

## Non-midway 광 위상 공액기를 중심으로 중계 구간 당 잉여 분산이 일치하지 않는 분산 제어 링크

### Dispersion-managed Link with Unequally Residual Dispersion per Span with Respect to Non-midway Optical Phase Conjugator

이 성 렬

목포해양대학교 항해정보시스템 학부

Seong-Real Lee

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

#### [요 약]

장거리 파장 분할 시스템을 위해 해결해야 하는 광 색 분산과 비선형 현상에 의한 광 신호 왜곡을 보상할 수 있는 광 위상 공액과 결합된 분산 제어 링크를 네트워크 토폴로지의 유연성 관점에서 제안하고 분석하였다. 비선형 효과에 의해 왜곡되는 광 신호의 보상을 위해 적용된 광 위상 공액기는 전체 전송로 중간이 아닌 곳에 위치시켰다. 그리고 광 위상 공액기를 중심으로 전반 전송 구획과 후반 전송 구획을 구성하는 각각의 중계 구간의 잉여 분산 (RDPS; residual dispersion per span)을 서로 다르게 한 분산 제어 링크를 적용하였다. 각 중계 구간의 RDPS가 전반 전송 구획과 후반 전송 구획의 전체 잉여 분산을 같게 만드는 값이 아닌 그 근처의 서로 다른 값으로 결정되어야 왜곡된 광 신호 보상에 효과적이라는 것을 시뮬레이션 결과를 통해 확인하였다.

#### [Abstract]

Optical dispersion-managed link combined with optical phase conjugation for compensating of the distorted optical signals due to chromatic dispersion and nonlinear effects, which is required to implement long-haul wavelength division multiplexed system, is proposed and assessed in viewpoint of network topology flexibility. Optical phase conjugator capable to compensate for the distorted optical signal due to nonlinear effects is placed non-midway of total transmission distance. And, in dispersion-managed link, residual dispersion per span (RDPS) of each fiber spans in former half section and latter half section with respect to optical phase conjugator are different to each other. Simulation results show when the RDPS of each fiber sections in one half section makes it's own net residual dispersion slight different from another half section's net residual dispersion, the compensation effect in the proposed link configuration is more increased.

**Key word** : Residual dispersion per span, Dispersion-managed link, Optical phase conjugation, Non-midway, Unequal RDPS.

<https://doi.org/10.12673/jant.2021.25.6.517>



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 15 November 2021; Revised 1 December 2021  
Accepted (Publication) 24 December 2021 (30 December 2021)

\*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 전송 대역폭이 매우 넓기 때문에 초광대역 장거리 전송 매질로 사용하고 있다. 하지만 SSMF는 17 ps/nm/km 정도의 분산 계수를 갖기 때문에 색 분산 (chromatic dispersion)의 영향에서 자유로울 수가 없어 전송되는 광 펄스의 시간 퍼짐 (temporal broadening)을 나타나게 하여 이론적인 전송률을 달성할 수 없다[1]. 또한 SSMF를 이용하여 장거리 전송이 가능한 이유는 적당한 간격으로 삽입되는 에르븀 첨가 광섬유 증폭기 (EDFA; erbium-doped fiber amplifier)와 같은 분포형 광 증폭기를 통해 전송 링크를 구성하기 때문이다. 즉 SSMF의 50 km에서 80 km 간격마다 EDFA를 삽입하여 광 링크 내에서 큰 전력을 유지시킬 수 있고, 결과적으로 큰 광 신호 전력 대 잡음비 (OSNR; optical power to noise power ratio)를 갖는 신호를 수신할 수 있다[2]. 하지만 신호 전력이 증가하면 할수록 SSMF는 비선형 Kerr 효과를 더욱 증가시켜 굴절 계수에 변화를 주게 되고 결국 광 펄스의 위상 왜곡을 가져온다[1].

따라서 SSMF를 주 전송로로 갖는 광대역 장거리 링크를 얻기 위해서는 색 분산 효과와 비선형 Kerr 효과를 억제하거나 제거하는 기술이 필요하다. 이러한 기술 중 분산 제어 (DM; dispersion management)와 광 위상 공액 (optical phase conjugation)은 저자의 주 관심 분야이다. DM은 SSMF와 반대의 분산 특성, 즉 음(negative)의 분산 계수를 갖는 분산 보상 광섬유 (DCF; dispersion compensating fiber)를 SSMF 전이나 후에 삽입하여 전체 분산 계수를 영(zero)에 가깝게 하여 분산을 최소화하는 방법이다[3]-[5]. 여기서 SSMF와 DCF로 구성되는 각 중계 구간 (fiber span)에서의 분산 정도는 SSMF의 분산 계수와 길이, DCF의 분산 계수와 길이에 의해 결정된다.

