

## 분산 제어와 Mid-Span Spectral Inversion이 적용된 광전송 링크에서 반전송 구획의 잉여 분산이 전체 잉여 분산에 미치는 영향

### Effects of Residual Dispersion in Half Transmission Section on Net Residual Dispersion in Optical Transmission Links with Dispersion Management and Mid-Span Spectral Inversion

이 성 렬

목포해양대학교 해양정보통신공학과

**Seong-Real Lee**

Department of Marine Information and Communication Engineering, Mokpo National Maritime University, Jeollanam-do 530-729, Korea

#### [요 약]

장거리 광전송 시스템에서 그룹 속도 분산과 비선형 현상에 의한 왜곡을 보상할 수 있는 분산 제어 (DM; dispersion management) 와 광 위상 공액 기술이 결합된 전송 링크의 최적 설계를 위한 성능 분석을 수행하였다. 즉 전체 전송 링크의 중간에 위치한 광위상 공액기 (OPC; optical phase conjugator) 양쪽의 전송 구획에서의 잉여 분산의 상호 관계가 최적 전체 잉여 분산 (NRD; net residual dispersion)에 미치는 영향을 살펴보았다. 시뮬레이션 결과 전반 전송 구획에서의 잉여 분산과 후반 전송 구획에서의 잉여 분산의 차이를 10 ps/nm로 하여 전체 전송 링크의 NRD를 10 ps/nm로 설정하여야 가장 우수한 보상이 이루어진다는 것을 확인하였다.

#### [Abstract]

The system performance is analyzed for the optimal design of the transmission links with dispersion management and optical phase conjugation for compensating for the optical signal distortion due to the group velocity dispersion and optical nonlinear Kerr effects in the long-haul optical transmission system. That is, the effect of the relation of the residual dispersion in both half transmission sections with respect with optical phase conjugator (OPC) on the net residual dispersion (NRD) is assessed. It is conformed that the best compensation is obtained in NRD of 10 ps/nm, which is only controlled by the difference of the residual dispersion between each half transmission sections.

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

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2014.18.5.455>



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 17 September 2014; Revised 12 October 2014  
Accepted (Publication) 6 October 2014 (30 October 2014)

\*Corresponding Author; Seong-Real Lee

Tel: +82-61-240-7264

E-mail: reallee@mmu.ac.kr

### 1. 서론

과장 분할 다중 (WDM; wavelength division multiplexing) 시스템과 같은 장거리 대용량 광전송 시스템에서 전송 성능을 저하시키는 대표적인 요인은 광섬유, 특히 단일 모드 광섬유 (SMF; single mode fiber)에서의 색 분산 (chromatic dispersion)과 자기 위상 변조 (SPM; self-phase modulation), 상호 위상 변조 (XPM; cross-phase modulation), 4-광파 혼합 (FWM; four-wave mixing) 등의 비선형 효과이다 [1]-[3].

이러한 성능 저하 요인들을 없애거나 줄여주기 위한 다양한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 지금까지 제안된 다양한 기술들 중에 가장 대표적인 기술로 SMF에서 축적된 분산을 상쇄시켜주기 위해 SMF와 반대의 분산 특성을 갖는 분산 보상 광섬유 (DCF; dispersion compensating fiber)를 적절하게 추가하는 분산 제어 (DM; dispersion management)[4],[5]와 전체 전송 링크 중간에 위치한 광 위상 공액기 (OPC; optical phase conjugator)를 통해 색 분산과 비선형 현상에 의해 왜곡된 광 신호의 스펙트럼 반전을 시킨 후 나머지 전송 구간을 전파시켜 보상하는 MSSI (mid-span spectral inversion) 기술[6],[7]이 있다.

전송 링크에 DM만을 적용하게 되면 비선형 현상에 의한 왜곡 보상에 한계가 있고, MSSI 기술은 광섬유의 손실과 분산 특성이 전체적으로 일정하지 않기 때문에 OPC를 중심으로 한 국부 분산량과 광 신호의 전력 대칭을 만들기 어려워 전송 링크의 실제적 적용에는 한계가 있다고 보고되고 있다[6]. 그러나 다행스럽게도 DM과 OPC를 전송 링크에 동시에 적용하면 이 두 가지 문제를 어느 정도 개선할 수 있다고 최근 다양한 연구를 통해 보고되고 있다 [7],[8],[9].

