

# SMF 길이와 중계 구간 당 잉여 분산의 분포가 균일한 분산 제어 광전송 링크

## Dispersion-managed Optical Links with the Uniform Distributions of SMF Lengths and Residual Dispersion Per Span

이 성 렬

목포해양대학교 해양정보통신공학과

Seong-Real Lee

Department of Marine Information and Communication Engineering, Mokpo National Maritime University, Jeollanam-do 58628, Korea

### [요 약]

대용량 장거리 광통신 시스템에서 광섬유가 갖는 색 분산과 비선형 효과 때문에 신호 왜곡이 발생한다. MSSSI (mid-span spectral inversion)와 결합된 분산 제어 (DM; dispersion management) 기술은 이러한 단점을 극복할 수 있는 기술 중 하나이다. DM 링크의 가장 간단한 구조는 전송 링크를 구성하는 모든 광 중계 구간의 단일 모드 광섬유 (SMF; single mode fiber) 길이와 중계 구간 당 잉여 분산 (RDPS; residual dispersion per span)을 모두 균일하게 분포시키는 것이다. 본 논문에서는 SMF 길이와 RDPS를 인위적으로 분포시키거나 랜덤하게 분포시킨 링크 구조에서의 성능 평가 시 중요한 기준이 되는 MSSSI와 결합된 균일 분포 DM 링크에서의 시스템 성능을 중계 구간 수에 따라 분석하였다.

### [Abstract]

In high capacity and long haul optical communication systems, signal distortion is induced by chromatic dispersion and nonlinear effects of optical fibers. Dispersion management (DM) combining with mid-spans spectral inversion (MSSSI) is one of the various techniques for overcoming this drawback. The most simple configuration of DM link is obtained by uniformly distributing the lengths of single mode fiber (SMF) and residual dispersion per span (RDPS) over whole fiber spans consisted of optical link. In this paper, the system performances in the uniformly distributed DM link combined with MSSSI are assessed as a function of the number of fiber spans, because the system performances in this configuration are used as the significant performance criterion in other link configurations, such as the artificial distribution or the random distribution of SMF lengths and RDPS.

**Key word** : Dispersion management, Mid-span spectral inversion, Optical phase conjugator, Residual dispersion per span, Net residual dispersion.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2016.20.2.161>



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 10 March 2016; Revised 10 March 2016  
Accepted (Publication) 5 April 2016 (30 April 2016)

\*Corresponding Author; Seong-Real Lee

Tel: +82-61-240-7264

E-mail: reallee@mmu.ac.kr

## I. 서론

분산 제어 (DM; dispersion management)와 MSSSI (mid-span spectral inversion)는 단일 모드 광섬유 (SMF; single mode fiber)가 갖는 색 분산 (chromatic dispersion)과 비선형 효과 (nonlinear effects)에 의해 왜곡되는 광 펄스의 보상 기술들 중 대표적인 기술이다 [1]-[7]. DM은 주 전송로인 양의 분산 계수를 갖는 SMF에서 축적된 분산량을 음의 분산 계수를 갖는 분산 보상 광섬유 (DCF; dispersion compensating fiber)를 부가하여 제거하거나 조절하는 링크 구성 기술로 색 분산에 의한 왜곡 보상에 탁월하다 [2],[3]. 그러나 비선형 효과에 의한 광 신호 왜곡의 보상에는 한계가 있고, 파장 분할 다중 (WDM; wavelength division multiplexing) 전송 시스템에서는 파장이 서로 다른 채널마다 축적되는 총 분산량이 달라지기 때문에 모든 채널에 대하여 동일한 보상을 얻을 수 없다는 단점이 있다 [4].