광 위상 공액은 전체 전송로 중간에 위치한 광 위상 공액기 (OPC; optical phase conjugator)가 전반 전송 구획 (FHS; former half section)을 전파하면서 비선형 Kerr 효과에 의해 왜곡된 신호를 위상 공액 변환하여 전송하면 후반 전송 구획 (LHS; latter half section)에서 겪게 되는 비선형 Kerr 왜곡된 수신 신호가 원 신호 모양으로 복원되는 원리이다[6]-[8].

하지만 DM은 색 분산에 의한 왜곡만을 보상하고, 광 위상 공액은 OPC가 전체 전송로 중간에 위치해야 보상을 얻을 수 있다는 한계가 있다. 다행스럽게도 이 두 기술을 결합하면 OPC가 중간이 아닌 곳에 위치하더라도 색 분산과 비선형 Kerr 효과에 의한 왜곡을 동시에 보상할 수 있다는 것을 그동안의 연구를 통해 확인하였다[9]-[11]. 즉 SSMF와 DCF로 구성된 중계 구간의 개수가 OPC를 중심으로 다른 링크 (이를 non-midway OPC라고 부름)에서도 왜곡 보상을 통해 960 Gbps 파장 분할 다중 (WDM; wavelength division multiplexing) 신호의 장거리 전송이 가능한 것을 확인하였다. 이러한 결과는 WDM 네트워크 구성에 있어 고품질 전송과 더불어 유연한 토폴로지 구성이 가능하다는 것을 의미한다.

하지만 그동안 non-midway OPC 관련 연구에서는 DM 링크 설계 시 주요 요소인 중계 구간 당 잉여 분산 (RDPS; residual dispersion per span)이 FHS와 LHS에서 동일한 경우만을 분석하였기 때문에 링크 구성에 있어 좀 더 완벽한 유연성을 도모했다고 볼 수 없다. 앞서 언급했지만 RDPS는 SSMF의 분산 계수와 길이, DCF의 분산 계수와 길이에 의해 결정된다. 각 광섬유의 분산 계수는 고정되기 때문에 결과적으로 선택된 각 광섬유의 길이가 RDPS를 결정한다. 지금까지의 연구에서는 FHS에 축적되는 전체 잉여 분산 (NRD; net residual dispersion)과 LHS의 NRD를 동일하게 만드는 RDPS가 적용된 링크에서 WDM 채널의 왜곡 보상을 고찰하였다.

본 연구에서는 non-midway OPC를 갖고 FHS를 구성하는 각 중계 구간의 RDPS와 LHS를 구성하는 각 중계 구간의 RDPS가 서로 다른 (물론 일치하는 경우도 포함) DM 링크에서의 960 Gbps WDM 신호 왜곡 보상에 대해 시뮬레이션을 통해 분석해 보도록 한다.

## II. 분산 제어 링크 모델링

그림 1은 본 연구에서 고찰하고 있는 40 Gbps × 24 채널 WDM 전송을 위한 링크의 구조를 나타낸 것이다. 또한 WDM 송신단과 수신단의 구성도 같이 보이고 있다. 본 연구에서 고려한 총 중계 구간 수는 20, 즉 그림 1에서  $n = 20$ 이다. OPC는  $m$ -번째 중계 구간 다음에 위치한다. OPC를 전체 전송로 중간이 아닌 곳에 위치시킨 두 가지 경우를 고려하였다. 첫 번째 구조는 OPC가 6번째 중계 구간, 즉 그림 1에서  $m = 6$  다음에 위치시킨 경우 (이를 ‘6vs14 구조’라 부름)이다. 그리고 두 번째는 14번째 중계 구간, 즉 그림 1에서  $m = 14$  다음에 위치시킨 경우 (이를 ‘14vs6 구조’라 부름)이다.

