

중계 구간의 개수가 다르고 RDPS가 비대칭인 분산 제어 링크

Dispersion-Managed Link with Different Numbers of Fiber Spans and Asymmetric Distribution of RDPS

홍성화 · 이성렬*

목포해양대학교 항해정보시스템 학부

Sung-Hwa Hong · Seong-Real Lee*

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

[요 약]

광 네트워크의 융통적 구성을 위해 전체 전송로 중간이 아닌 위치에 존재하는 광 위상 공액기를 갖는 분산 제어 링크를 제안하였다. 제안하는 분산 제어 링크에서 광 위상 공액기는 6개 중계 구간으로 구성되는 전반 전송 구획과 14개로 구성되는 후반 전송 구획 사이에 존재하고, 각 전송 반 구획에서의 평균 중계 구간 당 잉여 분산(RDPS; residual dispersion per span)이 서로 다른 비대칭 구조이다. 또한 파장 분할 다중 채널의 왜곡 보상을 위하여 각 중계 구간마다 실제 RDPS를 점진적으로 증가/감소시키는 인위적 분포 구조를 채택하였다. 시뮬레이션 결과 제안된 16개의 비대칭 분포 제어 링크 구조 중 인접한 중계 구간 간 RDPS 편차를 적게 하여 전반 전송 구획에서는 중계 구간의 실제 RDPS를 점진적으로 감소시키고 후반 전송 구획에서는 중계 구간의 실제 RDPS를 점진적으로 증가시키는 구조가 왜곡된 파장 분할 다중 채널의 보상에 적합한 것을 확인하였다.

[Abstract]

The configuration of dispersion-managed optical link with optical phase conjugator, which is placed at the non-midway of total transmission length, is proposed for implementing of the flexible optical network. The optical phase conjugator is located between the former half transmission section and the latter half transmission section, which are consisted of 6 fiber spans and 14 fiber spans respectively, and the averaged RDPS of each half transmission section are inconsistency. And, the artificial distribution of each fiber span's RDPS, which are gradually increased/decreased as the span numbers are increased, is adopted to compensate for the distorted wavelength division multiplexed channels. From the simulation results, it is confirmed that the compensation in dispersion-managed link configured by a special distribution pattern among 16 proposed patterns, in which the RDPS of each fiber spans are gradually decreased/increased in the former/latter half section with the small deviation, is suitable to compensate for the distorted wavelength division multiplexed channels.

Key word : Asymmetric dispersion-managed link, Optical phase conjugation, Residual dispersion per span, Artificial distribution, RDPS deviation.

<https://doi.org/10.12673/jant.2019.23.6.570>



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 28 November 2019; Revised 30 November 2019

Accepted (Publication) 21 December 2019 (30 December 2019)

*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 fibers)와 에르븀 첨가 광섬유 증폭기 (EDFA; erbium-doped fiber amplifiers)로 구성된 광전송 링크 분야에서 최근의 연구 목적 중 하나는 색 분산 (chromatic dispersion)과 Kerr 비선형에 의한 광 신호의 왜곡을 보상하는 것이다. 이와 관련된 대표적인 기술로는 분산 제어 (DM; dispersion management) [1]-[3], 광 위상 공액 (optical phase conjugation) [4]-[7]과 이 둘을 결합한 기술 등이 있다 [8],[9].

분산 제어 링크는 신호 대 잡음비 (signal-to-noise ratios)의 증대와 타이밍 지터 (timing jitter)의 감소, 그리고 파장 분할 다중 전송 (WDM; wavelength-division-multiplexed)에서의 비선형 영향의 감소 등을 얻어낼 수 있는 장점을 갖는다 [1]. 그러나 RZ (return-to-zero) 신호 전송에 있어 채널 내 비선형 효과 (intra-channel nonlinear effects)와 이에 상응하는 심볼 간 간섭 (ISI; inter-symbol interference)에 의한 왜곡의 보상에는 비효율적이라고 보고되고 있다 [1].

반면에 광 위상 공액은 강도 변조를 기본으로 하는 광전송에 있어 비선형 왜곡을 보상하는 주요 기술 중 하나로 알려져 있다 [4]-[7]. 이 기술은 전체 전송로 중간이나 그 근방에 위치한 광 위상 공액기 (OPC; optical phase conjugator)에 의해 왜곡된 신호를 보상한다. 즉 송신단으로부터 전송된 광 신호가 전파되면서 겪게 된 색 분산과 비선형 현상에 의해 왜곡된 신호가 도착하면 OPC는 이의 공액파 (conjugated wave)로 변환시켜 나머지 구간으로 전송하면 수신단에서는 전송 신호와 거의 비슷한 형태의 파형을 얻을 수 있다. 이 기술의 가장 대표적인 장점은 동일한 링크에서 다른 형식의 변조 파형과 다른 속도의 데이터를 동시에 보낼 수 있다는 것이다 [7]. 그러나 광 위상 공액의 애로점은 원론적으로 OPC를 중심으로 광 신호의 전력 분포와 분산량의 분포가 대칭을 이루어야 한다는 것이다. 이 대칭성은 SSMF와 분산 보상 광섬유 (DCF; dispersion-compensating fiber) - 이 광섬유는 DM 링크에서 SSMF에서 축적된 분산량을 제거하거나 감소시키는데 필요함 - 가 갖는 본질적 손실 (attenuation) 때문에 완벽하게 구현하기 쉽지 않다.