MSSSI는 전체 전송로의 중간에 광 위상 공액기 (OPC; optical phase conjugator)를 두어 전송되는 광 신호의 스펙트럼을 반전시켜 신호 왜곡을 보상하는 기술이다. 그러나 MSSSI는 신호 왜곡의 효과적 보상 조건인 OPC를 중심으로 국부 분산과 광 전력에 대칭되어야 하기 때문에 OPC를 중심으로 한 전반 전송 구획 (FHTS; former half transmission section)과 후반 전송 구획 (LHTS; latter half transmission section)의 길이와 구조가 같아야 한다는 한계를 갖는다 [6].

이러한 한계를 극복하기 위한 방법으로 MSSSI에서는 OPC를 전체 전송로 중간이 아닌 최적의 위치로 이동시키는 기술이 제안되었고 [7], WDM 전송을 위해서는 DM과 MSSSI를 결합시키는 기술 [8] 등이 제안되었다. 본 논문의 저자도 앞선 연구를 통해 다양한 형태의 DM과 MSSSI를 결합시켜 시스템 성능이 개선되는 전송 링크를 보고하였다 [9]-[12].

DM이 적용된 광 링크 (dispersion-managed optical link)의 설계 파라미터는 각 중계 구간 (fiber span)마다 축적되는 잉여 분산 (RDPS; residual dispersion per span)과 전송로 최종단에서 축적된 총 분산량으로 정의되는 전체 잉여 분산 (NRD; net residual dispersion)이다 [1]. DM만, 또는 DM과 MSSSI가 결합된 광전송 링크의 기본 구조는 광 전송로를 구성하는 각 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS를 균일하게 분포시키는 것이다. 이러한 구성 방법은 링크 구조를 간단히 할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 동시에 링크 구조의 융통성 (reconfigurable)을 제약하기 때문에 다양한 네트워크 구조를 어렵게 할 수 있다. 따라서 본 논문의 저자는 DM과 MSSSI가 적용된 링크의 융통적 구성을 위하여 SMF 길이와 RDPS의 랜덤 분포 [11]와 중계 구간의 수가 증가할수록 점진적으로 SMF 길이와 RDPS를 증가시키거나 감소시키는 인위적 분포 등을 제안하였다 [12].

랜덤 분포와 인위적 분포 모두 성능 개선 정도의 분석은 SMF 길이와 RDPS가 모든 중계 구간에서 균일하게 분포 (uniform distribution)된 링크에서의 성능과의 비교를 통해 이루어진다. 즉 SMF 길이와 RDPS가 균일하게 분포된 링크 구조는 DM과 MSSSI

를 채택한 링크의 가장 기본적인 구조이며, 이 구조에서의 시스템 성능은 광 링크 해석에 꼭 필요한 요소이다.

그러나 저자의 지금까지의 연구에서는 SMF 길이와 RDPS가 균일하게 분포하는 광 링크에서의 성능 해석이 필요에 따라 다양한 형태로 비체계적으로 이루어졌다. 따라서 본 연구에서는 향후 랜덤 분포와 인위적 분포, 또는 그 밖의 다양하게 제안될 수 있는 링크 구조에서의 시스템 성능의 비교 분석에 필요한 SMF 길이와 RDPS가 균일하게 분포하는 광 링크에서의 성능 분석을 체계적으로 수행하여 정리해 보고자 한다.

본 연구에서의 각 중계 구간의 SMF 길이는 80 km, RDPS는 200 ps/nm로 균일하게 하였다. 그러나 향후 다양한 링크 구조와의 성능 비교 분석에 사용하기 위하여 전체 중계 구간의 개수는 10, 30, 50, 70과 90으로 다르게 하였다. 본 연구에서 살펴보는 모든 균일 분포 링크는 40 Gbps × 24 채널 WDM 전송을 위한 구조로 모델링 되었다.

