

## 80 km × 56 spans의 초장거리 전송 링크에서 왜곡된 WDM 채널의 보상

# Compensation of the Distorted WDM Channels in Ultra-long Transmission Link of 80 km × 56 Spans

이성렬

목포해양대학교 항해정보시스템 학부

Seong-Real Lee

Division of Navigational Information System, Mokpo National Maritime University, Jeollanam-do 530-729, Korea

### [요 약]

분산 제어와 광 위상 공액이 결합된 초장거리 광전송 링크의 구조를 제안하였다. 전체 전송 링크는 80 km (단일 모드 광섬유 span) × 56 fiber span으로 구성된다. 왜곡된 파장 분할 다중 채널을 보상하기 위하여 각 fiber span의 단일 모드 광섬유 길이와 중계 구간 당 잉여 분산을 점진적으로 증가/감소시키는 인위적 분포 구조를 채택하였다. 다른 선행 연구에서 제안된 인위적 분포는 fiber span이 많아질수록 보상 효과가 줄어들 수 있기 때문에 인위적 분포 패턴을 9개의 fiber span 마다 반복시키는 구조를 분산 제어와 광 위상 공액 링크에 적용하였다. 시뮬레이션 결과 제안된 4개의 분포 패턴 중 특정한 인위적 분포 패턴이 적용된 링크를 사용하면 기존에 제안되었던 반복이 없는 인위적 분포에 비해 왜곡된 WDM 채널의 보상 효과가 다소 크게 나타나는 것을 확인하였다.

### [Abstract]

The configuration of ultra-long optical transmission link with dispersion management and optical phase conjugation is proposed. The whole transmission link consist of 80 km (single mode fiber span) × 56 fiber spans. The artificial distribution of single mode fibers' lengths and residual dispersions in fiber spans, which are gradually increased/decreased as the span number is increased, is adopted to compensate for the distorted wavelength division multiplexed channels. Since the compensation effect through the artificial distribution in the previous researches is expected to decrease as the number of fiber spans are increased, three-time repetition of the artificial distribution patterns at intervals of 9 fiber spans applied into the link with dispersion management and optical phase conjugation is proposed. From the simulation results, it is confirmed that the compensation in the link configured by the special distribution pattern among 4 proposed patterns is slightly improved than the link configured by the conventional method, which is designed by the repeat-less distribution pattern.

**Key word** : Dispersion management, Optical phase conjugation, Residual dispersion per span, Artificial distribution, Single mode fiber.

<https://doi.org/10.12673/jant.2019.23.3.251>



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 14 May 2019; Revised 29 May 2019

Accepted (Publication) 25 June 2019 (30 June 2019)

\*Corresponding Author; Seong-Real Lee

Tel: +82-61-240-7264

E-mail: reallee@mmu.ac.kr

## I. 서론

현재 광통신 시스템에서 초장거리 (ultra-long haul) 데이터 전송은 단일 모드 광섬유 (SMF; single mode fiber)를 주 전송로 사용하여 이루어지고 있다. 그러나 SMF가 갖는 고유의 손실 (loss)로 인해 SMF를 단일 구간으로 구성하는 방식이 아닌 적당한 길이 (주로 50 km - 80 km) 간격으로 광 증계기를 설치하여 장거리를 구현한다. 여기서 광 증계기로 구분되는 간격을 fiber span이라 한다. 과거에는 증폭, 재생 과정을 거쳐 광 증계가 이루어졌지만 요즘은 전송되어 온 광 신호를 펌핑 (pumping)에 의해 직접 증폭하는 에르븀 첨가 광섬유 증폭기 (EDFA; erbium-doped fiber amplifier)와 같은 광섬유 증폭기를 fiber span 마다 삽입하여 광 증계를 한다[1]. EDFA가 적용된 초기 시스템에 비해 현재 적용되고 있는 EDFA의 대역폭이 매우 신장되어 파장 분할 다중 (WDM; wavelength division multiplexed) 신호와 같은 초광대역 데이터를 장거리로 전송할 수 있다[2].

그러나 EDFA와 같은 광섬유 증폭기를 적용한 링크에서는 광 신호 강도(intensity)의 증폭이 필연적으로 나타나게 되고, 강도의 세기에 의존하는 자기 위상 변조 (SPM; self-phase modulation), 상호 위상 변조 (XPM; cross-phase modulation), 4-광파 혼합 (FWM; four-wave mixing) 등의 광섬유가 갖는 Kerr 효과에 의해 비선형 현상이 발생하게 된다[3]. 이 비선형 현상은 전송되는 광 신호에 영향을 주어 시간적(temporal)이고 공간적 (spatial, 주파수적이라고도 한다)인 신호 왜곡을 일으키게 된다[4]. 이와 더불어 SMF와 같은 silica 광섬유는 광파가 갖는 다양한 파장에 의한 시간적 퍼짐 (temporal broadening)을 일으키는 색 분산 (chromatic dispersion)을 본질적으로 가지고 있어 신호의 품질을 저하시킨다[4].