본 논문의 저자도 DM과 OPC를 전송 링크에 적용한 그간의 연구들을 통해 WDM 채널을 고품질로 장거리 전송할 수 있다는 것을 밝힌 바 있다 [10],[11],[12]. DM과 OPC를 전송 링크에 적용하고자 하는 경우 전송 거리, WDM 채널 수, 변조 방식 등의 시스템 요소에 따라 DM의 기본 파라미터인 precompensation, postcompensation, 중계 구간 당 잉여 분산 (RDPS; residual dispersion per span)과 전체 잉여 분산 (NRD; net residual dispersion)이 최적화되어야 하는 것을 보고하였다.

그러나 WDM 채널의 변조 형식으로 RZ(return-to-zero)를 채택하여 전송하는 경우 이들 시스템 요소와 무관하게 성능을 개선할 수 있는 링크 설계 기준으로 NRD를 0 ps/nm가 아닌 이에 가까운 값 (예를 들어, ±10 ps/nm)으로 설정해야 한다는 것을 보고하였다. 이 결과는 DM과 OPC가 적용된 장거리 대용량 광전송 링크의 설계를 간편하게 할 수 있다는 장점을 보여주는 것이다.

OPC를 중간에 둔 MSSI 링크의 각 중계 구간 (fiber span)마다 SMF 외에 분산 보상으로 DCF를 적용하는 DM 기

술을 적용하고자 하는 경우 NRD를 최적화하는 방법은 다양하게 존재한다. 즉, 예를 들어 OPC를 중심으로 전반 전송 구획 (FHS; former half section)과 후반 전송 구획 (LHS; latter half section) 각각에서 축적된 잉여 분산을 동시에 적절히 조절하는 방법, 두 구획 중 한 구획에서 축적된 잉여 분산을 0 ps/nm로 하면서 나머지 한 구획의 분산만을 조절하여 원하는 NRD를 얻는 방법 등 다양하게 존재한다.

즉 WDM 채널의 최상의 보상을 위한 NRD를 결정하는 방법에 따른 성능 분석이 필요하지만, 저자가 아는 한 아직까지 이에 대한 연구 결과는 보고된 것이 없다. 따라서 본 연구에서는 OPC를 중심으로 FHS에서의 잉여 분산과 LHS에서의 잉여 분산의 상호 관계(제어)를 통해 얻어진 최적의 NRD를 적용한 전송 링크에서의 시스템 성능을 분석하여 이 두 구획에서의 잉여 분산이 최적 NRD에 미치는 영향을 살펴보고자 한다.

본 연구에서 채택한 최적 NRD는 앞선 연구 결과인 10 ps/nm와 -10 ps/nm 2 가지이고, 두 구획에서의 잉여 분산의 영향을 좀 더 구체적으로 살펴보기 위하여 중계 구간의 SMF 길이와 중계 구간의 개수가 다르게 설계된 3가지 형태의 링크를 대상으로 비교 분석하였다.

### II. WDM 전송 시스템과 광전송 링크의 구성

24 채널 × 40 Gbps의 WDM 전송 시스템과 이를 위한 광전송 링크의 구조를 그림 1에 나타냈다. 그림 1의 24개 송신기(Tx) 각각은 중심 파장을 1,550 nm부터 1,568.4 nm까지 100 GHz (즉 0.8 nm) 간격으로 갖는 분포 재환 레이저 다이오드 (DFB-LD; distributed feedback laser diode)로 가정하였다. 각 DFB-LB는 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 RZ를 발생시키는 것으로 모델링하였다.

