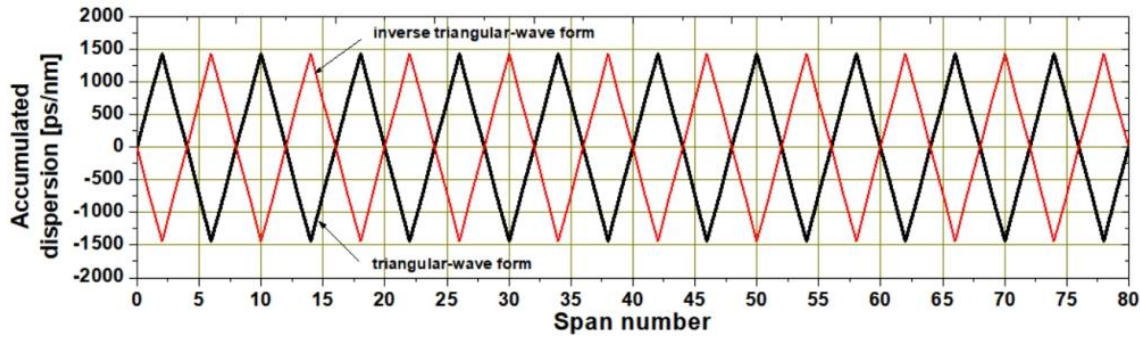


그림 2. 두 가지 형태의 분산 맵
 Fig. 2. Two types of dispersion map.

에 따라 8개 중계 간격 단위로 분산 맵이 주기적으로 반복하는 구조를 갖는다. 예를 들어 3vs7 구조에서는 OPC 이전 - 이를 전반 전송 구획 (FHS; former half section)이라 부름 -에서는 3개의 삼각파 형태 또는 역 삼각파 형태의 분산 프로파일이 반복하고, 반면 OPC 이후 - 이를 후반 전송 구획 (LHS; latter half section)이라 부름 -에서는 7개의 삼각파 형태 또는 역 삼각파 형태의 분산 프로파일이 반복하는 구조가 된다.

전체 전송 링크에서 누적된 총 분산량 (NRD; net residual dispersion)은 RDPS에 의존한다. 따라서 중계 구간 수가 많으면 많을수록 NRD는 증가하게 된다. 하지만 앞선 연구들을 통해 NRD는 0 ps/nm은 아니지만 그 근처의 값을 가져야 WDM 채널의 왜곡 보상에 효과적이라는 것을 확인하였다 [14]-[16]. 이 결과는 RDPS가 어떠한 값으로 설정되더라도 NRD를 0 ps/nm의 근처 값으로 갖게 해주어야 한다는 것을 의미한다. 본 연구에서도 선행 연구에서와 같이 첫 번째 중계 구간의 DCF와 마지막 중계 구간의 DCF가 이러한 역할을 수행하도록 하였다. 첫 번째 중계 구간의 DCF 길이 조정으로 NRD를 결정하는 것을 pre-DC (dispersion calibration)라고 부르는 반면 마지막 중계 구간의 DCF 길이의 조정을 통해 NRD를 결정하는 방법을 post-DC라고 부른다. 본 연구에서는 pre-DC에 의해서만 전체 전송 링크의 NRD를 조정하도록 하였다. 좀 더 구체적으로 설명하면, 우선 post-DC에 의해 LHS에서의 NRD는 RDPS 설정 값에 관계없이 항상 0 ps/nm가 되도록 하였고, 동시에 pre-DC에 의해서만 전체 전송 링크의 NRD가 변화하도록 하였다.

그림 1에 보인 24 채널의 WDM 송신기와 수신기 구조와 사양은 참고 문헌 [14]-[16]과 동일하게 설정하였다. 또한 FHS를 전파해 온 왜곡된 광 신호를 공역 변화하는 OPC의 구조와 사양도 참고 문헌 [14]-[16]과 동일하게 모델링하였다. 24개 채널 각각의 중심 파장은 DWDM (dense WDM) 파장 표준인 ITU-T

Recommendation G.694.1에 따라 100 GHz (즉 0.8 nm) 간격으로 1,550 nm부터 1,568.4 nm로 설정하였다 [17].

광 전송 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 수행되었다.