이들에 의한 광 신호 왜곡을 보상하기 위한 다양한 기법 중 분산 제어 (DM; dispersion management)와 광 위상 공액 (optical phase conjugation)은 매우 효과적이고, 저자의 주된 연구 관심 사항이었다. DM은 SMF의 색 분산에 의해 왜곡된 신호를 보상하기 위해 SMF와는 반대되는 분산 특성을 갖는 적당한 길이의 분산 보상 광섬유 (DCF; dispersion compensating fiber)를 추가하여 전체 경로에서 축적된 총 분산 (NRD; net residual dispersion)을 조절하는 방법이다 [5],[6]. 반면 광 위상 공액은 일반적으로 전체 전송로 중간에 위치한 광 위상 공액기 (OPC; optical phase conjugator)를 통해 색 분산에 의한 왜곡뿐만 아니라 Kerr 비선형 왜곡을 보상하는 방법이다 [7],[8]. 즉 송신단에서 출발하여 색 분산과 Kerr 비선형 효과에 의해 왜곡되어 도달한 광 신호를 OPC에서 위상 공액 변환시켜 나머지 전송 구간을 전파시키면 수신단에서 왜곡이 보상된 신호를 얻을 수 있는 방법이다.

그러나 DM은 Kerr 비선형 왜곡 보상에는 별 효과 없다는 한계[9]와 광 위상 공액은 OPC 전후 전송 구간에서의 분산 분포와 광 전력 분포가 OPC를 중심으로 대칭이 되어 있어야 보상이

효과적으로 얻어진다는 실제 구현에서의 어려움[10]이 있다. 하지만 이 둘을 광전송 링크의 구조에 따라 적절히 조합하면 각 기술이 갖는 단점이 어느 정도 극복된다는 연구들이 보고되었다 [11],[12].

저자 또한 여러 연구를 통해 DM과 광 위상 공액이 결합된 링크를 제안하였고, 이들을 통해 40 Gbps × 24 채널 WDM 신호를 효과적으로 보상하여 고품질로 전송할 수 있다는 것을 보였다 [13]-[16]. 기존 다른 연구자들에 의해 제안된 DM과 광 위상 공액이 결합된 링크의 구조가 고정된 형태 (이하 “균일 분포”)를 띄고 있어 이들 기술의 한계인 융통적 링크 구성에 제한을 갖는다는 단점을 극복하기 위해 fiber span을 구성하는 SMF 길이와 각 증계 구간 당 잉여 분산량 (RDPS; residual dispersion per span)을 랜덤하게 분포시키는 구조 [13],[14]와 이들을 점진적으로 증가/감소시키는 형태의 인위적 분포 구조 [15],[16]를 제안하였다.

선행 연구들을 통해 랜덤 구조가 링크의 다양한 형태를 만들 수 있다는 장점이 있지만 경우에 따라 균일 분포보다 보상 효과가 현저히 떨어진다는 것을 확인하였다. 반면 인위적 분포는 전체적인 분산 맵 (dispersion map; 송신단부터 수신단까지의 분산 분포 프로파일)이 OPC를 중심으로 대칭의 형태를 띄면 균일 분포에서 보다 왜곡된 WDM 신호의 보상 효과가 더욱 좋아지는 것을 확인하였다.

그러나 인위적 분포를 fiber span의 수가 많은 장거리 전송 링크에 적용하면 보상 효과가 줄어들 수 있다는 것을 예상할 수 있다. 인위적 분포를 통한 보상 효과의 제고는 균일 분포와는 달리 fiber span 간 SMF 길이와 RDPS 크기가 차이가 있기 때문이고, 더욱이 그 차이가 클수록 보상 효과가 증가하기 때문이다. 하지만 fiber span의 개수가 많아질수록 fiber span 간 편차가 줄어들게 되어 결국 균일 분포와 큰 차이가 없는 링크 구조가 되어 원하는 만큼 이상의 보상 효과를 얻을 수 없다고 판단할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 그동안 저자가 제안하였던 SMF 길이와 RDPS를 인위적으로 분포시킨 구조 [15],[16]를 초장거리 광 전송 링크에 맞게 개선하여 적용해 보도록 한다. 제안하는 인위적 분포 구조의 링크를 통해 40 Gbps × 24 채널 WDM 신호를 전송하는 경우 보상 정도를 분석한다. 본 연구에서 고려하는 전체 링크는 56개의 fiber span으로 구성되고 각각의 SMF의 평균 길이는 80 km이다.

## II. 시뮬레이션 모델링과 성능 분석

그림 1은 WDM 신호의 보상을 위해 전체 전송로 중간의 OPC (mid-way OPC)를 포함한 80 km × 56 fiber span의 전송 링크 구조를 나타낸 것이다. 그림 1에서 Tx와 Rx는 각각 24개의 WDM 송신기들과 수신기들을 의미한다. 각 fiber span은 DM을 위해 SMF에 DCF가 추가되는 구조를 갖는다. 그러나 각