이러한 OPC의 본질적 한계를 보완하고 DM이 갖는 비선형 왜곡 보상에서의 한계를 극복하는 하나의 방법으로 DM 링크에 OPC를 결합한 기술이 연구되고 있다. 그러나 이 기술적 시도에도 앞서 언급한 광 위상 공액 기술의 본질적 특성 때문에 OPC가 전체 전송로 중간이나 그 근방에 위치해야만 한다는 제약을 가지게 된다. 이 제약은 결국 광전송 링크의 구조, 더 나아가 광 네트워크 구조를 단순하게 만드는 원인이 된다. 즉 OPC가 DM 링크에 적용되었다고 하더라도 광전송 링크 구조의 다양성을 확보할 수 없게 만든다. 본 논문의 저자는 그동안 여러 연구를 통해 DM과 OPC가 결합된 링크 구조의 융통성을 확보하기 위한 다양한 방안을 제시했다 [10]-[13]. 그 중 하나로 DM 링크에서 OPC가 전체 전송로 중간이 아닌 다양한

곳에 위치했을 때의 보상 효과를 분석하였다. 그 결과 DM 링크 설계에 필요한 요소들, 예컨대 중계 구간 당 잉여 분산 (RDPS; residual dispersion per span), 전체 잉여 분산 (NRD; net residual dispersion), 중계 간격과 이들의 적절한 분배와 분포 등을 WDM 전송 조건에 따라 최적화시키면 OPC를 전체 전송로 중간이 아닌 여러 다양한 곳에 위치시켜도 왜곡 보상 효과가 나타남을 확인하였다 [12],[13].

저자의 지금까지의 관련 연구에서는 OPC를 중심으로 각 중계 구간 (fiber span)의 평균 RDPS를 전반 전송 구획 (FHS; first half section)과 후반 전송 구획 (SHS; second half section)에서 동일하도록 구성시켰다. 하지만 광전송 링크와 광 네트워크 구조를 융통적으로 만들기 위해서는 이러한 조건이 깨져야 할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 FHS와 SHS를 구성하는 중계 구간의 수가 OPC를 중심으로 서로 다르고, 동시에 각 전송 반 구획에서의 평균 RDPS가 서로 다르게 설정된, 일명 비대칭 분산 제어 링크를 제안하고자 한다. 좀 더 구체적으로 언급하면 OPC를 중심으로 FHS와 SHS의 중계 구간 수는 각각 6개와 14개 (이를 6:14 구조라고 부름)이고 각 전송 반 구획에서의 평균 RDPS는 서로 다르게 설정된 분산 제어 링크를 제안한다. 본 논문에서 제안하는 전송 링크의 성능 평가는 40 Gbps × 24 채널 WDM 신호를 전송한 경우에서의 눈 열림 페널티 (EOP; eye opening penalty)를 이용하여 수행하였다.

II. 시뮬레이션 모델링과 성능 분석

그림 1은 WDM 신호의 보상을 위해 OPC를 포함한 80 km × 22 fiber span의 DM 링크 구조를 나타낸 것이다. 모든 fiber span의 광섬유 배열은 FHS와 SHS이 서로 반대가 되도록 구성하였다. 즉 그림 1에서 pre-DC span과 #1부터 #6의 fiber span은 DCF 다음에 SSMF가 오도록 한 반면, #7부터 #20의 fiber span과 post-DC span은 SSMF 다음에 DCF가 오도록 하였다. 이는 전체적으로 보았을 때 OPC를 중심으로 각 광섬유의 배열이 대칭이 되어 결과적으로 세부적인 분산 분포를 대칭시키기 위함이다.

총 22개의 fiber spans 중 FHS의 pre-DC span과 SHS의 post-DC span은 뒤에 설명하겠지만 다른 20개의 fiber span과 달리 설계 파라미터가 고정된다. 반면 FHS의 6개 fiber span과 SHS의 14개 fiber span은 본 논문에서 제안하는 내용에 따라 RDPS가 달라져야하기 때문에 fiber span 마다 DCF의 길이가 각기 달라지게 설계하였다.