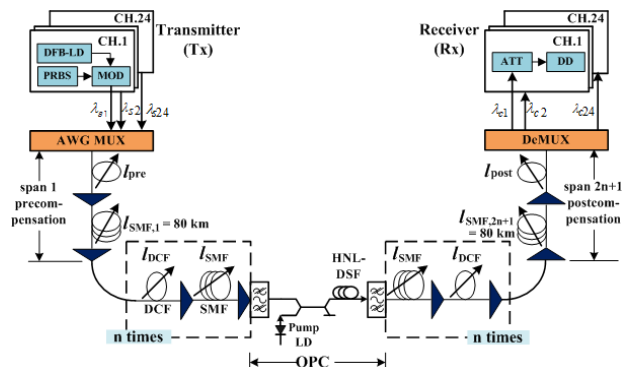


그림 1. 24x40 Gbps WDM 전송 시스템 구조  
 Fig. 1. Configuration of 24x40 Gbps WDM transmission system.

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 × 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],[11],[12].

아래와 같은 SMF의 고정된 파라미터 값들을 그림 1의 모든 중계 구간에 동일하게 적용하였다; 손실 계수  $\alpha_{SMF} = 0.2$  dB/km, 분산 계수  $D_{SMF} = 17$  ps/nm/km(@1,550 nm), 비선형 계수  $\gamma_{SMF} = 1.35$  W<sup>-1</sup>km<sup>-1</sup>(@1,550 nm). 또한 DCF의 고정 파라미터 값들은 다음과 같다; 손실 계수  $\alpha_{DCF} = 0.6$  dB/km, 분산 계수  $D_{DCF} = -100$  ps/nm/km(@ 1,550 nm), 비선형 계수  $\gamma_{DCF} = 5.06$  W<sup>-1</sup>km<sup>-1</sup>(@1,550 nm).

OPC를 중심으로 FHS와 LHF의 중계 구간 개수는 동일하게  $n+1$  개로 하였다. 본 논문에서는 중계 구간의 SMF 길이에 따라  $n = 4, 6, 8$ 의 3가지를 고려하였다. 그러나  $n$ 에 상관없이 SMF에 의한 전체 전송 거리는 1,120 km로 모두 동일하게 하였고, 이를 위해 첫 번째 중계 구간과 마지막 중계 구간에서의 SMF 길이 ( $l_{SMF,1}$ 와  $l_{SMF,2(n+1)}$ )는 80 km로 하였다. 이 두 중계 구간을 제외한 나머지 중계 구간의 SMF 길이는  $n$ 에 따라 달라지도록 설계하였다. 즉  $n = 4, 6, 8$ 에 대해 각각 120 km, 80 km와 60 km로 설계하였다. 또한 중계 구간을 구성하는 DCF의 길이는 RDPS가 40 ps/nm가 되도록  $n$ 에 따라 각각 20 km, 13.2 km와 9.8 km로 하였다.

$n$ 에 관계없이 RDPS가 동일하더라도 중계 구간의 개수,  $2(n+1)$ 가 다르기 때문에 전송 링크의 NRD를 결정하는 첫 번째와 마지막 중계 구간의 DCF를 제외한 나머지 중계 구간에서 축적된 총 분산량 ( $AD_{tot}$ )은

$$AD_{tot} = 2 (D_{SMF} \times 80 \text{ km} + n \times RDPS) \quad (1)$$

에 따라 달라진다. 즉  $n = 4$ 인 경우 3,040 ps/nm,  $n = 6$ 인 경우 3,200 ps/nm, 그리고  $n = 8$ 인 경우 3,360 ps/nm의 총 분산량을 갖는다.

이렇게 중계 구간 개수에 따라 다르게 축적된 분산량은 첫 번째와 마지막 중계 구간의 DCF 길이 (각각  $l_{pre}$ 와  $l_{post}$ )에 의해 전송 링크의 NRD가 10 ps/nm 또는 -10 ps/nm가 되도록 하여  $n$ 에 따른 성능을 비교 분석하였다.