그림 2(a)는 FHS에서의 SSMF와 DCF 배치를 나타낸 것이다. FHS를 구성하는 모든 중계 구간에서는 DCF 다음에 SSMF가 배치되도록 하였다. 반면 LHS를 구성하는 모든 중계 구간에서는 그림 2(a)와 반대 순서로 광섬유들이 배치된다. 이렇게 OPC를 중심으로 SSMF와 DCF 배치 순서를 반대로 한 이유는 광 위상 공액의 기본 조건인 전체 링크에서의 분산 분포를 OPC를 중심으로 대칭에 가깝게 만들기 위해서이다.

그림 1에서 SSMF의 길이( $l_{SMF}$ )는 모든 중계 구간에서 80 km로 동일하게 하였다. SSMF의 손실 계수 ( $\alpha_{SMF}$ )는 0.2 dB/km, 분산 계수 ( $D_{SMF}$ )는 17 ps/nm/km, 그리고 비선형 계수 ( $\gamma_{SMF}$ )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 ( $\alpha_{DCF}$ )는 0.6 dB/km로, 비선형 계수 ( $\gamma_{DCF}$ )는  $5.06 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ (@1,550 nm)로 설정하였다.

각 중계 구간이 갖는 RDPS는 DCF의 길이( $l_{DCF}$ )의 설정을 통해 다양한 값을 갖도록 하였다. 즉 FHS와 LHS의 각 중계 구간의  $l_{DCF}$ 는 설정하고자 하는 RDPS 값에 따라 변화된다.

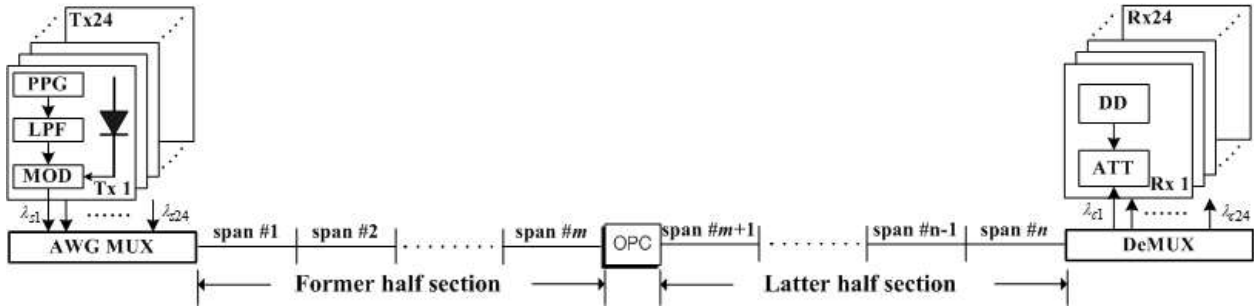


그림 1. 24x40 Gbps WDM 전송 시스템 구조  
 Fig. 1. Configuration of 24x40 Gbps WDM transmission system.

표 1. RDPS 편차에 따른 실제 RDPS 값 (점진적 증가 분포의 경우)

Table 1. The exact RDPSs were decided by deviations (in case of the ascending distribution)

6vs14						14vs6					
RDPS <sub>1</sub>	RDPS <sub>2</sub>	NRD <sub>1</sub>	NRD <sub>2</sub>	$\delta$	$\Delta$	RDPS <sub>1</sub>	RDPS <sub>2</sub>	NRD <sub>1</sub>	NRD <sub>2</sub>	$\delta$	$\Delta$
570	-90	3420	-1260	4680	18	-90	570	-1260	3420	-4680	-18
550	-80	3300	-1120	4420	17	-80	550	-1120	3300	-4420	-17
:					:	:					:
:					:	:					:
270	60	1620	840	780	3	60	270	840	1620	-780	-3
250	70	1500	980	520	2	70	250	980	1500	-520	-2
230	80	1380	1120	260	1	80	230	1120	1380	-260	-1
210	90	1260	1260	0	0	90	210	1260	1260	0	0
190	100	1140	1400	-260	-1	100	190	1400	1140	260	1
170	110	1020	1540	-520	-2	110	170	1540	1020	520	2
150	120	900	1680	-780	-3	120	150	1680	900	780	3
130	130	780	1820	-1040	-4	130	130	1820	780	1040	4
:					:	:					:
:					:	:					:
-130	260	-780	3640	-4420	-17	260	-130	3640	-780	4420	17
-150	270	-900	3780	-4680	-18	270	-150	3780	-900	4680	18

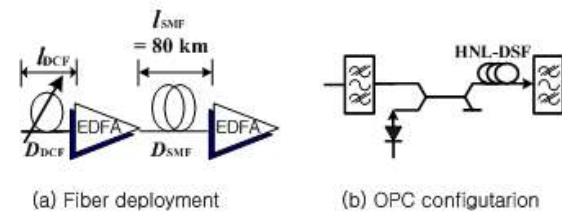


그림 2. 광섬유 배치와 OPC 구조  
 Fig. 2. Fiber deployment and OPC configuration.