## II. WDM 전송 링크의 구조

그림 1은 24 채널 × 40 Gbps의 WDM 전송 시스템과 이를 위한 광전송 링크의 구조를 나타낸 것이다. 그림 1에 표현했듯이 전체 전송로는  $n$  개의 중계 구간으로 구성된다. 본 연구에서는 총 중계 구간의 개수, 즉  $n$  을 10, 30, 50, 70과 90의 5가지를 고려하였다. 각 중계 구간은 주 전송로인 SMF와 여기서 축적된 분산을 제어하기 위해 추가된 DCF로 구성된다. 하지만 전체 전송로 중간에 위치한 OPC 이전의 FHTS에서는 SMF 앞에 DCF를 삽입한 precompensation의 구조로 구성된 반면, OPC 이후의 LHTS에서는 SMF 다음에 DCF를 삽입한 postcompensation의 구조로 구성하였다. 이러한 구성은 두 전송 구획에서의 광섬유 배열이 OPC를 중심으로 대칭되는 구조이기 때문에 MSSSI를 통한 비선형 보상 효과를 다소 높이기 위한 것이다.

그림 1의 링크에서  $n$ 에 관계없이 모든 중계 구간에서 SMF 길이, 즉  $l_{SMF}$ 는 80 km로 균일하게 하였고, SMF의 손실 계수  $\alpha_{SMF} = 0.2$  dB/km, SMF의 분산 계수  $D_{SMF} = 17$  ps/nm/km(@1,550 nm), SMF의 비선형 계수  $\gamma_{SMF} = 1.35$  W<sup>-1</sup>km<sup>-1</sup>(@1,550 nm)로 하였다. 또한 DCF의 손실 계수  $\alpha_{DCF} = 0.6$  dB/km, DCF의 분산 계수  $D_{DCF} = -100$  ps/nm/km(@1,550 nm), DCF의 비선형 계수  $\gamma_{DCF} = 5.06$  W<sup>-1</sup>km<sup>-1</sup>(@1,550 nm)로 하였다.

첫 번째와 마지막 중계 구간을 제외한 나머지 모든 중계 구간마다 균일하게 적용된 RDPS는 200 ps/nm로 가정하였다. RDPS는  $l_{DCF} = [RDPS + (l_{SMF} \times D_{SMF})] / |D_{DCF}|$ 에 따라 각 중계 구간에 삽입된 DCF의 길이에 의해 조절되는데 RDPS를 200 ps/nm로 고정하려면 각 중계 구간에서 DCF 길이, 즉  $l_{DCF}$ 는 15.6 km가 된다.

각 중계 구간마다 존재하는 RDPS 때문에 NRD는 매우 큰

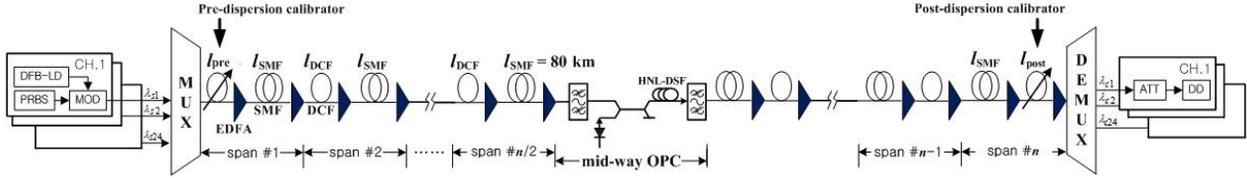


그림 1. 24x40 Gbps WDM 전송 시스템 구조  
 Fig. 1. Configuration of 24x40 Gbps WDM transmission system.