FHS와 SHS를 구성하는 각 fiber span의 RDPS는 인접 span과의 편차에 따라 달라지고 그 분포는 fiber span 번호가 증가할수록 RDPS 편차가 점진적으로 증가/감소 (ascending/descending)하도록 하였다. 우선 FHS와 SHS에서의 RDPS 편차는 그 크기에 따라 small과 large의 2가지를 각각 고려하였다. FHS에서의 small RDPS 편차는 40 ps/nm로 하였고 large RDPS

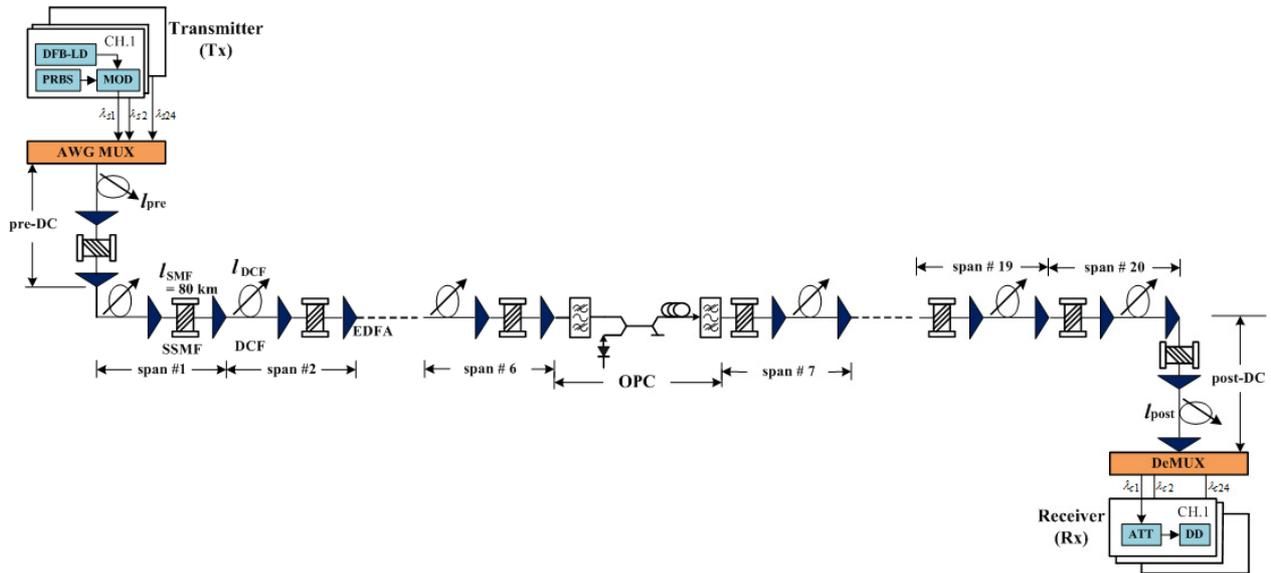


그림 1. 24×40 Gbps WDM 전송 시스템 구조
 Fig. 1 Configuration of 24×40 Gbps WDM transmission system.

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).

span # kind	1	2	3	4	5	6														
small	30	70	110	190	230	270														
large	-990	-610	-230	530	910	1290														
span # kind	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20						
small	-20	0	20	40	60	80	100	140	160	180	200	220	240	260						
large	-1000	-840	-680	-520	-360	-200	-40	280	440	600	760	920	1080	1240						

편차는 380 ps/nm로 하였다. 반면 SHS에서의 small RDPS 편차는 20 ps/nm로 하였고 large RDPS 편차는 160 ps/nm로 하였다. 그러나 각 fiber span의 RDPS가 편차에 따라 각기 달라지지만 전송 반 구획의 평균 RDPS 값은 편차 정도에 관계없이 FHS에서는 150 ps/nm, SHS에서는 120 ps/nm로 일정하다.

Fiber span 번호가 증가함에 따라 점진적으로 RDPS가 증가하는 경우에 대해서 각 fiber span이 갖는 RDPS 값을 표 1에 정리해 놓았다. 반면에 fiber span 번호가 증가함에 따라 점진적으로 RDPS가 감소하는 분포를 만들고자 한다면 표 1에서 각 fiber span이 갖는 RDPS 값의 순서를 반대로 하면 된다. 본 연구에서 각 fiber span을 구성하는 SSMF의 길이는 80 km로 균일하게 하였고 이의 분산 계수는 17 ps/nm/km로 하였다. 반면 DCF의 분산 계수는 -100 ps/nm/km로 하였다. 결과적으로 제안한 DM 링크에서의 RDPS는 DCF의 길이에 의해서 결정된다. 예를 들어 임의의 fiber span의 RDPS가 30 ps/nm로 설정되려면 해당 fiber span을 구성하는 DCF의 길이는 13.3 km로 결정하면 된다 ($[(80 \text{ km} \times 17 \text{ ps/nm/km}) - 30 \text{ ps/nm/km}] / \text{abs}(-100 \text{ ps/nm/km})$).