그림 1에서 각 전송 반 구획의 중계 구간 수가 비대칭이므로 모든 중계 구간의 RDPS를 같게 하면 각 전송 반 구획의 NRD가 서로 달라진다. 6vs14 구조에서 각 전송 반 구획의 NRD를 서로 같게 만드는 RDPS는 각각 210 ps/nm와 90 ps/nm (14vs6 구조는 그 반대)이다. 아울러 각 중계 구간이 위의 값이 아닌 다른 RDPS를 가지면 각 전송 반 구획의 NRD도 달라진다.

분석의 간편성을 위해 우선 FHS의 NRD를  $NRD_1$ , LHS의 NRD를  $NRD_2$ 라 하고 이 둘의 차이, 즉  $NRD_1 - NRD_2$ 를  $\delta$ 라고 표시하였다. 각 전송 반 구획의 중계 구간에 적용되는 RDPS가 변화하면 그 변화량에 비례하여  $\delta$ 도 달라진다. 예를 들어,

6vs14 구조에서 FHS를 구성하는 각 중계 구간의 RDPS를 210 ps/nm로 설정하고, LHS를 구성하는 각 중계 구간의 RDPS를 90 ps/nm로 설정하면  $NRD_1 = 210 \text{ ps/nm} \times 6 = 1260 \text{ ps/nm}$ 이고,  $NRD_2 = 90 \text{ ps/nm} \times 14 = 1260 \text{ ps/nm}$ 로 동일하므로  $\delta = 0$ 이 된다. 반면 FHS의 각 중계 구간에 적용되는 RDPS를 230 ps/nm (이는 210 ps/nm보다 20 ps/nm 증가시킨 것)으로 설정하고, LHS의 각 중계 구간에 적용되는 RDPS를 80 ps/nm (이는 90 ps/nm보다 10 ps/nm 감소시킨 것)으로 설정하면  $\delta = (230 \text{ ps/nm} \times 6) - (80 \text{ ps/nm} \times 14) = 260 \text{ ps/nm}$ 가 된다.

달리 표현해보면,  $\delta$ 는 각 전송 반 구획의 중계 구간에 적용되는 RDPS의 편차 (이를 각각  $var_1$ 과  $var_2$ 라고 하자)를 사용하여  $\delta = (var_1 \times \text{FHS의 중계 구간 수}) - (var_2 \times \text{LHS의 중계 구간 수})$ 로 표현된다. 여기서  $var_1$ 과  $var_2$ 의 기준은  $\delta = 0$ 을 만드는 RDPS이다. 즉  $var_1$ 은 210 ps/nm,  $var_2$ 은 90 ps/nm이다.

각 전송 반 구획마다 RDPS의 편차, 즉  $var$ 를 일정하게 하면  $\delta$ 도 일정해진다. 따라서 인접한  $\delta$ 사이의 간격도 일정해진다.  $\delta$ 사이의 간격을  $G_\delta$ 라고 하면  $\delta$ 를  $G_\delta$ 로 정규화한 값, 즉  $\delta/G_\delta$ 는 양과 음의 정수로 표현된다. 이 값을  $\Delta$ 로 표시하였다. 본 연구에서 고려한 각 중계 구간의 RDPS와 그에 따른  $\delta$ 와  $\Delta$ 를 표 1에

정리하였다. 표 1에서 보는 바와 같이  $G_8$ 가 항상 260 ps/nm가 되도록 RDPS에 변화를 주었다. 또한 FHS의 모든 중계 구간에 적용하는 RDPS의  $var_1$ 는  $\pm 20$  ps/nm로, LHS의 모든 중계 구간에 적용하는 RDPS의  $var_2$ 는  $\mp 10$  ps/nm로 하였다. 예를 들어, FHS의 모든 중계 구간에 적용되는 RDPS를 150 ps/nm가 선택되면 LHS의 모든 중계 구간에 적용되는 RDPS를 120 ps/nm가 선택되어야 하고, 이 때의  $\Delta$ 는 -3이 된다.