III. 시뮬레이션 결과 및 검토

그림 3은 그림 1의 링크에서 RDPS의 변화에 따른 최악 채널의 눈 열림 패널티 (EOP; eye opening penalty)를 나타낸 것이다. 같은 조건이라고 하더라도 WDM 채널의 입사 전력에 따라 EOP가 달라진다. 그림 3의 결과들은 OPC 위치에 따라 다르게 설정된 입사 전력에 대한 EOP의 평균값을 보인 것이다. 좀 더 구체적으로 설명하면 1vs9와 1vs9 구조에서는 WDM 채널의 입사 전력을 1 dB 간격으로 -9 dBm부터 -5 dBm로 설정하여 전송한 경우 각각의 입사 전력에서 얻은 EOP를 평균한 결과이고, 2vs8와 8vs2 구조에서는 -9 dBm부터 -3 dBm까지, 3vs7와 7vs3 구조에서는 -9 dBm부터 -1 dBm까지, 4vs6와 6vs4 구조에서는 -9 dBm부터 +2 dBm까지, 5vs5 구조에서는 -9 dBm부터 +3 dBm까지 입사 전력에 대한 EOP의 평균값을 보인 것이다. 또한 그림 3의 결과 중 “conventional”은 분산 맵의 모양이 삼각파 형태나 역 삼각파 형태가 아닌 모든 중계 구간의 RDPS가 일정한 DM 링크에서 얻은 EOP이다.