여기서  $l_{pre}$ 와  $l_{post}$ 은 서로 관계하여 아래 식 (2)를 통해 NRD가 결정되도록 하였다.

$$\frac{AD_{tot} - NRD}{D_{DCF}} = l_{pre} + l_{post} \quad (2)$$

예를 들어,  $n = 4$ 인 전송 링크에서  $l_{pre}$ 와  $l_{post}$ 의 합이 30.4 km로 설정되면 NRD가 0 ps/nm이 되고, NRD = 10 ps/nm로 만들려면  $l_{pre}$ 와  $l_{post}$ 의 합을 30.3 km가 되도록 설계하면 된다. 그러나  $l_{pre}$ 와  $l_{post}$ 의 합을 통해 NRD를 결정하기 때문에 경우의 수가 매우 많아진다.

선택된 NRD에 의해  $l_{pre}$ 와  $l_{post}$ 가 결정되면 각각 HFS의 잉여 분산 (RD; residual dispersion)와 LFS의 RD가 아래 식 (3)과 (4)에 의해 결정된다.

$$RD_{FHS} = 1360 + (l_{pre} \times D_{DCF}) + n \times RDPS \quad (3)$$

$$RD_{LHS} = 1360 + (l_{post} \times D_{DCF}) + n \times RDPS \quad (4)$$

전송 링크의 NRD = 10 ps/nm와 -10 ps/nm를 만드는  $l_{pre}$ 와  $l_{post}$ 의 경우의 수가 많기 때문에 HFS의 RD와 LFS의 RD의 차 (이를  $\Delta RD = RD_{FHS} - RD_{LFS}$ 로 정의함)에 따른 성능을  $n$ 에 대해 수행하였다.

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[1]에 따라 Matlab으로 구현하여 이루어졌다.

### III. 시뮬레이션 결과 및 검토

그림 2(a)와 (b)는 각각  $\Delta RD$ 에 의해 전체 링크의 NRD가 10 ps/nm와 -10 ps/nm로 설정된 광전송 링크에서  $n$ 에 대한  $\Delta RD$ 에 따른 최악 채널의 눈 열림 페널티 (EOP; eye opening penalty)를 나타낸 것이다. WDM 채널의 입사 전력도 시스템 성능에 영향을 미치기 때문에 -3 dBm과 9 dBm의 두 가지 입사 전력에 대한 EOP를 비교하여 나타냈다.

우선 WDM 채널 입사 전력의 크기와 중계 구간의 수에 관계없이  $\Delta RD$ 가 10 ps/nm인 경우 EOP가 가장 좋아지는 것을 확인할 수 있다. 전체 링크의 NRD = 10 ps/nm가  $\Delta RD = 10$  ps/nm에 의해 설정되었다는 것은  $RD_{FHS} = 10$  ps/nm이고  $RD_{LHS} = 0$  ps/nm로 설정된 것을 의미하고, 전체 링크의 NRD = -10 ps/nm가  $\Delta RD = 10$  ps/nm에 의해 설정되었다는 것은  $RD_{FHS} = -10$  ps/nm이고  $RD_{LHS} = 0$  ps/nm로 설정된 것을 의미한다. 각 경우  $n$ 에 따른  $l_{pre}$ 와  $l_{post}$ 는 표 1과 같다.

또한  $\Delta RD$ 가 10 ps/nm로 설정되었더라도 동일한 입사 전력에 대해 전송 링크의 중계 구간의 개수가 줄어들수록 (즉  $n = 4$ 의 경우) 수신 성능이 더욱 개선되는 것을 그림 2를 통해 알 수 있다.