값을 가질 수밖에 없고, WDM 채널의 효과적 보상을 위해서는 NRD를 없애거나 낮추어 주어야 한다. 본 연구에서는 그림 1에 보인 바와 같이 첫 번째 중계 구간 (span #1)과 마지막 중계 구간 (span #n)의 DCF가 각 전송 반구획에서의 NRD를 조절하는 역할을 수행하도록 하였다. 즉 span #1의 DCF 길이, 즉  $l_{pre}$ 를 통해 FHTS에서 축적된 NRD를 조절하는 역할을 수행하고 (이러한 이유로 첫 번째 중계 구간의 DCF를 pre-dispersion calibrator라 칭하였음), span #n의 DCF 길이, 즉  $l_{post}$ 를 통해 LHTS에서 축적된 NRD를 조절하는 역할 (post-dispersion calibrator)을 수행하도록 하였다. 전체 전송 링크에서의 총 NRD는 FHTS와 LHTS에서의 NRD의 합으로 결정된다. 본 연구에서는 시뮬레이션 과정을 간략하게 하기 위하여  $l_{post}$ 의 제어를 통해 LHTS에서 축적된 NRD가 0 ps/nm가 된 상태에서  $l_{pre}$ 만을 조절하여 얻어지는 FHTS에서 축적된 NRD가 전체 전송 링크의 NRD가 되도록 하였다. 즉 그림 1의 전송 링크에서 전체 전송 링크의 NRD는 오직 pre-dispersion calibrator에 의해서만 결정되도록 하였다.

그림 1에 표현된 광전송 링크를 통해 손실과 비선형 효과의 영향을 겪으면서 전파하는 각 채널들은 비선형 슈뢰딩거 방정식 (NLSE; nonlinear Schrödinger equation)에 의해 표현된다. 본 논문에서 40 Gbps의 24 채널 WDM 전송을 위한 NLSE의 수치적 분석은 단계 분할 푸리에 (SSF; split-step Fourier) 기법[13]에 따라 Matlab으로 구현하여 이루어졌다.

### III. WDM 전송 시스템의 구조

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<sup>7</sup>) 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 가정하

였다. 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 [9]-[12].

### IV. 시뮬레이션 결과 및 검토

그림 2는  $n = 10$ 인 전송 링크에는 5 dBm,  $n = 50$ 인 전송 링크에는 3 dBm,  $n = 90$ 인 전송 링크에는 1 dBm의 전력으로 입력된 24개 WDM 채널 중 시스템 성능이 최악인 채널의 눈 열림 패널티 (EOP; eye opening penalty)를 전체 전송 링크의 총 NRD의 변화에 따라 나타낸 것이다. 그림 2의 결과를 살펴보면, 수신된 WDM 채널의 품질이 입사 전력, 중계 구간의 개수( $n$ )와 NRD에 의존하는데, 기타의 조건이 동일한 경우에 대하여 입사 전력이 증가할수록, 그리고 중계 구간의 개수가 증가할수록 보상 정도가 줄어들 것이라는 당연한 예상의 결과가 그대로 나타나는 것을 알 수 있다.

그림 2로부터 얻을 수 있는 중요한 결과는 다양한 입사 전력과 중계 구간 수에 관계없이 특정한 NRD에서 최상의 보상이 이루어진다는 것이다. 좀 더 명확히 말하면 NRD가 10 ps/nm로 설정된 링크에서는 입사 전력과 중계 구간 수에 상관없이 최악의 채널의 EOP가 최소로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 즉 전

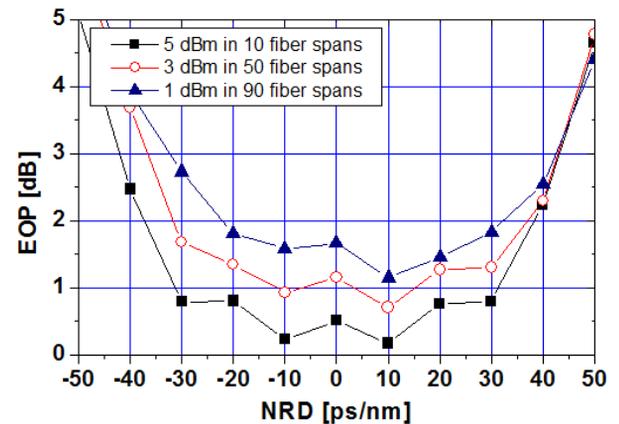


그림 2. NRD에 따른 최악 채널의 눈 열림 패널티  
 Fig. 2. The eye opening penalty of the worst channels as a function of NRD.