본 연구에서는 이들 RDPS 편차를 OPC를 중심으로 전송 반

구획마다 다르게 적용하여 총 4가지 경우에 대해 분석하였다. 그 중 첫 번째는 FHS와 SHS 모두에서 small RDPS 편차에 따라 분포하는 경우 (이를 S:S라고 표현함)이고, 두 번째는 FHS에서는 small RDPS 편차에 따라, SHS에서는 large RDPS 편차에 따라 분포하는 경우 (이를 S:L라고 표현함), 세 번째는 FHS에서는 large RDPS 편차에 따라, SHS에서는 small RDPS 편차에 따라 분포하는 경우 (이를 L:S라고 표현함)이고 마지막은 FHS와 SHS 모두에서 large RDPS 편차에 따라 분포하는 경우 (이를 L:L라고 표현함)이다.

또한 제안하는 DM 링크에서 fiber span의 RDPS가 span 수가 증가함에 따라 점진적으로 증가/감소하도록 하였다. FHS와 SHS 모두 fiber span 번호가 증가할수록 RDPS 분포가 점진적으로 증가하는 경우 (이를 AA라고 표현함), FHS에서는 fiber span 번호가 증가할수록 RDPS 분포가 점진적으로 증가하고 동시에 SHS에서는 fiber span 번호가 증가할수록 RDPS 분포가 점진적으로 감소는 경우 (이를 AD라고 표현함), FHS에서는 fiber span 번호가 증가할수록 RDPS 분포가 점진적으로 감소하고 동시에 SHS에서는 fiber span 번호가 증가할수록 RDPS 분포가 점진적으로 증가하는 경우 (이를 DA라고 표현함), 그

리고 FHS와 SHS 모두 fiber span 번호가 증가할수록 RDPS 분포가 점진적으로 감소하는 경우 (이를 DD라고 표현함)의 4가지 경우를 고려하였다. 따라서 S:S 편차에 따라 AA로 분포하는 링크 등 총 16가지 구조에 대해 성능 평가를 수행한다.

각 fiber span마다 RDPS를 갖기 때문에 NRD는 매우 큰 값을 가질 수밖에 없고, WDM 채널의 효과적 보상을 위해서는 NRD를 없애거나 낮추어 주어야 한다. 본 연구에서는 그림 1에 보인 바와 같이 첫 번째와 마지막 fiber span의 DCF를 통해 NRD를 조절 (이를 DC (dispersion calibrator)라고 부름)하도록 하였다. 그림 1에서 마지막 중계 구간의 DCF 길이, 즉 l_{post} 는 후반 전송 구간의 NRD를 0 ps/nm가 되도록 고정시키고 FHS의 #1 fiber span 전의 span에서 DCF 길이, 즉 l_{pre} 만을 통해 전체 링크에서의 NRD를 조절하도록 하였다(이를 pre-DC라고 함).

그림 1에서 모든 SSMF의 손실 계수 (α_{SMF})는 0.2 dB/km로 비선형 계수 (γ_{SMF})는 $1.35 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ (@1,550 nm)로 설정하였다. 반면 DCF의 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.

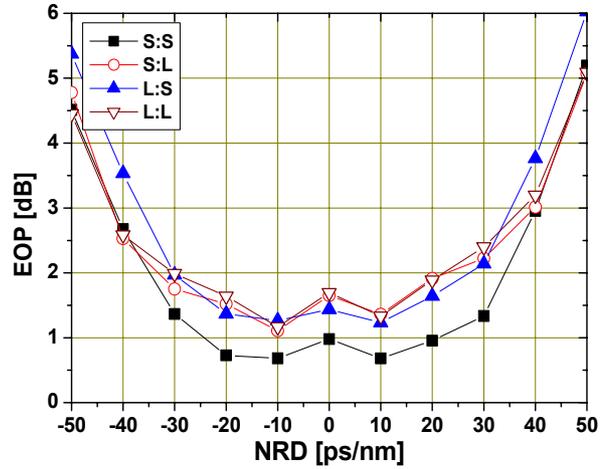
그림 1의 24 채널 WDM 전송을 위한 송신기(Tx)들의 중심 파장은 100 GHz (즉 0.8 nm) 간격으로 1,550 nm부터 1,568.4 nm로 가정하였고, 그 광원은 분포 궤환 레이저 다이오드 (DFB-LD; distributed feedback laser diode)로 가정하였다. 각 DFB-LD는 서로 독립적인 128(=2⁷) 의사 랜덤 비트열 (PRBS; pseudo random bit sequence)에 의해 소광비 (ER; extinction ratio)가 10 dB인 2차 가우시안 펄스의 RZ (return-to-zero)를 발생시키는 것으로 모델링하였다.