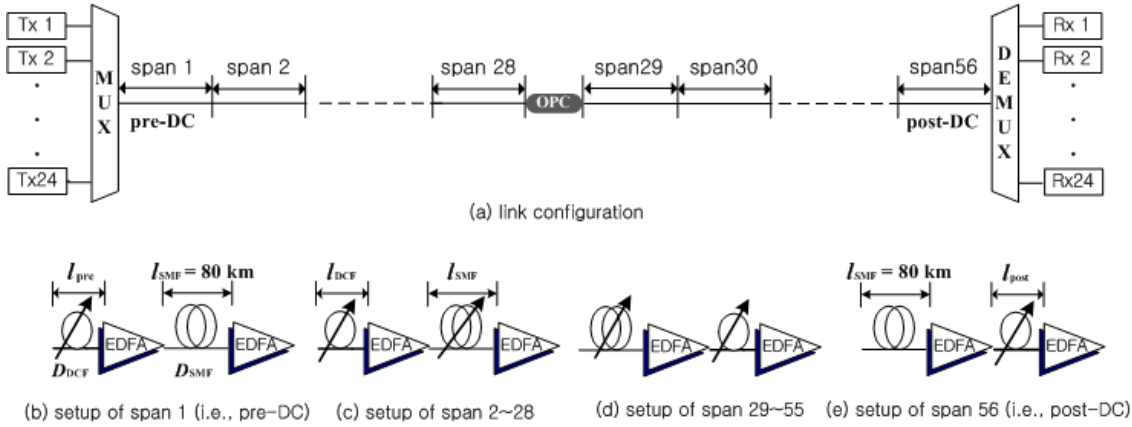


그림 1. 24×40 Gbps WDM 전송 시스템 구조  
 Fig. 1. Configuration of 24×40 Gbps WDM transmission system.

표 1. RDPS 편차에 따른 실제 RDPS 값

Table 1. The exact RDPSs were decided by deviations.

Deviation of RDPS	Exact RDPSs [ps/nm]								
20	120	140	160	180	200	220	240	260	280
40	40	80	120	160	200	240	280	320	360
60	-40	20	80	140	200	260	320	380	440
80	-120	-40	40	120	200	280	360	440	520
100	-200	-100	0	100	200	300	400	500	600
120	-280	-160	-40	80	200	320	440	560	680
140	-360	-220	-80	60	200	340	480	620	760
160	-440	-280	-120	40	200	360	520	680	840
180	-520	-340	-160	20	200	380	560	740	920
200	-600	-400	-200	0	200	400	600	800	1000

fiber span을 구성하는 광섬유의 배열은 Tx부터 midway OPC까지 (이를 ‘전반 전송 구획’이라 함)는 그림 1(b)와 1(c)에서처럼 DCF 다음에 SMF가 오도록 한 반면 midway OPC부터 Rx까지 (이를 ‘후반 전송 구획’이라 함)는 그림 1(d)와 1(e)에서처럼 그 반대의 배열, 즉 SMF가 DCF 앞에 오도록 하였다. 이는 전체적으로 보았을 때 midway OPC를 중심으로 각 광섬유의 배열이 대칭이 되어 결과적으로 분산 맵을 대칭시키기 위해서이다.

그림 1(c)와 1(d)에서 확인할 수 있듯이 첫 번째와 마지막을 제외한 나머지 fiber span을 구성하는 SMF와 DCF의 길이는 span마다 달라진다. 이는 본 논문의 목적인 SMF 길이와 RDPS를 인위적으로 분포(artificial distribution) 시키기 위해서이다. 본 연구에서 고려한 인위적 분포 방식은 전송 반 구획별로 하나의 패턴을 띄게 하는 것과 동일 패턴을 세 번 반복시키는 것의 두 종류이다.

먼저 한 패턴의 경우 각 fiber span의 DCF 길이에 의해 결정되는 RDPS는 최소 -710 ps/nm부터 최대 1,110 ps/nm까지 (fiber span 간 6 ps/nm 또는 7 ps/nm 간격) 각기 다른 27개의 값이 점진적으로 증가(ascending)/감소(descending)되도록 하였다. 또한 점진적으로 증가/감소되는 SMF의 길이는 각 전송 반 구획 내에서 최소 67 km부터 최대 93 km까지로 가정하였다. 이는 인접한 fiber span 간의 편차가 1 km가 됨을 의미한다. 이 경우

SMF 길이 편차가 1 km이기 때문에 균일 분포에서의 SMF 길이 값들과 큰 차이를 보이지 않는다.

이러한 문제점을 해결할 것으로 기대되는 인위적 분포 방식이 동일 패턴을 세 번 반복시키는 구조이다. 이 경우, SMF 길이는 최소 64 km부터 최대 96 km (인접 fiber span 사이의 간격 4 km으로 총 9개)까지 각 전송 반 구획에서 9개의 fiber span마다 동일한 분포를 세 번 반복시켰고, 이와 더불어 RDPS도 9개의 fiber span 간격으로 세 번에 걸쳐 인위적으로 분포시켰다. 또한 RDPS를 인위적으로 분포시키는 경우 인접 fiber span과의 RDPS 편차를 표 1과 같이 20 ps/nm부터 200 ps/nm까지 다양하게 고려하였다. 표 1의 10가지의 모든 경우 한 전송 반 구획에서의 평균 RDPS는 200 ps/nm이다.