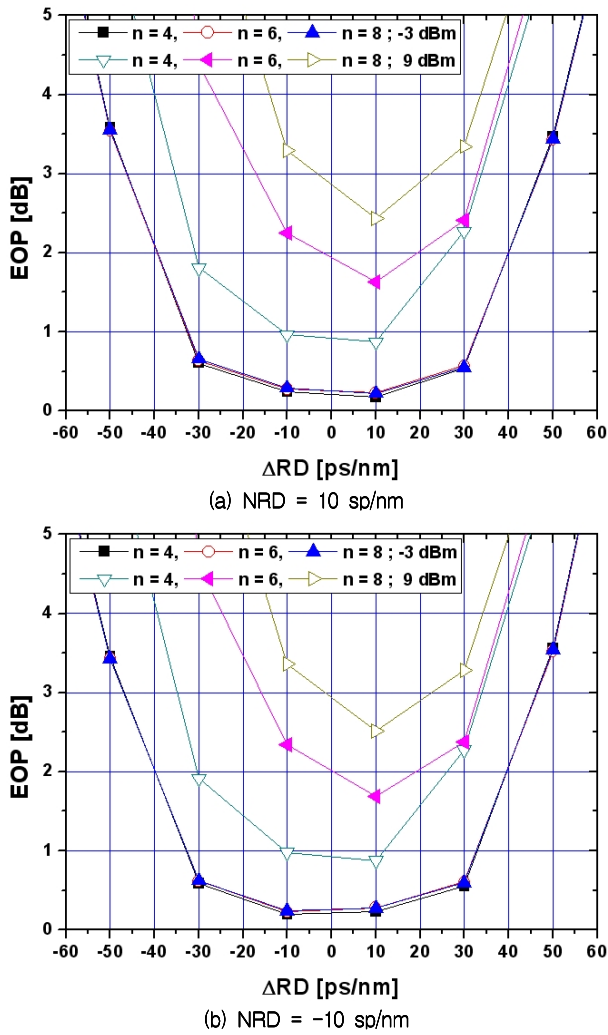


그림 2.  $\Delta RD$ 에 따른 최악 채널의 EOP  
 Fig. 2. The EOP of the worst channel as a function of  $\Delta RD$ .

표 1.  $\Delta RD = 10$  ps/nm를 위한  $l_{pre}$  와  $l_{post}$   
 Table 1.  $l_{pre}$  and  $l_{post}$  for  $\Delta RD = 10$  ps/nm.

NRD [ps/nm]	n	$l_{pre}$ [km]	$l_{post}$ [km]
10	4	15.1	15.2
	6	15.9	16.0
	8	16.7	16.8
-10	4	15.3	15.2
	6	16.1	16.0
	8	16.9	16.8

EOP를 통해 수신 성능을 분석하는 경우의 성능 기준은 통상 1 dB EOP이다. 이는 비트 에러율 (BER; bit error rate)로는  $10^{-12}$ 에 해당하고 광 펄스 broadening factor로는 1.25에 상응하는 값이다[13]. 이 기준으로 그림 2를 좀 더 분석하여 보면 전체 전송 링크의 NRD를 10 ps/nm와 -10 ps/nm로 만드는  $\Delta RD$ 가 10 ps/nm가 아닌 다른 값들도 존재한다는 것을 알 수 있다.

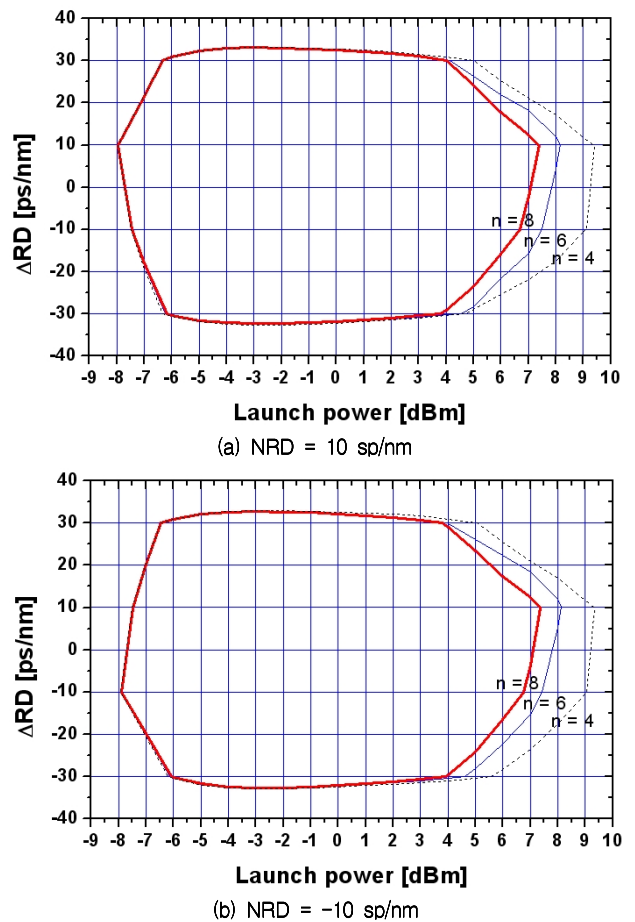


그림 3. 입사 전력에 따른  $\Delta RD$ 의 1 dB EOP 등고선  
 Fig. 3. The contour of  $\Delta RD$  resulting 1 dB EOP as a function of the launch power.