수신기는 5 dB의 잡음 지수를 갖는 전치 증폭기, 1 nm 대역폭의 광 필터, PIN 다이오드, 버터워스 형태의 펄스 정형 필터와 판별 회로로 구성된 직접 검파 (direct detection) 방식의 수신기로 모델링하였다. 수신 대역폭은 0.65 x 비트율로 가정하였다. 전체 전송로 중간에 위치한 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 [10]-[13].

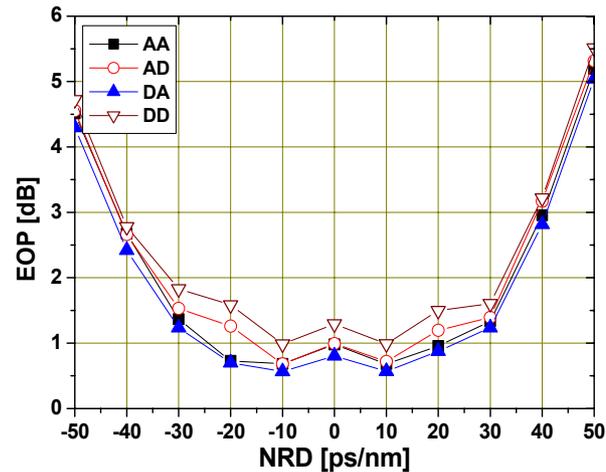
광전송 링크를 통해 손실과 비선형 효과의 영향을 겪으면서 전파하는 각 채널들은 비선형 슈뢰딩거 방정식 (NLSE; nonlinear Schrödinger equation)에 의해 표현된다[14]. 본 논문에서 40 Gbps의 24 채널 WDM 전송을 위한 NLSE의 수치적 분석은 단계 분할 푸리에 (SSF; split-step Fourier) 기법[14]에 따라 Matlab으로 구현하여 이루어졌다.

III. 시뮬레이션 결과 및 검토

그림 2는 각 채널의 입사 전력이 0 dBm인 24개의 WDM 채널을 전송시켰을 때 수신 성능이 최악인 채널의 EOP를 NRD 변화에 따라 나타낸 것이다. 그림 2(a)는 본 연구에서 고려한 4가지의 RDPS 편차 조합에 따라 RDPS가 AA 패턴으로 분포한 링크로부



(a) AA



(b) S:S

그림 2. 입사 전력이 0 dBm인 경우 최악 채널의 NRD에 따른 눈 열림 패널티

Fig. 2. The eye opening penalty (EOP) of the worst channel as a function of NRD in case of transmitting 0 dBm launch power.

터 얻은 EOP 특성으로 4가지 경우 모두 NRD가 0 ps/nm가 아닌 그 근처, 즉 -10 ps/nm나 10 ps/nm에서 최상의 보상이 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 그림 2(a)에서 눈여겨보아야 할 결과는 RDPS 편차 조합 중 S:S, 즉 FHS와 SHS 모두 small 편차로 RDPS가 선택되는 링크에서 보상 성능이 좀 더 좋아진다는 것이다. 나머지 AD, DA와 DD의 세 경우에서의 결과를 본 논문에서 상세히 보여주지는 못하지만 동일한 결과가 얻어졌다.

이러한 결과와 관련하여 분석할 수 있는 것이 그림 2(b)이다. 그림 2(b)는 S:S 편차의 RDPS가 AA, AD, DA, DD의 패턴으로 분포한 경우의 EOP 특성을 나타낸 것이다. 이 경우에 대해서도 -10 ps/nm나 10 ps/nm에서 최상의 보상이 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 정도의 차이가 매우 크지는 않지만 RDPS의 분포 패턴이 DA, 즉 FHS에서는 fiber span 수가 증가함에 따라 각 span의

RDPS가 점진적으로 감소하고 SHS에서는 fiber span의 RDPS가 점진적으로 증가하는 구조에서 가장 좋은 보상 특성이 얻어지는 것을 동시에 알 수 있다.