DM 전송로를 구성하는 각 fiber span들의 SMF 길이와 RDPS를 인위적으로 분포시킨다는 것은 fiber span이 증가할수록 점진적으로 이들을 점점 증가/감소시키는 것을 의미한다. 앞으로 이들의 분포 패턴은 본 연구에서 분석하는 두 가지 인위적 방식 모두 각 전송 반 구획에서의 “SMF 분포 순서:RDPS 분포 순서”를 바탕으로 기호로 표시하여 분석하였다. 즉 전송 반 구획에서 SMF 길이와 RDPS가 한 번만 반복하는 경우는 A:A-D:D, A:D-D:A, D:A-A:D와 D:D-A:A의 4가지로 표시되는 구조들을 살펴본다. 예를 들어, A:D-D:A의 의미는 전반 전송

구획에서 이들을 구성하는 fiber span 각각의 SMF 길이는 OPC에 가까워질수록 점진적으로 증가하고 동시에 RDPS의 크기는 점진적으로 감소하는 분포를 띄는 구조이다. 반면에 후반 전송 구획에서의 fiber span 각각의 SMF 길이는 수신단에 가까워질수록 점진적으로 감소하고 동시에 RDPS의 크기는 점진적으로 증가하는 분포를 띄는 구조를 의미한다.

반면 인위적 분포가 동일하게 3번 반복하는 구조에서는 3(a:b)-3(c:d)의 형태로 기호를 표현하였다. 여기서 3은 3번 반복되는 패턴을 의미한다. 예를 들어, 3(A:A)-3(D:D)은 전반 전송 구획에서 최초 9개의 fiber span에서 그 번호가 증가할수록 SMF 길이와 RDPS가 동시에 점진적으로 증가하고 동일한 크기의 SMF 길이와 RDPS가 다음 9개 span과 그 다음 9개 span에서 반복하는 반면 후반 전송 구획에서 29번부터 37번까지의 9개의 fiber span에서 그 번호가 증가할수록 SMF 길이와 RDPS가 동시에 점진적으로 감소하고 동일한 크기의 SMF 길이와 RDPS가 38번부터 46번까지의 9개 span과 47번부터 55번까지의 9개 span에서 반복하는 구조를 의미한다. 이 외에 3(A:D)-3(D:A), 3(D:A)-3(A:D)와 3(D:D)-3(A:A)를 포함 총 4가지 구조들에서의 왜곡된 WDM 채널의 보상을 분석한다.

각 fiber span마다 RDPS를 갖기 때문에 (평균적으로 200 ps/nm) NRD는 매우 큰 값을 가질 수밖에 없고, WDM 채널의 효과적 보상을 위해서는 NRD를 없애거나 낮추어 주어야 한다. 본 연구에서는 그림 1(a)에 보인 바와 같이 첫 번째와 마지막 fiber span의 DCF를 통해 NRD를 조절 (이를 DC (dispersion calibrator)라고 부름)하도록 하였다. 본 연구에서는 2가지의 DC 방식을 고려하였다.

즉 그림 1(a)에서 마지막 중계 구간의 DCF 길이, 즉  $l_{post}$ 는 후반 전송 구획의 NRD를 0 ps/nm가 되도록 고정시키고 첫 번째 중계 구간 (span 1)의 DCF 길이, 즉  $l_{pre}$ 만을 통해 전체 링크에서의 NRD를 조절하는 역할을 수행하는 pre-DC와 이와는 반대되는 역할 분담, 즉 span 1의 DCF 길이, 즉  $l_{pre}$ 는 전반 전송 구획의 NRD를 0 ps/nm가 되도록 고정시킨 상태에서 span 56의 DCF 길이, 즉  $l_{post}$ 만을 통해 전체 링크에서의 NRD를 조절하는 역할을 수행하는 post-DC의 2가지 방식으로 설계하였다. 그림 1(b)와 1(e)에서 표현했듯이, pre-DC와 post-DC를 수행하는 fiber span에서 SMF 길이는 모두 80 km로 고정하였다. 이는 동일한 인위적 분포 패턴이 3번 반복 가능한 총 span의 개수가 27개까지이기 때문에 시뮬레이션의 간소화를 위한 것이다.

그림 1에서 SMF의 기타 파라미터는 다음과 같이 모델링하였다. 손실 계수 :  $\alpha_{SMF} = 0.2 \text{ dB/km}$ , 분산 계수 :  $D_{SMF} = 17 \text{ ps/nm/km} (@1,550 \text{ nm})$ , 비선형 계수 :  $\gamma_{SMF} = 1.35 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1} (@1,550 \text{ nm})$ . 또한 DCF의 기타 파라미터는 다음과 같이 하였다. 손실 계수 :  $\alpha_{DCF} = 0.6 \text{ dB/km}$ , 분산 계수 :  $D_{DCF} = -100 \text{ ps/nm/km} (@1,550 \text{ nm})$ , 비선형 계수 :  $\gamma_{DCF} = 5.06 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1} (@1,550 \text{ nm})$ .

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  $128 (=2^7)$  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  $0.65 \times$  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 [13]-[16].

광전송 링크를 통해 손실과 비선형 효과의 영향을 겪으면서 전파하는 각 채널들은 비선형 슈뢰딩거 방정식 (NLSE; nonlinear Schrödinger equation)에 의해 표현된다[4]. 본 논문에서 40 Gbps의 24 채널 WDM 전송을 위한 NLSE의 수치적 분석은 단계 분할 푸리에 (SSF; split-step Fourier) 기법[4]에 따라 Matlab으로 구현하여 이루어졌다.