그림 2와 같이 NRD를 10 ps/nm와 -10 ps/nm로 만드는  $\Delta RD$ 의 변화에 따른 최악 채널의 EOP를  $n$ 과 입사 전력에 따라 구한 후, 1 dB EOP가 되는  $\Delta RD$ 의 범위를 구한 것이 그림 3이다. 그림 3을 살펴보면, 중계 구간의 수에 상관없이 WDM 채널의 입사 전력이 -6 dB부터 4 dBm 사이라면 전체 링크의 NRD를 만드는  $\Delta RD$ 의 설정 방법이 10 ps/nm 외에 -30 ps/nm, -10 ps/nm와 30 ps/nm도 가능하다는 것을 알 수 있다. 즉 WDM 입사 전력을 적절히 제어하면 중계 구간의 SMF 길이, 그로 인한 중계 구간의 수,  $l_{pre}$  와  $l_{post}$ 의 선택에 있어 좀 더 여유를 가질 수 있는 것을 확인할 수 있다.

물론 WDM 채널의 입사 전력이 4 dBm 이상으로 늘어난다면 입사 전력 증가에 따라 1 dB EOP 이하를 얻을 수 있는  $\Delta RD$ 의 범위가 줄어들게 되고, 이러한 현상은 중계 구간의 수가 늘어날수록 더욱 심해지는 것도 동시에 알 수 있다. 즉 높은 입사 전력에 대한 넓은  $\Delta RD$  범위를 위한 최상의 링크 설계 방법은 중계 구간의 수의 감소, 다시 말해 SMF 길이의 증가라는 것을 알 수 있다.

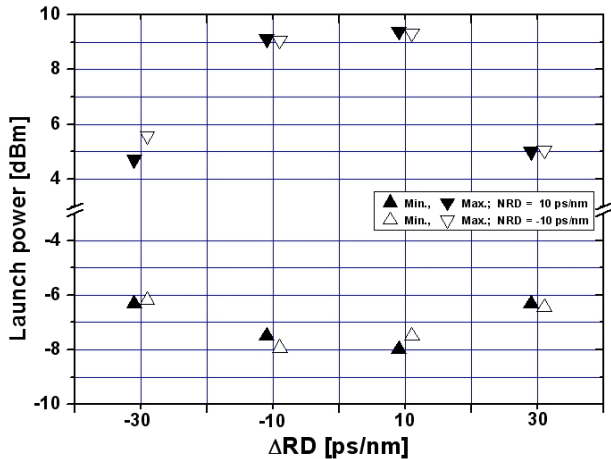


그림 4.  $n = 4$ 인 전송 링크에서  $\Delta RD$ 에 따른 1 dB EOP를 나타내는 입사 전력 범위

Fig. 4. The launch power ranges resulting 1 dB EOP as a function of  $\Delta RD$  in the optical links of  $n = 4$ .