표 1을 살펴보면, 6vs14 구조에서  $RDPS_1$  즉 FHS를 구성하는 모든 중계 구간의 RDPS와  $RDPS_2$  즉 LHS를 구성하는 모든 중계 구간의 RDPS가 130 ps/nm로 서로 동일한 경우  $\Delta = -4$  (14vs6 구조에서는  $\Delta = 4$ )이다.

전체 전송 링크에서 누적된 NRD의 최종 설정은 그림 1의 링크에서 첫 번째 중계 구간의 DCF 길이, 또는 마지막 중계 구간의 DCF 길이의 조절을 통해 이루어지도록 하였다. NRD 결정을 어디에서 수행하느냐에 따라 각각을 pre-DC (dispersion calibration)과 post-DC라고 부른다.

그림 1에 보인 24 채널의 WDM 송신기와 수신기 구조와 사양은 참고 문헌 [11]과 동일하게 설정하였다. 그리고 OPC의 구조는 그림 2(b)에 보인 바와 같고, 공액과 발생을 위한 각 구성부의 파라미터도 참고 문헌 [11]과 동일하게 설정하였다. 이 울러 24개 채널 각각의 중심 파장도 참고 문헌 [11]과 동일하게 100 GHz (즉 0.8 nm) 간격으로 1,550 nm부터 1,568.4 nm로 설정하였다.

광 전송 링크를 통해 손실과 비선형 효과의 영향을 겪으면서 전파하는 각 채널들은 비선형 슈뢰딩거 방정식 (NLSE; nonlinear Schrödinger equation)에 의해 표현된다[1]. 본 논문에서 40 Gbps의 24 채널 WDM 전송을 위한 NLSE의 수치적 분석은 단계 분할 푸리에 (SSF; split-step Fourier) 기법[1]에 따라 Matlab으로 구현하여 이루어졌다.

### III. 시뮬레이션 결과 및 검토

그림 3은  $\Delta = 0$ 과  $\Delta = \pm 4$ 로 설정된 링크에서 최악 채널의 입사 전력에 따른 눈 열림 페널티 (EOP; eye opening penalty)를 나타낸 것이다.  $\Delta = 0$ 는 FHS에서의  $NRD_1$ 과 LHS의  $NRD_2$ 이 같은 링크를 의미한다. 반면 6vs14 구조에서의  $\Delta = 4$ 와 14vs6 구조에서의  $\Delta = -4$ 는 모두 FHS를 구성하는 모든 중계 구간의 RDPS와 LHS를 구성하는 모든 중계 구간의 RDPS가 130 ps/nm로 서로 같은 경우이다. 각 전공 반 구획을 구성하는 중계 구간의 RDPS를 위와 같이 각각 설정한 후 pre-DC와 post-DC에 의해 전체 링크의 NRD는 6vs14 구조에서 -10 ps/nm로, 14vs6 구조에서는 10 ps/nm로 설정하였다. OPC가 수신부 쪽에 가깝게 위치한 14vs6 구조에서보다 송신부 쪽에 가깝게 위치한 6vs14 구조에서, 특히 두 전송 반 구획을 구성하는 중계 구간의 RDPS를 모두 동일하게 한 경우, 즉  $\Delta = -4$ 에서 보상 특성이 우수하게 나타나는 것을 그림 3을 통해 확인할 수 있다.

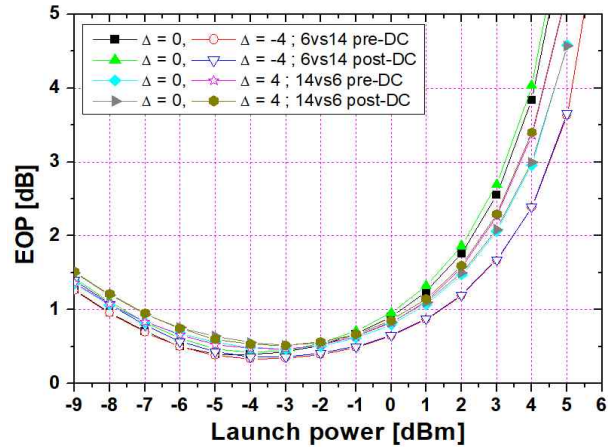


그림 3. 입사 전력에 따른 최악 채널의 눈 열림 페널티  
Fig. 3. Eye opening penalty (EOP) of the worst channel as a function of launch power.