### III. 시뮬레이션 결과 및 검토

그림 2는 입사 전력이 3 dBm인 각 WDM 채널들을 인위적 분포가 3번 반복 (이하 “3-time repeat”라 함)하는 4가지 형태의 링크를 통해 전송시킨 경우 최악 채널의 눈 열림 페널티 (EOP; eye opening penalty)를 나타낸 것이다. 또한 이러한 구조의 링크에서 WDM 채널 보상에 2가지의 DC와 10가지의 RDPS 편차가 미치는 영향도 함께 고려하였다. 그림 2(a)와 (b)는 각각 pre-DC와 post-DC에 의해 NRD가 10 ps/nm로 설정된 링크와 -10 ps/nm로 설정된 링크에서의 결과이다. 수신 성능의 비교를 위해 동일 조건에서의 균일 분포 링크에서의 EOP와 한 번만 분포하는 구조 (그림 2에서 “without repetition”에 해당하며, 이하 “무반복”이라 함)의 링크에서의 EOP도 동시에 나타냈다. 무반복의 경우 A:A-D:D가 3-time repeat인 경우의 3(A:A)-3(D:D)와 비교 대상이 되고, 마찬가지로 A:D-D:A는 3(A:D)-3(D:A), D:A-A:D는 3(D:A)-3(A:D), D:D-A:A는 3(D:D)-3(A:A)의 비교 대상이 된다.

우선 그림 2로부터 3-time repeat의 반복 구조에서 인위적 분포 패턴에 따라 보상 특성이 달라지는 것을 알 수 있다. 단순히 균일 분포에서의 보상 특성과 비교해보면, SMF 길이와 RDPS의 인위적 분포 형태가 3(D:D)-3(A:A)이면서 pre-DC에 의해 NRD가 10 ps/nm로 설정된 링크와 post-DC에 의해 NRD가 -10 ps/nm로 설정된 링크를 사용하면 RDPS 편차에 관계없이 균일 분포에서보다 보상 효과를 늘릴 수 있다는 것을 알 수 있다.

그러나 3-time repeat 구조의 인위적 분포에서의 왜곡된 WDM 채널의 보상 효과가 기존의 방식인 무반복에 의한 인위적 분포 링크에서보다 전반적으로 우수하지 못하다는 것을 확인할 수 있다. 다만 3-time repeat 구조의 인위적 분포 패턴 중 3(D:A)-3(A:D)로



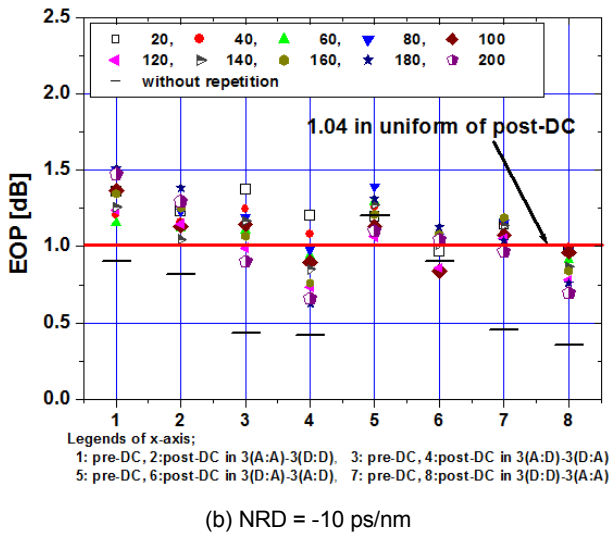
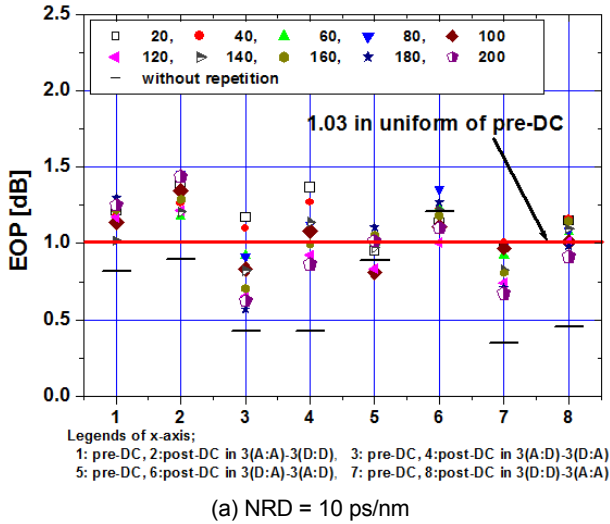


그림 2. 입사 전력이 3 dBm인 경우 최악 채널의 EOP  
**Fig. 2.** The EOP of the worst channel in case of transmitting 3 dBm launch power.

분포한 경우 RDPS 편차를 적절히 선택하면 D:A:A:D로 분포한 링크에서보다 왜곡된 WDM 채널 보상을 약간이나마 개선할 수 있는 것도 동시에 파악할 수 있다.