그림 3의 결과를 살펴보면, 우선 분산 맵의 프로파일 형태와 OPC 위치에 크게 상관없이 RDPS 크기가 증가할수록 보상 특

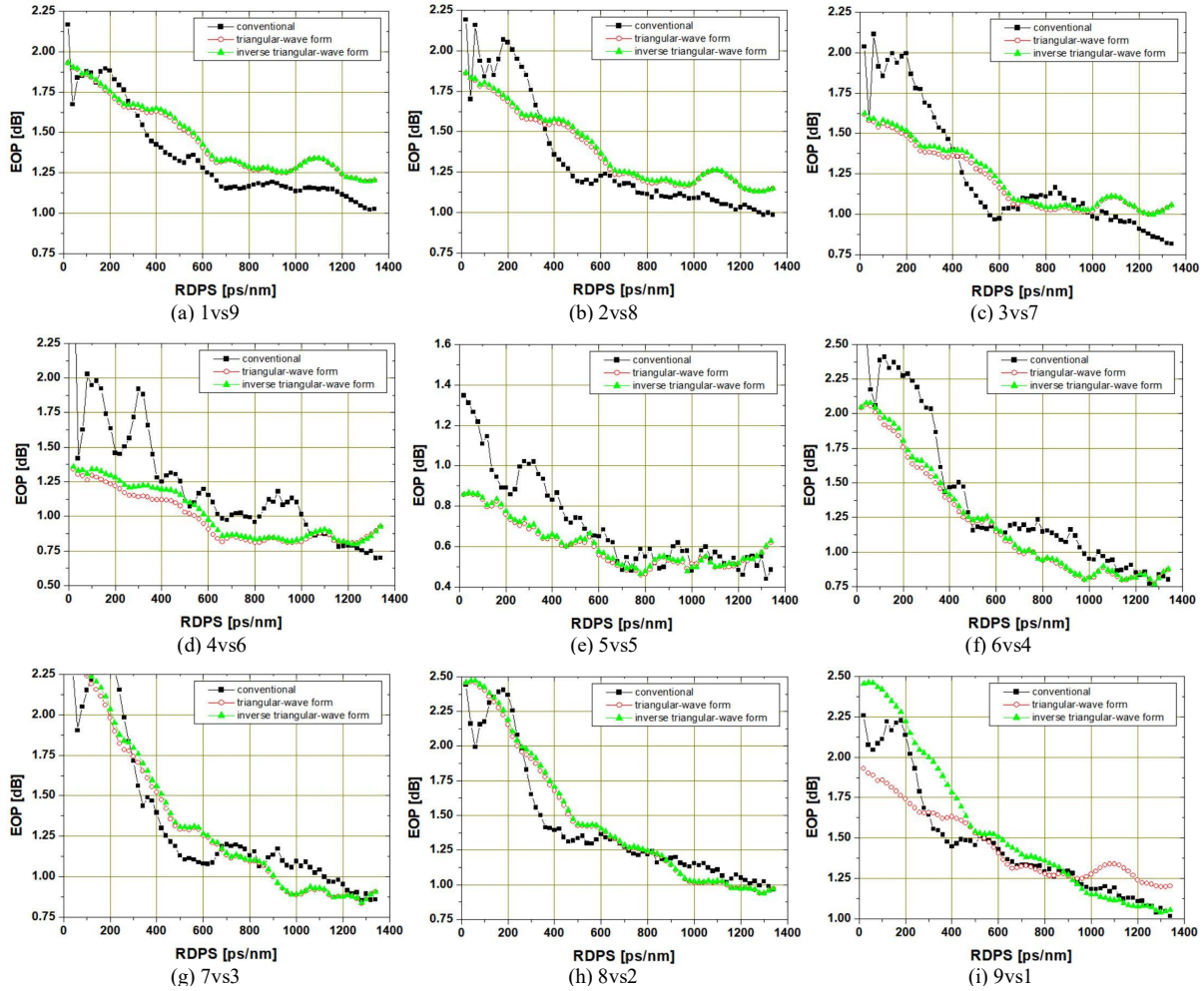


그림 3. RDPS 변화에 따른 최악 채널의 눈 열림 페널티

Fig. 3. Eye opening penalty of worst channel as a function of RDPS variation.

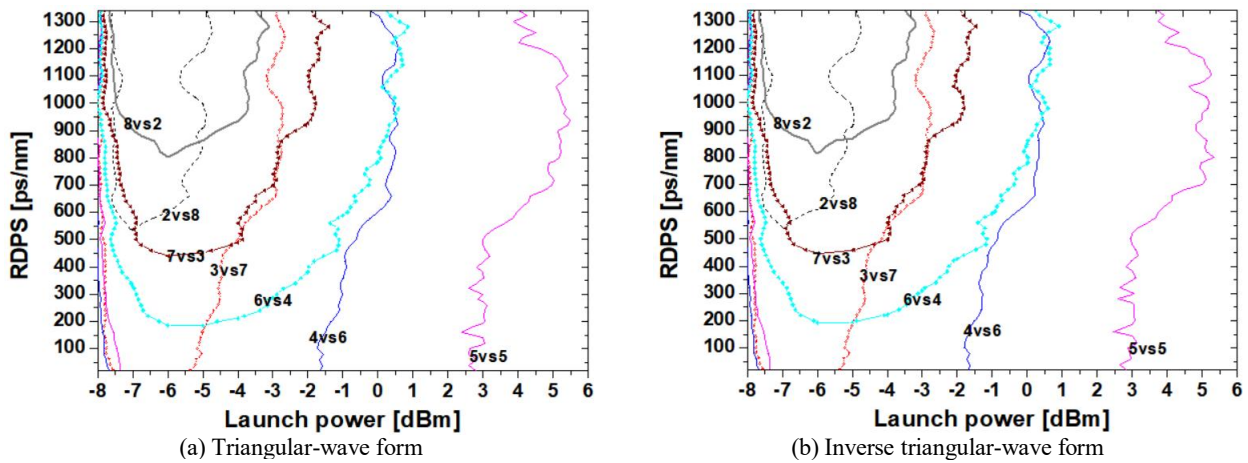


그림 4. 입사 전력 대 RDPS 1 dB EOP 등고선

Fig. 4. Contours of 1 dB EOP resulting from relation of launch power and RDPS.

성이 좋아지는 것을 알 수 있다. 그리고 OPC가 중간이나 그 근처에 위치한, 즉 4vs6, 5vs5, 6vs4인 경우 RDPS가 1,200 ps/nm

이하로 적은 선택된 링크에서는 RDPS 크기에 크게 영향을 받지 않고 주기적인 삼각파 형태와 역 삼각파 형태의 프로파일을

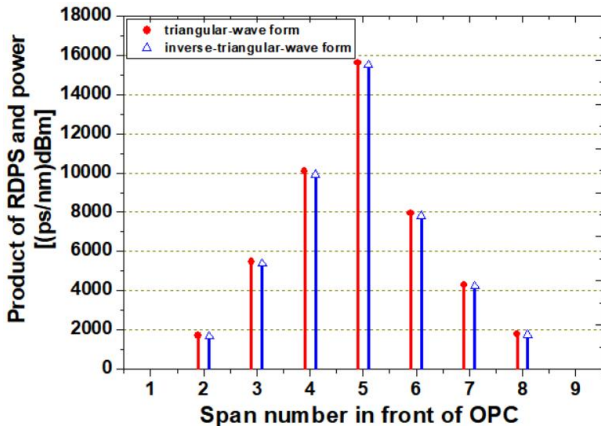


그림 5. RDPS와 입사 전력의 곱
Fig. 5. Product of RDPS and launch power.