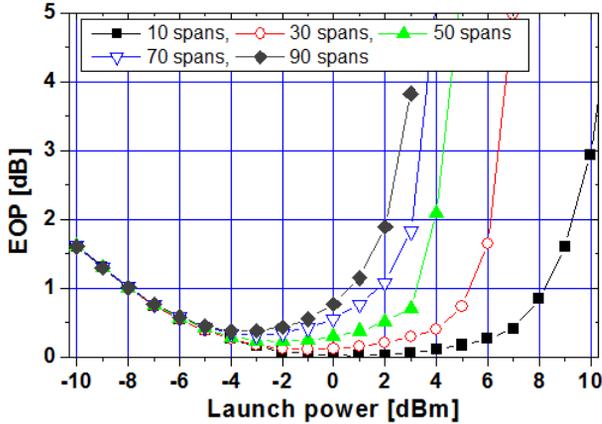


그림 3. 최적의 NRD로 설정된 링크에서 입사 전력에 따른 최악 채널의 눈 열림 패널티

Fig. 3. The EOP of the worst channels as a function of launch power in the optical links with the optimal NRD.

체 전송 링크의 총 NRD를 pre-dispersion calibrator로 제어하는 링크에서의 최적의 NRD는 10 ps/nm인 것을 확인할 수 있다.

그림 3은 그림 2로부터 얻은 결과에 따라 NRD가 10 ps/nm로 설정된 전송 링크에서 중계 구간 개수와 입사 전력에 따른 최악 채널의 EOP를 나타낸 것이다. -4 dBm까지 비교적 작은 입사 전력을 갖는 WDM 채널들의 보상에 있어 전체 링크를 구성하는 중계 구간 수가 큰 영향을 미치지 않지만, 그 이상의 전력으로 입사되는 WDM 채널의 전송에서는 중계 구간 수가 증가할수록 동일한 입사 전력에 대한 보상 효과가 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

광전송 시스템의 수신 성능 판단을 EOP로 수행하는 경우 판단의 기준은 일반적으로 1 dB EOP이다. 이 값은  $10^{-12}$ 의 비트 에러율 (BER; bit error rate)에 해당하고, 1.25의 펄스 폭 확장 비율 (pulse broadening factor)에 상응한다 [14]. 그림 3의 결과를 1 dB EOP를 기준으로 분석하여 보면, 1 dB EOP 이내의 고품질 전송이 가능한 최대 입사 전력의 크기는  $n$ 이 10으로 구성된 경우 8.2 dBm,  $n = 30$ 의 경우 5.1 dBm,  $n = 50$ 의 경우 3.1 dBm,  $n = 70$ 의 경우 1.7 dBm,  $n = 90$ 의 경우 0.5 dBm으로 중계 구간 개수를 20개씩 증가시킬 때마다 고품질을 얻을 수 있는 WDM 채널의 입사 전력 허용치가 큰 폭으로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 즉 WDM 채널들의 전송을 위한 링크가 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS가 균일하게 분포한 비교적 단순한 구조로 되어 있어도 대역폭-전송 거리의 곱 (bandwidth-length (BL) product)에는 한계가 있고, 그 한계는 총 전송 거리가 증가할수록 더욱 커지는 것을 알 수 있다.

그림 4는 입사 전력이 3 dBm인 WDM 채널들 중 최악 채널의 아이 다이어그램으로, 그림 4(a)와 (b)는 각각 NRD가 0 ps/nm과 10 ps/nm로 설정된  $n = 30$ 개인 링크에서, 반면 그림 4(c)와 (d)는 각각 NRD가 0 ps/nm과 10 ps/nm로 설정된  $n = 90$ 인 링크에서 얻은 것이다.