광통신 시스템에서 수신 성능 기준은 주로 1 dB EOP를 사용한다. 이는  $10^{-12}$  비트 에러율 (BER; bit error rate)에 상응하는 값이다 [17]. 그림 3은 3-time repeat 구조에서의 유효 입사 전력 (effective launch power)의 크기를 RDPS 편차와 인위적 분포 패턴에 따라 나타낸 것이다. 여기서 유효 입사 전력은 최악 채널의 EOP가 1 dB가 되는 입사 전력의 크기를 의미한다. Pre-DC에 의해 NRD가 10 ps/nm로 설정된 링크와 post-DC에 의해 NRD가 -10 ps/nm로 설정된 링크 모두에서 RDPS 편차가 100 ps/nm 이하로 비교적 적은 경우는 3(D:D)-3(A:A) 분포 패턴이, RDPS 편차가 120 ps/nm 이상인 경우는 3(A:D)-3(D:A) 분포 패턴이 큰 전력 전송에 유리하다는 것을 그림 3을 통해 확인할 수 있다.

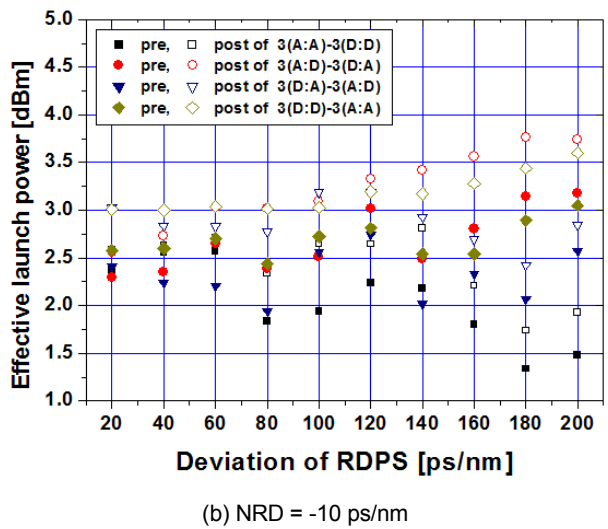
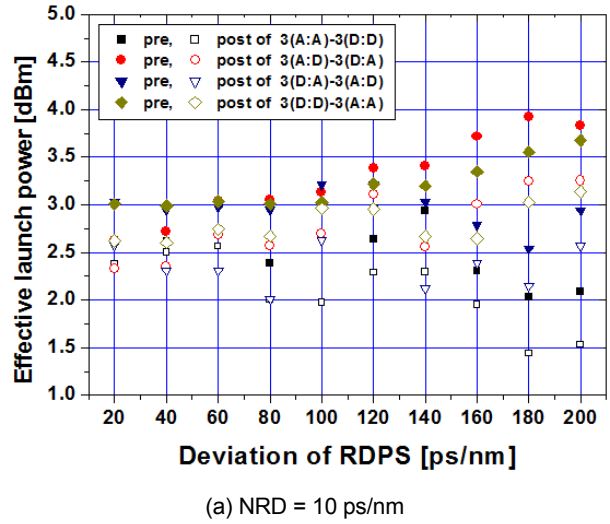


그림 3. RDPS 편차에 따른 유효 입사 전력 값  
**Fig. 3.** Effective launch power depending on the deviation of RDPS.

본 연구에서는 저자의 선행 연구 결과들 [13]-[16]에 기초하여 NRD를 -10 ps/nm와 10 ps/nm의 두 가지에 대해서만 시뮬레이션을 수행하지만, 선행 연구를 통해 특정 입사 전력에서 EOP를 1 dB 이하로 만들 수 있는 NRD는 위의 두 값뿐만이 아니라는 것도 동시에 확인하였다. 그림 4는 A:D-DA와 3(A:D)-3(DA) 분포를 갖는 링크를 통해 WDM 채널을 전송한 경우 1 dB 이하의 EOP를 얻을 수 있는 NRD 범위를 입사 전력에 따라 나타낸 것이다. 그림 4에서 dRDPS는 RDPS 편차를 의미하고, 180 ps/nm에서의 결과만을 보였다.

그림 4를 통해 다른 입사 전력에서는 유효 NRD 특성이 비슷하지만, 비교적 입사 전력이 큰 1 dB 이상에서는 3(A:D)-3(DA)의 인위적 분포 패턴을 갖는 링크는 A:D-DA의 인위적 분포 패턴의 링크에 비해 좋지 못한 유효 NRD 특성을 보이는 것을 알 수 있다.

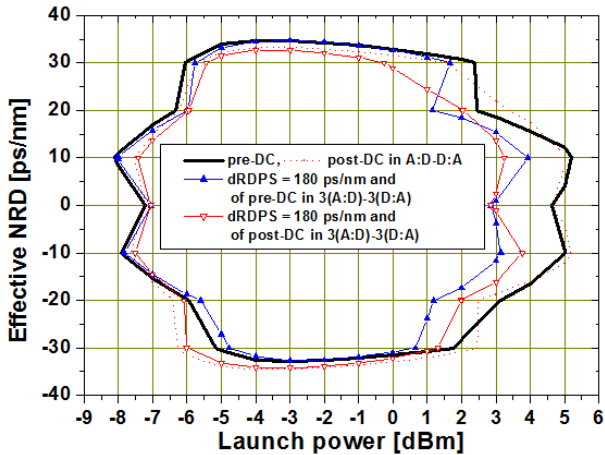


그림 4. 기본 분포 패턴이 A:D-D:A인 구조에서의 유효 NRD  
 Fig. 4. Effective NRDs in the configurations based on A:D-D:A distribution pattern.