갖는 링크들이 conventional 구조에서보다 개선된 보상이 가능한 것을 확인할 수 있다.

반면에 OPC가 송신부에 가깝게 위치한 링크 (즉 1vs9, 2vs8, 3vs7 구조)에서는 RDPS 크기가 작을수록, 그리고 OPC가 수신부에 가깝게 위치한 링크 (즉 7vs3, 8vs2, 9vs1 구조)에서는 RDPS 크기가 클수록 conventional 구조에서의 보상보다 제안하는 분산 맵을 갖는 링크를 통해 더욱 개선된 보상을 얻을 수 있는 것을 확인할 수 있다.

그림 4는 WDM 채널의 입사 전력과 제안하는 DM 링크의 RDPS에 변화를 준 경우 1 dB EOP를 만들 수 있는 둘 사이의 범위를 나타낸 것이다. 그림 4의 결과는 등고선(contour) 형태를 갖는다. 간편한 비교 분석을 위해 그림 4에 나타낸 각 등고선의 면적을 구해 그림 5에 나타냈다. 여기서 각 등고선의 면적은 결과적으로 RDPS와 입사 전력의 곱 (product of RDPS and launch power)을 의미한다. 그림 4의 (a)와 (b), 그리고 그림 5를 살펴보면 제안하는 DM 링크의 분산 맵의 주기적인 프로파일 형태에 관계없이 보상 특성이 매우 비슷한 것을 알 수 있다. 즉 제안하는 주기적인 분산 맵 구조를 갖는 DM 링크를 이용한 WDM 채널들의 왜곡 보상 정도는 삼각파 형태나 역 삼각파 형태의 분산 맵 프로파일 형태에 크게 영향받지 않는다는 것을 확인할 수 있다.

그림 3의 결과는 OPC 위치에 따라 입사 전력을 각각 다르게 고려한 경우에서의 EOP의 평균값을 보인 것이다. EOP의 평균값이 큰 값을 가지면 가질수록 실제 임의의 하나의 입사 전력에 대한 EOP는 1보다 매우 큰 값을 가진다는 것을 확인할 수 있다. 또한 시뮬레이션을 통해 확인한 결과 OPC가 송신부 또는 수신부에 매우 가깝게 위치한 1vs9, 2vs8, 8vs2, 9vs1 구조에서 RDPS가 $|\pm 1,000 \text{ ps/nm}|$ 보다 적게 설정된 경우에는 1 dB 이하의 EOP를 얻을 수 있는 입사 전력이 존재하지 않는다는 것도 동시에 확인할 수 있다. 이러한 결과들은 OPC 위치에 상관없이 양호한 보상을 얻을 수 있는 RDPS를 $|\pm 1,000 \text{ ps/nm}|$ 이하에서 선택해야 한다는 것을 의미한다.

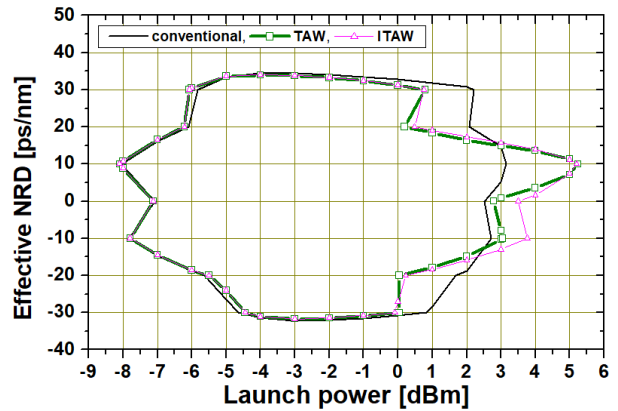


그림 6. 5vs5 구조에서의 입사 전력에 따른 유효 NRD
Fig. 6. Effective NRD as a function of launch power in 5vs5 scheme.