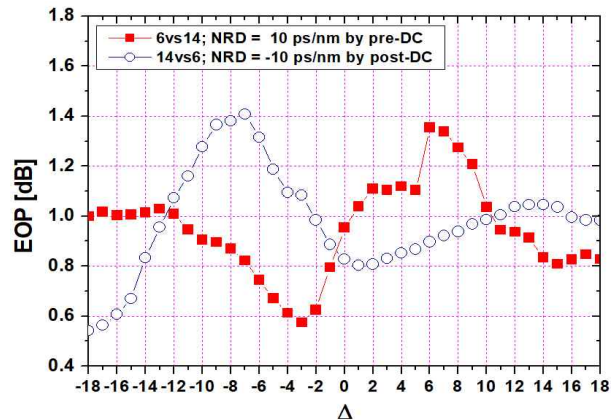


그림 4. 입사 전력이 0 dBm인 경우  $\Delta$ 에 따른 최악 채널의 눈 열림 페널티  
Fig. 4. Eye opening penalty (EOP) of the worst channel as a function of  $\Delta$  in case of launch power of 0 dBm.

그림 4는 각각의 채널 입사 전력이 0 dBm인 경우 변화되는  $\Delta$ 에 따른 최악 채널의 EOP를 나타낸 것이다. 우선 링크의  $\Delta$ 에 따라, 즉 RDPS 값에 따라 WDM 채널의 왜곡 보상 정도가 달라진다는 것을 알 수 있다. 6vs14 구조에서는  $\Delta = -3$ , 즉  $RDPS_1 = 150$  ps/nm,  $RDPS_2 = 120$  ps/nm로 설정된 링크에서 가장 우수한 보상을 얻을 수 있는 반면, 14vs6 구조에서는  $\Delta = -18$ , 즉  $RDPS_1 = -90$  ps/nm,  $RDPS_2 = 570$  ps/nm로 설정된 링크에서 가장 우수한 보상을 얻을 수 있다.

그림 4에서  $\Delta$ 에 따른 최악 채널의 EOP를 전반적으로 검토해보면  $\Delta = 0$ , 즉 FHS에서의  $NRD_1$ 과 LHS의  $NRD_2$ 이 같은 링크가 아닌 그 근처의 값으로 설정된 경우에서 왜곡된 WDM 채널의 보상 특성이 우수한 것을 알 수 있다. 구체적으로 표현하면 성능 기준을 1 dB EOP로 한 경우 6vs14 구조에서는  $\Delta = 0$ 보다 적은 -6부터 -1까지, 14vs6 구조에서는  $\Delta = 0$ 보다 큰 1부터 3까지로 설정된 링크에서 보상이 우수하게 얻어지는 것을 확인할 수 있다.

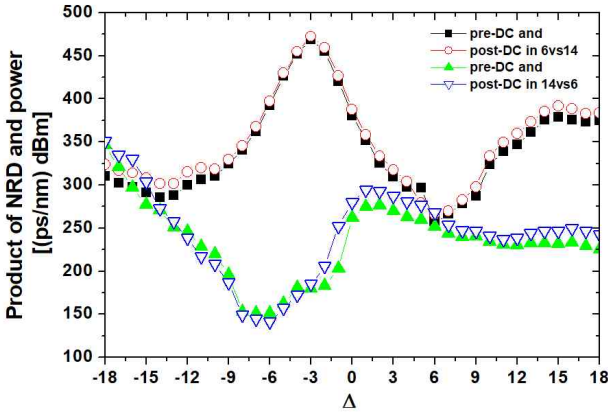


그림 5. 유효 NRD와 입사 전력의 곱  
Fig. 5. Product of NRD and launch power.

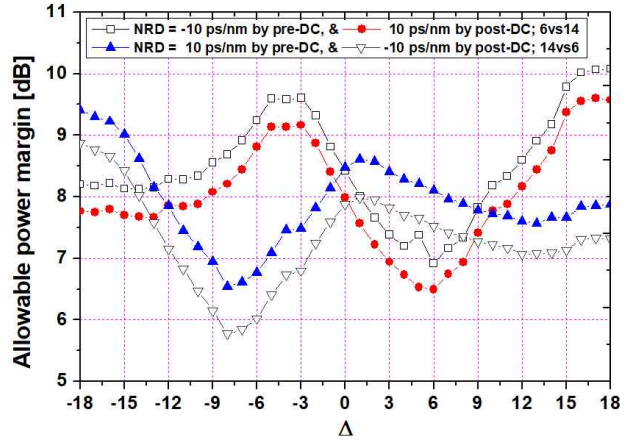


그림 7. Δ에 따른 전력 마진  
Fig. 7. Power margin as a function of Δ.