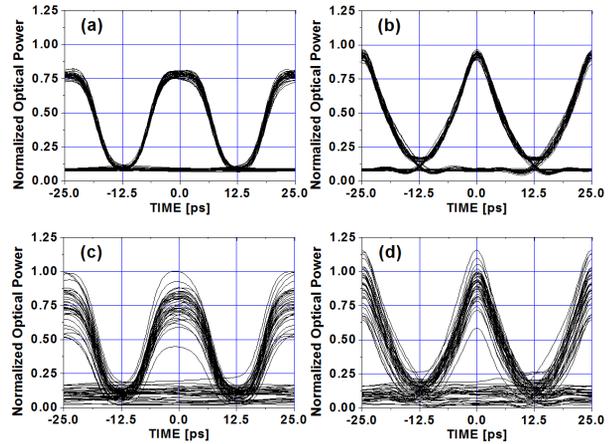


그림 4. 최악 채널의 아이 다이어그램; (a) NRD = 0 ps/nm로 설정된  $n = 30$ 의 링크에서, (b) NRD = 10 ps/nm로 설정된  $n = 30$ 의 링크에서, (c) NRD = 0 ps/nm로 설정된  $n = 90$ 의 링크에서, (d) NRD = 10 ps/nm로 설정된  $n = 90$ 의 링크에서.

Fig. 4. Eye diagrams of the worst channels; in the optical link of  $n = 30$  with NRD = 0 ps/nm (a),  $n = 30$  with NRD = 10 ps/nm (b),  $n = 90$  with NRD = 0 ps/nm (c), and  $n = 90$  with NRD = 10 ps/nm (d).

광섬유가 갖는 비선형 현상들은 자기 위상 변조 (SPM; self phase modulation), 상호 위상 변조 (XPM; cross phase modulation), 4-광파 혼합 (FWM; four-wave mixing) 등이다. RZ 전송과 같은 의사 선형 전송 (pseudo-linear transmission)에서는 신호 왜곡에 가장 큰 영향을 미치는 현상이 SPM이다. 즉 의사 선형 전송 시스템에서는 광섬유가 갖는 색 분산과 SPM의 상호 작용에 의해 광 펄스에 왜곡이 생기게 된다. 그림 4(c)와 4(d)의 아이 다이어그램을 보면, 광전송 링크에 DM과 MSSSI의 보상 기술이 적용된 경우에도 비트 ‘1’에 해당하는 각 광 펄스에 적지만 진폭 왜곡이 존재하는 것을 알 수 있는데 이는 색 분산이 아닌 SPM의 영향에 기인한 것이다.

그림 4의 각 결과를 비교 분석하여 보면, 앞선 결과들과 마찬가지로 중계 구간의 수가 적을수록 DM과 MSSSI에 의한 보상 효과가 커지는 것을 알 수 있다. 그러나 그림 4에서 눈여겨 보아야 할 것은 전송 링크에 설정된 NRD에 따른 보상 결과이다. 즉 NRD가 0 ps/nm로 설정된 링크를 통해 수신된 광 펄스 (그림 4(a)와 4(c))의 파형은 시간적으로 퍼져 있는 (temporal broaden) 형태를 갖는 반면 최적 값인 10 ps/nm로 설정된 링크를 통해 수신된 광 펄스 (그림 4(b)와 (d))의 파형은 시간적으로 압축되어 (temporal compression) 있어 SPM에 의한 진폭 왜곡이 존재하더라도 눈 열림 정도가 증가하게 된다는 것이다. 다른 말로 표현하면, NRD가 10 ps/nm로 최적으로 설정된 링크에서는 DM에 의한 왜곡 보상 효과가 NRD = 0 ps/nm로 설정된 링크보다 증대된다는 것이다.

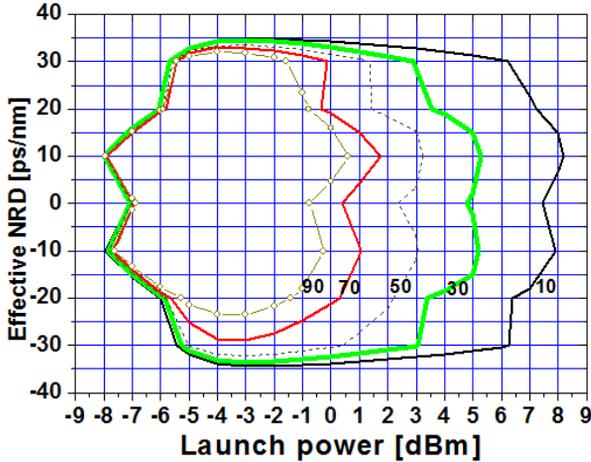


그림 5. 입사 전력에 따른 1 dB EOP 등고선  
Fig. 5. The contour of 1 dB EOP as a function of the launch power.