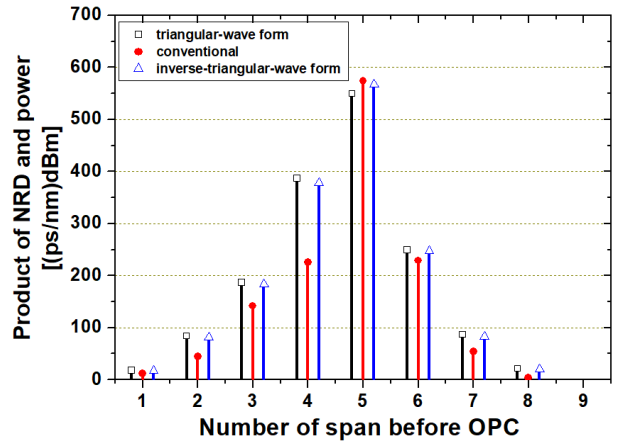


그림 7. 유효 NRD와 입사 전력의 곱
Fig. 7. Product of effective NRD and launch power.

그림 6은 RDPS가 $|\pm 1,000 \text{ ps/nm}|$ 로 설정되고 OPC가 전체 전송로 중간에 위치한 5vs5 구조에서 입사 전력에 따른 최악 채널의 유효 NRD를 나타낸 것이다. 여기서 유효 NRD란 EOP를 1 dB로 만드는 NRD 범위를 말한다. 그림 4의 결과를 가지고 그림 5를 얻었듯이, 그림 6의 유효 NRD도 등고선 형태를 가지므로 각 경우에 대해 면적을 구할 수 있다.

그림 7은 본 연구에서 제안하는 주기적 분산 맵 프로파일이 $|\pm 1,000 \text{ ps/nm}|$ 의 RDPS에 의해 만들어진 DM 링크에서 OPC 위치에 따른 유효 NRD와 입사 전력의 곱 (product of NRD and launch power)을 나타낸 것이다. 그림 7의 결과를 살펴보면, 우선 본 논문에서 제안하는 주기적 분산 맵 프로파일 형태를 갖는 DM 링크를 5vs5, 즉 OPC가 전체 전송로 중간에 위치한 일반적인 MSSI 시스템에 적용하는 경우 conventional 구조에 비해 의미 있는 왜곡 보상이 얻어지지 못한다는 것을 알 수 있다. 하지만 OPC가 전체 전송로 중간으로부터 벗어난 경우, 즉 non-midway OPC 시스템에 제안하는 주기적 분산 맵 프로파일 형태를 갖는 DM 링크에서 RDPS를 적절히 선택 (본 논문에서

는 $|\pm 1,000 \text{ ps/nm}|$)를 선택하고 적용하면 conventional 구조에 비해 WDM 채널의 왜곡 보상을 더욱 신장할 수 있고, 또한 광 네트워크 구조의 유연성을 더욱 확보할 수 있다는 것을 알 수 있다. 특히, OPC가 송신부에 가깝게 위치한 non-midway 시스템에서 더욱 개선된 보상과 이에 따른 네트워크 구성에서의 신장된 유연성을 얻을 수 있는 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

지금까지 주기적으로 반복하는 프로파일 형태의 분산 맵을 갖는 분산 제어 링크에 광 위상 공역을 결합하여 왜곡된 WDM 채널을 보상하는 경우 OPC 위치와 분산 맵의 형태에 따른 보상 특성을 살펴보았다. 우선 주기성을 띠는 분산 맵의 형태, 즉 삼각과 형태나 역 삼각형 형태는 왜곡된 WDM 채널의 보상에 큰 차이를 주지 않는 것을 확인하였다. 또한 OPC 위치에 상관 없이 RDPS의 크기가 증가할수록 제안하는 분산 맵을 갖는 분산 제어 링크에서의 보상 효과가 전통적인 분산 제어 링크를 적용하는 경우보다 개선되는 것을 알 수 있었다.

본 연구를 통해 얻을 수 있는 가장 중요한 결과는 RDPS를 비교적 큰 값으로 적절히 선택하면, 예를 들어 1,000 ps/nm, 주기적 분산 맵 프로파일을 갖는 분산 제어 링크를 통해 OPC가 전체 전송로 중간에서 벗어나 위치하는 non-midway OPC 시스템에서 왜곡된 WDM 신호의 보상 효과를 전통적인 분산 제어 링크를 통한 보상보다 크게 얻을 수 있다는 것이다. 이러한 결과는 분산 제어와 광 위상 공역을 결합하는 링크의 설계에 있어 유연성과 확장성을 동시에 제고할 수 있다는 것을 의미한다.