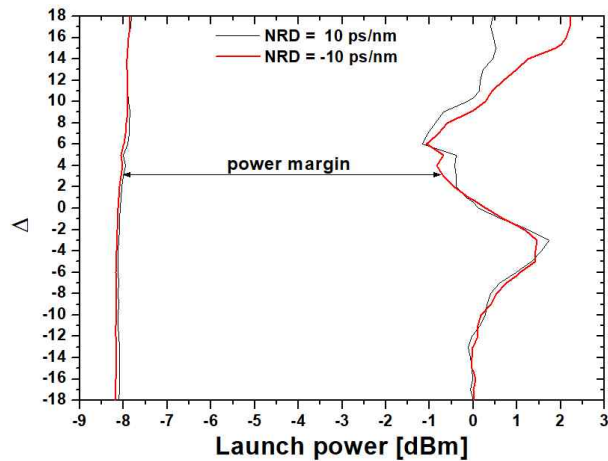


그림 6. 6vs14 구조에서 유효 전력과 Δ  
Fig. 6. Effective launch power and Δ in 6vs14 scheme.

그림 5는 저자의 다른 연구에서처럼 수신 성능 기준을 1 dB EOP로 정한 경우 이 기준 이하가 되는 유효 NRD 범위를 입사 전력에 따라 구한 후 유효 NRD와 입사 전력의 곱을 구한 결과를 나타낸 것이다. 즉 입사 전력에 따른 유효 NRD 범위는 등고선(contour) 형태를 갖는데, 해당 등고선의 면적이 유효 NRD와 입사 전력의 곱 (product of NRD and power)이다. 그림 5의 유효 NRD와 입사 전력의 곱은 dispersion-calibration 방법에 따른 Δ와의 관계를 보이고 있다. 앞선 결과, 즉 그림 3과 4와 같이 6vs14 구조에서는 Δ = 0보다 적은 -3과 그 근처에서 유효 NRD와 입사 전력의 곱이 가장 좋은 것을 알 수 있고, 14vs6 구조에서의 유효 NRD와 입사 전력의 곱이 전반적으로 6vs14 구조보다 좋지는 않지만 Δ = -18에서 가장 좋은 것을 알 수 있다.

그림 6은 6vs14 구조에서 1 dB EOP를 얻을 수 있는 최소 입사 전력과 최대 입사 전력을 Δ에 따라 나타낸 것이다. 제한된 링크를 통해 WDM 채널을 전송하고자 하는 경우 각 채널이 그림 5에 보인 최소 입사 전력과 최대 입사 전력 사이의 값을 유지하면 1 dB 이하의 EOP로 수신 품질을 얻을 수 있다.

이러한 이유로 Δ에 따른 최대 입사 전력과 최소 입사 전력의 차이를 전력 마진 (power margin)이라고 정의하여 그 결과를 나타낸 것이 그림 7이다. 그림 7 결과의 형태, 즉 Δ에 대한 변화 양상이 그림 5와 비슷하다. 하지만 dispersion calibration 방법 측면에서 검토해보면 6vs14 구조와 14vs6 구조 모두 전력 마진을 좀 더 늘릴 수 있기 때문에 post-DC보다 pre-DC가 더욱 유리하다는 것을 그림 7을 통해 확인할 수 있다.

또한 그림 7을 통해 알 수 있는 다른 결과와의 차이는 6vs14 구조에서 큰 전력 마진을 얻을 수 있는 Δ가 0 근처가 아닌 18이라는 것이다. 즉 6vs14 구조와 14vs6 구조 모두 각 전송 반 구획을 구성하는 중계 구간의 RDPS의 서로간의 차이가 클수록 전력 마진이 좋아지는 것을 알 수 있다.

그림 4, 그림 5와 그림 7을 종합적으로 분석해보면, OPC의 위치에 따른 보상 특성이 완전하지는 않지만 대칭성을 띠는 것을 알 수 있다. 즉 WDM 채널의 왜곡 보상에 영향을 미치는 Δ가 6vs14 구조의 14vs6 구조에서 크기는 비슷하지만 서로 부호가 반대이다. 표 1을 다시 검토해 보면 6vs14 구조에서의 Δ와 14vs6 구조에서의 Δ가 서로 크기가 같고 부호만 다른 경우는 FHS의 RDPS<sub>1</sub>와 LHS의 RDPS<sub>2</sub>의 설정 값이 서로 교차해 있다는 것을 알 수 있다. 즉 OPC 위치가 달라지더라도 중계 구간 수가 동일한 전송 반 구획의 RDPS를 갖게 한 경우에서 가장 우수한 보상이 얻어지는 것을 확인할 수 있다.