최적의 NRD가 -10 ps/nm 혹은 10 ps/nm라는 것을 그림 2를 통해 확인할 수 있었다. 하지만 링크의 실제적 설계를 위해서는 본 연구에서 고려한 RDPS 분포의 16가지 경우 각각의 링크에서의 최적의 NRD를 정확히 도출해야 할 필요가 있다. 이를 위해 1 dB EOP를 수신 성능 기준으로 사용하였다. 즉 각 분산 제어 링크에서 1 dB EOP를 만들 수 있는 최대 입사 전력을 구하였고, 이 최대 입사 전력이 나타나는 NRD를 동시에 구하였다. 그 결과를 나타낸 것이 그림 3이다. 여기서 1 dB EOP를 사용한 이유는 광통신 시스템에서 수신 성능 기준으로 종종 사용하기 때문이고, 이는 10^{-12} 비트 에러율 (BER; bit error rate)에 상응하는 값이다 [15].

본 연구에서 제안한 총 16가지의 RDPS 분포 패턴 중 11가지 경우에 대해서 -10 ps/nm의 NRD에서 최대 입사 전력을 얻을 수 있는 것을 그림 3을 통해 확인할 수 있다. 이는 분산 제어 링크가 6:14의 기본 구조를 갖는 것으로부터 기인한다고 판단할 수 있다. 즉 SHS를 구성하는 fiber span의 개수가 FHS보다 2배 이상 많기 때문에 OPC 이후 분산에 의한 WDM 신호 왜곡이 커질 가능성이 높아 이를 최소화하기 위해서는 링크 시작 단계에서 미리 WDM 펄스폭을 압축해서 전송시켜야 보상 효과를 좀 더 개선시킬 수 있다고 볼 수 있다.

그림 2를 다른 관점에서 분석해보면, 그림 3에 나타낸 16가지 링크 구조에서의 최상의 NRD 값 외에서도 최악 채널의 EOP를 1 dB 이하로 얻을 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 분석이 의미하는 것은 각각의 분산 제어 링크에서 최상의 NRD가 아닌 다른 NRD로 설정되어도 일정 수준 이상의 보상 효과를 얻을 수 있다는 것이다. 즉 OPC를 전체 전송로 중간이 아닌 다른 곳에 위치시킬 수 있다는 것, RDPS의 평균값을 OPC를 중심으로 다르게 할 수 있다는 것, RDPS의 편차를 두고 비균일하게 분포시킬 수 있다는 것 외에 다양한 NRD 적용이 가능하다는 것까지 포함시

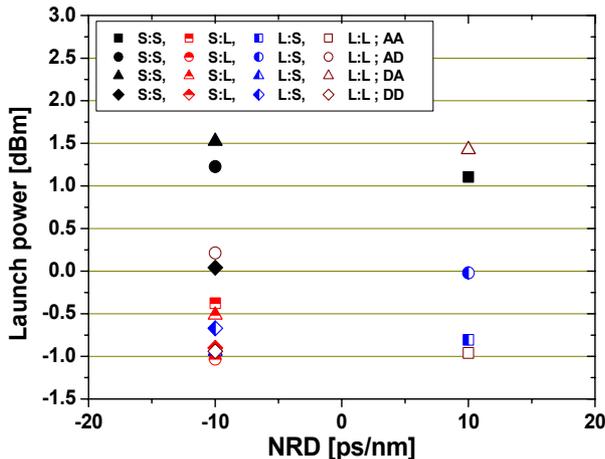


그림 3. 입사 전력을 최대로 얻을 수 있는 NRD
Fig. 3. The NRD can induce the maximum launch power.

키면 제안하는 링크 구조의 융통성이 더욱 증대한다는 것을 의미한다.

그림 4는 제안하는 분산 제어 링크 설계에 있어 신장된 융통성 확보에 필요한 설계 방침 (design rule)을 제공해 주기 위해 나타낸 것이다. 좀 더 구체적으로 그림 4를 설명하면 fiber span의 RDPS가 DA로 분포하는 링크를 통해 WDM 채널을 전송한 경우 1 dB 이하의 EOP를 얻을 수 있는 NRD 범위 (이를 유효 NRD라 칭함)를 입사 전력에 따라 나타낸 것이다. 그림 4에서 “conventional”은 fiber span의 RDPS가 같은 크기로 균일하게 분포한 링크를 의미한다.

그림 4의 결과들을 보면 입사 전력에 따른 유효 NRD 범위는 폐곡선 모양을 띄는 것을 알 수 있다. 이러한 이유로 이를 유효 NRD 등고선(contour)이라고도 부른다. 그림 4의 각 경우에 해당하는 등고선에 따라 링크를 설계하면 최악 채널의 EOP를 1 dB 이내로 얻을 수 있다. 즉 각 등고선 범위 내에서 입사 전력과 NRD를 설정하면 양호한 보상 특성을 얻을 수 있다. RDPS가 DA로 분포한 분산 제어 링크에서 RDPS 편차가 두 전송 반 구획에서 모두 적은 경우 (S:S)에서만 유효 NRD 등고선이 conventional에 비해 다소 넓어지는 것을 그림 4를 통해 알 수 있다. 이러한 결과는 앞선 그림 2와 그림 3의 결과와 일치하는 것이다. 반면 나머지 3가지 편차의 경우에 대해서는 정도의 차이가 있기는 하지만 conventional 분산 제어 링크에 비해 보상 효과가 적어진다.