지금까지의 성능 분석은 NRD가 최적 (즉 10 ps/nm)으로 설정된 광전송 링크에서 이루어졌다. 하지만 실제적으로 전송 링크의 NRD를 항상 이 값을 갖도록 하는 것은 시스템 구성의 융통성을 제한하는 요소가 된다. 다행히도 그림 2의 결과를 살펴보면 10 ps/nm 외에 근처의 다른 NRD 값들을 링크에 적용해도 최악 채널의 최대 EOP를 1 dB EOP 이하로 유지할 수 있음을 알 수 있다. 즉 수신 성능을 1 dB EOP 이하로 만드는 NRD 범위를 구할 수 있고 이 범위 내의 특정 값으로 NRD가 유지되도록 링크 구조를 설계하면 시스템 구조의 유연성을 높일 수 있다. EOP를 1 dB 이하가 되게 하는 NRD 범위를 유효 NRD (effective NRD)라고 정의하여 이들을 WDM 채널의 입사 전력과 중계 구간 수에 따라 나타낸 것이 그림 5이다. 즉 그림 5의 각각의 경우에 나타낸 입사 전력에 따른 등고선(contour)의 범위 내에서 NRD를 선택하고 해당 입사 전력으로 WDM 채널들을 전송하면 최악 채널의 최대 EOP를 1 dB 이내로 얻을 수 있다.

그림 3의 결과와 비슷하게 그림 5의 결과를 통해 중계 구간 개수를 동일하게 20개씩 늘리더라도 1 dB EOP 이하의 수신 성능을 얻을 수 있는 입사 전력 범위와 유효 NRD 범위가 총 전송 거리의 증가에 비례하여 더욱 협소해지는 것을 알 수 있다. 본 연구의 결과에 국한하여 실효적인 입사 전력 범위와 유효 NRD를 선택하고자 한다면, 즉 중계 구간의 개수가 90개 이하로 제한된 링크를 통해 WDM 채널들을 균일 분포의 DM과 MSSI를 적용하여 고품질로 전송하고자 한다면 총 NRD를 -20 ps/nm에서 30 ps/nm로 유지하고 WDM 채널들의 입사 전력을 -5 dBm부터 -1 dBm 사이로 제한하는 것이 가장 바람직한 것이라고 판단할 수 있다.

지금까지의 결과를 종합해 보면, 중계 구간을 구성하는 SMF 길이와 DM에 필요한 RDPS를 균일하게 하는 단순한 링크 구조라도 중계 구간의 수가 크게 증가하게 되면 보상의 효과가 많이 감소되는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 다양한 네트워크 형

태에서 WDM과 같은 초대용량 정보를 장거리에 걸쳐 고품질로 전송하기 위한 링크의 구성이 균일 분포 외의 다양한 방법으로 연구되어야 하는 것을 의미한다. 물론 SMF 등과 같은 광섬유유의 색 분산과 비선형 효과에 강인한 WDM 전송을 위한 변조 형식과 진폭이 아닌 주파수에 의존하는 전송 방식 등을 대안 기술로써 고려해 볼 수 있겠지만 전송 링크의 설계 관점에서는 DM이 적용된 중계 구간의 고품질 전송을 가능하게 하는 다양한 구성 방법도 동시에 연구되어야 할 필요가 있다고 할 수 있다.