본 연구에서 고려한 Δ 값 범위 내에서 6vs14와 14vs6 모두 6개 중계 구간을 갖는 전송 반 구획에서의 RDPS는 570 ps/nm로 설정되고 14개 중계 구간을 갖는 전송 반 구획에서의 RDPS는 -90 ps/nm로 설정된 링크에서 전력 마진이 가장 좋은 것을 확인할 수 있다.

RDPS가 양의 값으로 설정되면 그 크기에 비해 그 중계 구간에서 광 펄스가 시간적으로 퍼지게 된다. 반면 RDPS가 음의 값으로 설정되면 광 펄스의 폭이 압축된다. 본 연구에서 제안하는 non-midway OPC를 갖는 DM 링크에서 전력 마진을 늘려 전송 운용의 유연성을 제고하고자 한다면 중계 구간 수가 적은 전송 구간에서는 RDPS를 큰 양의 값으로 설정하여 광 펄스 폭을

신장시키고 반대로 중계 구간 수가 많은 전송 구간에서는 RDPS를 큰 음의 값으로 설정하여 광 펄스 폭을 압축할 수 있는 구조가 왜곡된 WDM 채널 보상에 유리하다는 것을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

지금까지 non-midway OPC를 갖고 전반 전송 구획과 후반 전송 구획을 구성하는 중계 구간의 RDPS가 서로 독립적인 분산 제어 링크에서의 왜곡된 WDM 채널의 보상 특성을 살펴 보았다. RDPS에 의해 각 전송 반 구획의 전체 잉여 분산이 결정 되는데, 각 전송 반 구획의 전체 잉여 분산을 같게 만드는 값이 아닌 둘 사이에 적은 차이를 만들 수 있는 서로 다른 RDPS를 선택한 링크에서 왜곡된 WDM 채널의 보상 효과가 좋아지는 것을 확인하였다. 또한 두 전송 반 구획의 전체 잉여 분산을 크게 차이 나게 하는 RDPS를 선택한 경우에는 전력 마진이 늘어 나는 것을 동시에 확인하였다.

왜곡된 WDM 채널들의 보상을 위해 분산 제어 링크에 OPC를 추가 결합하는 전송 방식에 있어 본 연구를 통해 얻은 결과 들을 적용하면 좀 더 유연성 있는 광 네트워크 구성이 가능할 것으로 기대된다.

#### References

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

[2] M. P. Yankov, P. M. Kaminski, H. E. Hansen, and F. D. Ros, "SNR optimization of multi-span fiber optic communication systems employing EDFAs with non-flat gain and noise figure," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 39, Issue 21, pp. 6824-6832, Aug. 2021.

[3] M. Morshed, A. J. Lowery, and L. B. Du, "Improving performance of optical conjugation by splitting the nonlinear element," *Optics Express*, vol. 21, pp. 4567-4577, 2013.

[4] I. Sackey, F. D. Ros, J. K. Fischer, T. Richter, M. Jazayerifar, C.

Peucheret, K. Petermann, and C. Schubert, "Kerr nonlinearity mitigation: mid-link spectral inversion versus digital backpropagation in 5×28-GBd PDM 16-QAM signal transmission," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 9, pp. 1821-1827, May 2015.

[5] 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, no. 1, pp. 58-66, Jan. 2013.

[6] 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.

[7] A. Chowdhury and R. J. Essiambre, "Optical phase conjugation and pseudolinear transmission," *Optics Letters*, vol. 29, no. 10, pp. 1105-1107, 2014.

[8] 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.

[9] 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.

[10] S. H. Hong and S. R. Lee, "Dispersion-managed link with different numbers of fiber spans and asymmetric distribution of RDPS," *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 23, No. 6, pp. 570-576, Dec. 2019.

[11] S. R. Lee, "Decaying/expanding distribution of RDPS in the half section of a dispersion-managed optical link combined with mid-span spectral inversion," *Journal of Information and Communication Convergence Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 227-233, Dec. 2019.



#### 이 성 열 (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