본 연구에서 제안한 16가지의 분산 제어 링크 구조의 유효 NRD 범위를 하나의 그래프로 표현하기 어려운 점이 있어 좀 더 쉽게 이해할 수 있는 정량적 척도를 고려해 보았다. 그림 4를 통해 알 수 있듯이 유효 NRD 등고선의 면적을 구할 수 있고, 이 면적이 넓을수록 링크의 융통적 구성에 유리한 구조라고 판단할 수 있다. 등고선 면적을 NRD와 입사 전력의 곱 (product of NRD and launch power)으로 정의하였고 그 결과를 그림 5에 나타냈다.

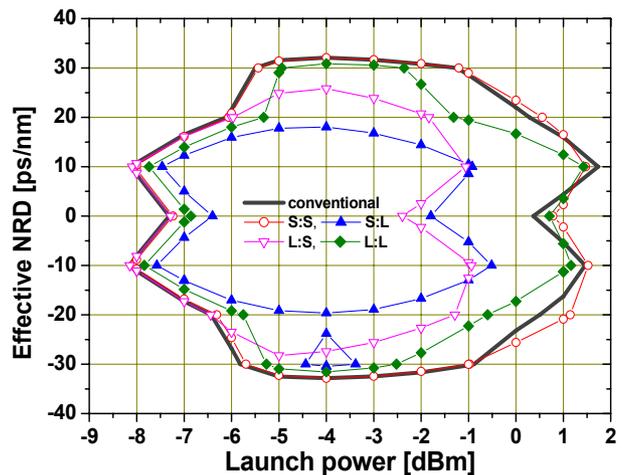


그림 4. DA 분포 구조에서의 유효 NRD
Fig. 4. Effective NRDs in DM link configured with DA distribution pattern.

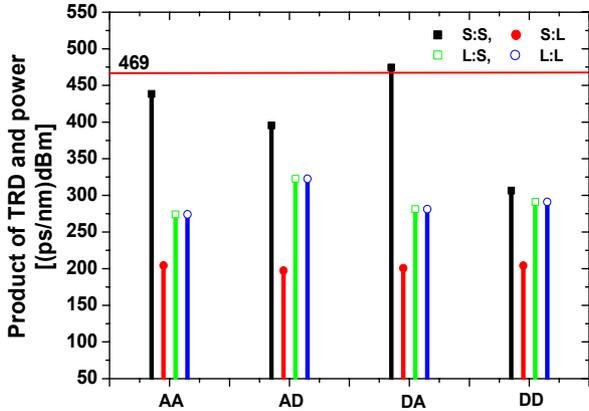


그림 5. NRD와 입사 전력의 곱
Fig. 5. The product of NRD and launch power.

그림 5에서 469라고 표시된 직선은 conventional 분산 제어 링크에서의 NRD와 입사 전력의 곱이다. 앞서 그림 4를 통해서도 확인했지만 16가지 분산 제어 링크 구조 중 S:S의 RDPS 편차를 가지면서 DA로 분포시킨 링크를 제외한 나머지 링크 구조에서의 보상 효과가 conventional에 비해 우수하지 못하다는 것을 확인할 수 있다. 이의 가장 큰 이유는 OPC를 중심으로 FHS와 SHS에서의 평균 RDPS 값이 서로 같지 않기 때문이라고 판단된다. OPC가 적용되기 위한 가장 우선되는 조건은 OPC를 중심으로 분산량 분포가 대칭되어야 한다는 것으로 본 연구에서 제안한 분산 맵의 구성에서 이 조건이 깨졌기 때문이다. 하지만 그림 4와 5를 통해 얻을 수 있는 가장 큰 성과는 OPC를 중심으로 FHS와 SHS의 평균 RDPS는 다르지만 인접 fiber span 간에 적은 편차로 RDPS 분포를 FHS에서는 점진적으로 감소하도록, SHS에서는 점진적으로 증가하도록 링크를 구성시키면 conventional 구조보다 다소 보상 효과를 개선시킬 수 있다는 것이다.

IV. 결 론

지금까지 OPC가 전체 전송로 중간이 아닌 6:14 구조의 분산 제어 링크를 제안하고 왜곡된 WDM 채널의 보상 특성을 분석해 보았다. 그동안 OPC를 결합한 분산 제어 링크가 갖는 융통적 링크 구성이 어렵다는 한계를 벗어나기 위한 시도로 OPC의 비대칭 위치 (6:14)를 비롯하여 전반 전송 구획과 후반 전송 구획에서 서로 다른 평균 RDPS 값 설정, 각 전송 반 구획을 구성하는 fiber span의 RDPS가 점진적으로 증가/감소하는 구조 등을 제안된 링크에 적용하였다.