본 연구에서 고려하고 있는 인위적 분포 패턴 모두의 유효 NRD 특성을 하나의 그래프로 표현하기 어려운 점이 있어 좀 더 쉽게 이해할 수 있는 정량적 척도를 고려해 보았다. 그림 4를 통해 알 수 있듯이 유효 NRD 특성은 등고선(contour) 형태를 띠고 있기 때문에 이 등고선의 면적을 구할 수 있고, 이 면적이 넓을수록 유효 NRD 특성이 우수한 링크 구조라고 판단할 수 있다. 등고선 면적을 NRD와 입사 전력의 곱 (product of NRD and launch power)으로 정의하였다.

그림 5는 3-time repeat 구조와 무반복 구조에서의 DC 방식과 특정 RDPS 편차에 따른 NRD와 입사 전력의 곱을 나타낸 것이다. 그림 5에서 보이는 바와 같이 RDPS 편차가 180 ps/nm로 3(D:A)-3(A:D) 패턴으로 분포하는 링크에서의 왜곡된 WDM 채널의 보상 효과가 무반복 구조인 D:A-A:D에 비해 다소 좋아지는 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 그림 2에서 얻은 결과와 일치하는 것이다. 이러한 결과들을 좀 더 자세히 살펴보기 위하여 그림 6에 해당하는 인위적 분포 패턴들의 유효 NRD 특성을 나타냈다.

그림 2의 결과를 다시 살펴보면 무반복 구조의 4가지의 인위적 분포 패턴 중 D:A-A:D 분포는 다른 3가지의 분포 패턴에 비해 왜곡된 WDM 채널에 대한 보상 효과가 떨어진다. 특히 post-DC에 의해 NRD가 결정되는 구조에서 보상 효과가 더욱 떨어진다. 이들 결과를 전체적으로 검토해 보면, 다른 외적 요인에 의해 전반 전송 구획의 각 fiber span들의 SMF 길이는 점진적으로 감소시키고 동시에 RDPS는 점진적으로 증가시키는 반면 후반 전송 구획의 각 fiber span들의 SMF 길이는 점진적으로 증가시키고 동시에 RDPS는 점진적으로 감소시키는 형태로 분포시키고자 한다면 각각의 SMF 길이와 RDPS의 편차를 크게 유지할 수 있는 인위적 분포 구조가 바람직하다고 판단할 수 있다. 즉 인위적 반복 패턴을 전송 반 구획에 한 번만 적용하는 구조보다 2번 이상 반복시키는 구조가 왜곡된 WDM 채널의 보상에 더욱 효과적이라고 할 수 있다.

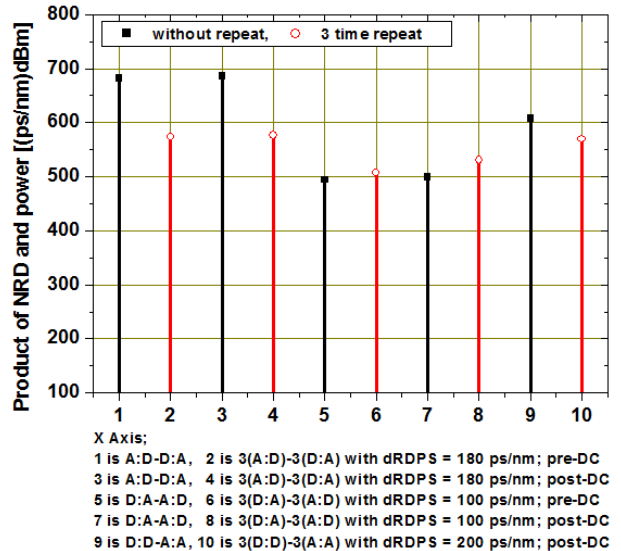


그림 5. NRD와 입사 전력의 곱  
 Fig. 5. The product of NRD and launch power.

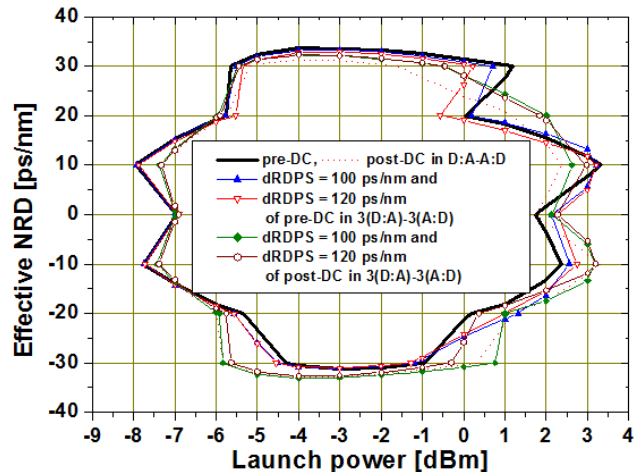


그림 6. 기본 분포 패턴이 D:A-A:D인 구조에서의 유효 NRD  
 Fig. 6. Effective NRDs in the configurations based on D:A-A:D distribution pattern.