따라서 향후 색 분산과 비선형 효과에 의한 왜곡을 효과적으로 보상할 수 있는 다양한 링크 구성을 고찰 분석함에 있어 성능 비교 대상으로 본 논문의 결과를 이용할 수 있다는 점에서 본 연구의 의미가 있다고 할 수 있다.

## V. 결 론

지금까지 중계 구간을 구성하는 SMF 길이가 80 km로, DM에 필요한 RDPS가 200 ps/nm로 균일하게 분포하는 광 링크에서의 WDM 채널의 왜곡 보상 정도를 총 중계 구간의 개수를 달리 하여 분석하여 보았다. 우선 중계 구간의 개수, 즉 총 전송 거리에 관계없이 WDM 채널의 최상의 보상이 가능한 NRD는 10 ps/nm라는 것을 확인하였다.

광전송 링크의 NRD가 10 ps/nm로 최적으로 설정된 경우에 모든 WDM 채널의 고품질 전송을 위한 입사 전력의 최대값은 중계 구간의 개수, 즉 총 전송 거리의 증가가 늘어날수록 급격하게 감소하는 것을 확인하였다. 또한 10 ps/nm의 최적 NRD 외에 WDM 채널의 수신 성능을 1 dB EOP 이하로 얻을 수 있는 유효 NRD의 범위도 중계 구간의 개수가 늘어날수록 급격하게 감소하는 것도 동시에 확인하였다.

이러한 결과는 다양한 네트워크 형태에서 초대용량 광 신호를 장거리에 걸쳐 고품질로 전송하기 위한 링크의 구성이 균일 분포 외에 다양한 형태로 연구되어야 하는 것을 의미하기 때문에 향후 연구에서는 SMF 길이와 RDPS의 랜덤 분포와 중계 구간의 수가 증가할수록 점진적으로 SMF 길이와 RDPS를 증가시키거나 감소시키는 인위적 분포를 포함한 다양한 링크 구조에서의 DM과 MSSI에 의한 WDM 채널 보상 효과를 분석하여 최적의 링크 구조를 도출하고자 한다.

## 참고 문헌

- [1] 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.
- [2] X. Xiao, S. Gao, Y. Tian, and C. Yang, "Analytical optimization of the net residual dispersion in SPM-limited

- dispersion-managed systems,” *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 24, No. 5, pp. 2038-2044, May 2006.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] S. L. Jansen, D. van den Borne, P. M. Krummrich, S. Spälter, G.-D. Khoe, “Long-haul DWDM transmission systems employing optical phase conjugation”, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 12, No. 4, pp. 505-520, 2006.
- [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, 1996.
- [7] A. Chowdhury and R.-J. Essiambre, “Optical phase conjugation and pseudolinear transmission”, *Optics Letter*, Vol. 29, No. 10, pp. 1105-1107, 2004.
- [8] P. Minzioni and A. Schiffrini, “Unifying theory of compensation techniques for intrachannel nonlinear effects,” *Optical Express*, Vol. 13, No. 21, pp. 8460-8468, 2005.
- [9] S. R. Lee, “Effects of residual dispersion in half transmission section on net residual dispersion in optical transmission links with dispersion management and mid-span spectral inversion compensation characteristics of distorted WDM signals depending on distribution patterns of SMF length and RDPS,” *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 18, No. 5, pp. 455-460, 2014.
- [10] J. P. Chung and S. R. Lee, “Pseudo-symmetric link configuration in dispersion-managed WDM transmission system with optical phase conjugator,” *Information*, Vol. 17, No. 11B, pp. 5963-5968, Nov. 2014.
- [11] H. B. Yim and S. R. Lee, “Compensation characteristics of optical signal distortions in dispersion-managed optical links with randomly distributed RDPS,” *International Journal of Information and Communication Technology*, Vol. 8, No. 1, pp. 37-49, 2016.
- [12] 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.
- [13] G. P. Agrawal, *Nonlinear fiber optics*, 3rd ed. San Francisco:CA, Academic Press, 2001.
- [14] 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 해양정보통신공학과 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