시뮬레이션을 통한 분석 결과 제안한 16가지의 RDPS 분포 패턴 중 인접한 fiber span 간의 RDPS 편차를 적게 하면서 전반 전송 구획을 구성하는 fiber span의 RDPS들을 점진적으로 감소시키는 반면 후반 전송 구획을 구성하는 fiber span의 RDPS들을 점진적으로 증가시킨 분포 패턴이 기존 분산 제어 링크,

즉 모든 fiber span의 RDPS를 균일하게 하는 구조에 비해 WDM 왜곡 보상에 효과가 다소 좋아지는 것을 확인하였다.

제안한 비대칭 구조의 분산 제어 링크에서 대부분의 RDPS 분포 패턴에 따른 왜곡된 WDM 채널 보상 효과가 우수하지 못한 것은 4:16 구조에서 전반과 후반 전송 구획의 평균 RDPS가 일치하지 않음에서 기인했다고 판단된다. 따라서 향후 연구에서는 비대칭 구조의 분산 제어 링크에서 앞서 언급한 한계를 극복할 수 있는 방법을 찾아보고자 한다.

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] X. Liu, Y. Qiao, and Y. Ji, "Reduction of the fiber nonlinearity impairment using optical phase conjugation in 40 Gb/s CO-OFDM systems," *Optics Communications*, Vol. 283, pp. 2749-2753, 2010.
- [3] M. D. Pelusi, "WDM signal all-optical precompensation of Kerr nonlinearity in dispersion-managed fibers," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 25, No. 1, pp. 71-74, 2013.
- [4] 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.
- [5] 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 5x28-GBd PDM 16-QAM signal transmission," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 9, pp. 1821-1827, May 2015.
- [6] 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.
- [7] S. L. Jansen, S. Spälter, G.-D. Khoe, H. de Waardt, H. E. Escobar, L. Marshall, and M. Sher, "16x40 Gb/s over 800 km of SSMF using mid-link spectral inversion," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 16, no. 7, pp. 1763-1765, July 2004.
- [8] 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.
- [9] A. Chowdhury and R. J. Essiambre, "Optical phase conjugation and pseudolinear transmission," *Optics Letters*, vol. 29, no. 10,

pp. 1105-1107, 2014.

[10] S. R. Lee, "Dispersion-managed links formed of SMFs and DCFs with irregular dispersion coefficients and span lengths," *Journal of Information Communication Convergence Engineering*, vol.16, no.2, pp.67-71, June, 2018.

[11] S. R. Lee, "Compensation for the distorted WDM channels in the long-haul transmission link with the randomly distributed SMF lengths and RDPS," *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 19, No. 4, pp. 323-329, Aug. 2015.

[12] S. R. Lee, "Dispersion-managed optical links combined with asymmetrical optical phase conjugation for compensating for distorted WDM signals," *Journal of Information and*

Communication Convergence Engineering, Vol. 14, No. 2, pp. 71-77, Jun. 2016.

[13] 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,

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

[15] N. Kikuchi and S. Sasaki, "Analytical evaluation technique of self-phase modulation effect on the performance of cascaded optical amplifier systems," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 13, No. 5, pp. 868-878. 1995.



홍 성 화 (Sung-Hwa Hong)

1990년 3월 ~ 1996년 2월 : 고려대학교 컴퓨터학과 (이학사)
 2000년 9월 ~ 2002년 8월 : 한국항공대학교 정보통신공학과 (공학석사)
 2000년 9월 ~ 2002년 8월 : 고려대학교 전자컴퓨터공학과 (공학박사)
 2009년 3월 ~ 2011년 8월 : 동양미래대학교 소프트웨어정보학과 교수
 2011년 8월 ~ 현재 : 목포해양대학교 항해정보시스템학부 부교수
 ※ 관심분야 : USN, 홈네트워크, 센서 네트워크, 임베디드 시스템, 계측제어



이 성 렬 (Seong-Real Lee)

1990년 2월 : 한국항공대학교 항공통신정보공학과 (공학사)
 1992년 8월 : 한국항공대학교 대학원 통신정보공학과 (공학석사)
 2002년 2월 : 한국항공대학교 대학원 통신정보공학과 (공학박사)
 2004년 3월 ~ 현재 : 국립목포해양대학교 항해정보시스템학부 교수
 ※ 관심분야 : WDM 전송 시스템, 광의 비선형 현상 분석, 광 솔리톤 전송, USN