#### IV. 결론

SMF 길이와 RDPS가 fiber span에 따라 인위적으로 분포하는 DM을 초장거리 (80 km × 56 spans) 링크에 적용한 경우에서의 40 Gbps × 24 채널 WDM 신호의 왜곡 보상 효과를 살펴보았다. SMF를 통한 중계 거리의 제한에 따라 fiber span이 늘어날수록 span 간 SMF 길이 편차가 줄어들어 인위적 분포 효과가 더욱 줄어드는 문제를 해결하기 위하여 동일한 인위적 분포 패턴을 3번 반복시키는 구조를 제안하고 56 spans에 적용하였다.

시뮬레이션을 통하여 제안된 인위적 반복 분포 중 3(D:A)-3(A:D), 즉 전반 전송 구획은 9개의 fiber span 간격으로 SMF 길이는 점진적으로 감소시키고 동시에 RDPS는 점진적으로 증가

시키는 인위적 패턴을 3번 반복시키고, 후반 전송 구획은 9개의 fiber span 간격으로 SMF 길이는 점진적으로 증가시키고 동시에 RDPS는 점진적으로 감소시키는 인위적 패턴을 3번 반복시키는 구조가 동일한 인위적 분포 패턴을 한 번 적용한 구조에 비해 왜곡된 WDM 채널의 보상 효과가 다소 개선되는 것을 확인하였다.

본 연구에서 제안한 4가지의 인위적 반복 분포 방식 모두가 왜곡된 WDM 채널 보상에 만족할만한 효과를 보이지는 못했지만, DM과 OPC가 결합된 방식이 고품질 전송을 위한 초장거리 광전송 링크를 구성하는 효과적인 방법 중 하나라는 것을 확인할 수 있었다.

## REFERENCES

- [1] M. Y. Hamza, S. Tariq, and L. Chen, "Dispersion in the presence of nonlinearity in optical fiber communications," in *Proceedings of 2006 10th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems*, Singapore, pp. 1-5, 2006.
- [2] M. F. Uddin, A. B. M. N. Doulah, A. B. M. I. Hossain, M. Z. Alam, and M. N. Islam, "Reduction of four-wave mixing effect in an optical wavelength-division multiplexed system by utilizing different channel spacing and chromatic dispersion schemes," *Optical Engineering*, Vol. 42, No. 9, pp. 2761-2767, 2003.
- [3] M. Wu, W. I. Way, "Fiber nonlinearity limitations in ultra-dense WDM systems," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 22, No. 6, pp. 1483-1498, 2004.
- [4] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, 3rd ed. San Francisco:CA, Academic Press, 2001.
- [5] P. M. Lushnikov, "Oscillating tails of a dispersion-managed soliton," *Journal of the Optical Society of America B*, Vol. 21, No. 11, pp. 1913-1918, 2004.
- [6] M. Suzuki and N. Edagawa, "Dispersion-managed high-capacity ultra-long-haul transmission," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 21, No. 4, pp. 916-929, 2003.
- [7] A. Yariv, D. Feketa, and D. M. pepper, "Compensation for channel dispersion by nonlinear optical phase conjugation," *Optics Letters*, Vol. 4, pp. 52-54, 1979.
- [8] 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, 2013.
- [9] M. A. Talukder, and M. N. Islam, "Performance of bi-end compensation in a wavelength-division multiplexed system considering the effect of self phase modulation," *Optical Engineering*, Vol. 44, No. 11, pp. 115005-1-115055-6, 2005.
- [10] 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, 1996.
- [11] A. Chowdhury and R.-J. Essiambre, "Optical phase conjugation and pseudolinear transmission," *Optics Letter*, Vol. 29, No. 10, pp. 1105-1107, 2004.
- [12] P. Minzioni and A. Schiffrini, "Unifying theory of compensation techniques for intrachannel nonlinear effects," *Optical Express*, Vol. 13, No. 21, pp. 8460-8468, 2005.
- [13] S. R. Lee, "Effects of deviations of RDPS on the compensation for distorted WDM channels in dispersion-managed optical transmission links of random distribution schemes," *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 19, No. 2. pp. 147-152, Apr. 2015.
- [14] S. R. Lee, "Compensation of the distorted WDM channels depending on the control position of net residual dispersion in dispersion-managed optical link with the randomly distributed SMF lengths and RDPS," *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 21, No. 2, pp. 187-192, Apr. 2017.
- [15] S. R. Lee, "Dispersion-managed optical links with the ascending or descending of SMF lengths and RDPS as the fiber span is increased," *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 20, No. 5, pp. 462-467, Oct. 2016.
- [16] S. R. Lee, "Dispersion managed optical transmission links with an artificial distribution of the SMF length and residual dispersion per span," *Journal of Information and Communication Convergence Engineering*, Vol. 12, No. 2, pp. 75-82, 2014. 6. 30
- [17] 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.



**이 성 렬 (Seong-Real Lee)**

1990년 2월 : 한국항공대학교 항공통신정보공학과 (공학사)

2002년 2월 : 한국항공대학교 대학원 통신정보공학과 (공학박사)

2004년 3월 ~ 현재 : 국립목포해양대학교 항해정보시스템학부 교수

※ 관심분야 : WDM 전송 시스템, 광의 비선형 현상 분석, 광 솔리톤 전송

1992년 8월 : 한국항공대학교 대학원 통신정보공학과 (공학석사)

2002년 6월 ~ 2004년 2월 : (주)에이티엔 기술연구소장