REFERENCES

- [1] 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.
- [2] T. Almeida, M. Drummond, N. Pavlovic, P. Andr'e, and R. Nogueira, "A fast method for launch parameter optimization in long-haul dispersion-managed optical links," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 33, No. 20, pp. 4303-4310, Oct. 2015.
- [3] I. Joindot, "Dispersion map optimization in hybrid raman/erbium-doped fiber amplifier-based 40-Gb/s link," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 17, No. 7, pp. 1555-1557, 2005.
- [4] J. Shao, S. Kumar, and X. Liang, "Digital back propagation with optimal step size for polarization multiplexed transmission," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 25, No. 23, pp. 2327-2330, Dec. 2013.
- [5] X. Liang and S. Kumar, "Multi-stage perturbation theory for compensating intra-channel nonlinear impairments in fiber-optic links," *Optics Express*, Vol. 22, No. 24, pp. 29733-29745, 2014.
- [6] S. Watanabe and M. Shirasaki, "Exact compensation for both chromatic dispersion and Kerr effect in a transmission fiber using optical phase conjugation," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 14, No. 3, pp. 243-248, Mar. 1996.
- [7] M. D. Pelusi, "WDM signal all-optical pre-compensation of the fiber nonlinearity in dispersion-managed links," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 25, No. 1, pp. 71-74, Jan. 2013.
- [8] X. Liang and S. Kumar, "Optical back propagation for compensating nonlinear impairments in fiber optic links with ROADMs," *Optics Express*, Vol. 24, No. 20, pp. 22682-22692, Oct. 2016.
- [9] B. Foo, B. Corcoran, C. Zhu, and A. J. Lowery, "Distributed nonlinear compensation of dual-polarization signals using optoelectronics," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 28, No. 20, pp. 2141-2144, Oct. 2016.
- [10] B. Foo, B. Corcoran, and A. J. Lowery, "Distributed nonlinear compensation using optoelectronic circuits," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 36, No. 6, pp. 1326-1339, Mar. 2018.
- [11] L. N. Venkatasubramani, A. Sobhanan, A. Vijay, R. D. Koilpillai, and D. Venkitesh, "Optical phase conjugation using nonlinear SOA for nonlinearity and dispersion compensation of coherent multi-carrier lightwave systems," *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 44059-44068, Mar. 2021.
- [12] A. Chowdhury and R. J. Essiambre, "Optical phase conjugation and pseudolinear transmission," *Optics Letters*, Vol. 29, No. 10, pp. 1105-1107, 2014.
- [13] X. Xiao, C. Yang, S. Gao, and Y. Tian, "Partial compensation of Kerr nonlinearities by optical phase conjugation in optical fiber transmission systems without power symmetry," *Optical Communications*, Vol. 265, No. 1, pp. 326-330, 2016.
- [14] S. R. Lee, "Dispersion-managed optical links combined with asymmetrical optical phase conjugation for compensating for distorted WDM signals," *Journal of Information Communication Convergence Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 71-77, Jun. 2016.
- [15] H. B. Yim and S. R. 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, Nov. 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] ITU Recommendation G.694.1, Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid, 2006.

[18] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, 3rd ed. San Francisco: CA, Academic Press, 2001.



권 순녀 (Soon-Nyu Kweon)

1991년 2월 : 서울과학기술대학교 전자공학과 (공학사), 1995년 8월 : 숭실대학교 정보과학대학원 공업교육학과전산전공 (공학석사)
2006년 8월 : 한국항공대학교 대학원 통신정보공학과 (공학박사), 1991년 1월~1995년 1월 : (주)맥스텔레콤(선임연구원)
1995년 5월~1998년12월: 한국교육개발원 & 한국직업능력개발원(연구원)
1999년1월 ~2005년2월 : 블루버드시스템, H& T(책임연구원)
2005년 3월~현재 : 국립한국복지대학교 시반도체융합과 교수
※관심분야 : 인공지능, 가상현실, 빅데이터, 반도체융합기술, 광통신융합기술



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