그림 4는 앞서 분석을 통해 얻은 최상의 전송 링크 구조인  $n = 4$ 로 설계된 구조, 즉  $80 \text{ km} \times 1 \text{ span} - 120 \text{ km} \times 4 \text{ spans} - \text{OPC} - 120 \text{ km} \times 4 \text{ spans} - 80 \text{ km} \times 1 \text{ span}$ 의 링크 구조에서 수신 성능을 조금 더 개선할 수 있는 조건을 얻기 위하여 1 dB EOP를 얻을 수 있는 입사 전력 범위를  $\Delta RD$ 의 변화에 따라 나타낸 것이다. 앞서 얻은 결과와 마찬가지로  $\Delta RD = 10 \text{ ps/nm}$ 나  $\Delta RD = -10 \text{ ps/nm}$ 로 하여 전체 링크의 NRD를  $10 \text{ ps/nm}$ 나  $-10 \text{ ps/nm}$ 로 설정하는 경우 1 dB 이하의 EOP를 만드는 입사 전력 범위를 크게 신장시킬 수 있지만, 전체 링크의 NRD를  $10 \text{ ps/nm}$ 로 설정하고자 하는 경우에는  $\Delta RD$ 를  $10 \text{ ps/nm}$ 로 선택하고, 전체 링크의 NRD를  $-10 \text{ ps/nm}$ 로 설정하고자 하는 경우에는  $\Delta RD$ 를  $-10 \text{ ps/nm}$ 로 선택하는 것이 조금 더 개선된 효과를 볼 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 즉 표 1에 나타난 값을 가지고 설명한다면  $l_{\text{post}}$ 를  $15.2 \text{ km}$ 로 고정해 놓고 NRD를  $10 \text{ ps/nm}$ 로 설정하고자 한다면  $l_{\text{pre}}$ 를  $15.1 \text{ km}$ 로, NRD를  $-10 \text{ ps/nm}$ 로 설정하고자 한다면  $l_{\text{pre}}$ 를  $15.3 \text{ km}$ 로 변화를 주는 것이 효과적이라는 것을 알 수 있다.

#### IV. 결론

DM과 MSSSI 기술이 적용된 WDM 전송 링크에서 시스템 성능을 제고하기 위해 필요한 최적 NRD를 설정하는 방법 중 하나인 OPC 기준 전반 전송 구획과 후반 전송 구획의 잉여 분산의 상호 관계가 전체 링크의 NRD와 수신 성능에 미치는 영향을 중계 구간의 수가 각기 다른 3가지 형태의 링크를 대상으로 시뮬레이션을 통해 살펴보았다.

SMF에 의한 전체 전송 링크의 길이가 동일한 조건에서 중계 구간의 수에 영향을 받지 않으면서 전송 링크의 NRD 마진을 최대화 할 수 있는 방법은 WDM 채널의 입사 전력

을  $-6 \text{ dBm}$ 부터  $4 \text{ dBm}$  사이로 제어해야 한다는 것을 확인하였다. 물론 이러한 WDM 채널의 입사 전력 제어 정도는 전체 전송 링크의 거리가 증가하는 것에 관계하여 변화될 것으로 예상된다.

또한 본 논문에서 고려한 여러 가지 DM 파라미터와 관련하여 최상의 전송 성능 조건으로 우선 SMF 길이를 증가시켜 중계 구간의 수를 줄여야 하고, 전반 전송 구획에서의 잉여 분산과 후반 전송 구획에서의 잉여 분산의 차이를  $10 \text{ ps/nm}$ 로 하여 전체 전송 링크의 NRD를  $10 \text{ ps/nm}$ 로 설정해야 한다는 결과를 얻었다.

#### 참고문헌

- [1] G. P. Agrawal, *Nonlinear fiber optics*, 3rd ed. San Francisco:CA, Academic Press, 2001.
- [2] L. Grüner-Nielsen, et al., "Dispersion-compensating fibers," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 23, No. 11, pp. 3566~3578, 2005.
- [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] 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, 2006.
- [5] 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.
- [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] 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 Communication*, Vol. 265, No. 1, pp. 326-330, 2006.
- [9] P. Minzioni and A. Schiffrini, "Unifying theory of compensation techniques for intrachannel nonlinear effects," *Optical Express*, Vol. 13, No. 21, pp. 8460-8468, 2005.
- [10] S. R. Lee and S. E. Cho, "NRZ versus RZ modulation format in lumped dispersion managed systems," *Journal of The Korea Institute of Maritime Information & Communication Sciences*, Vol. 12, No. 2, pp. 327~335,

2008.

- [11] S. R. Lee, "Dispersion management and optical phase conjugation in optical transmission links with a randomly distributed single-mode fiber length," *Journal of Information and Communication Convergence Engineering*, Vol. 11, No. 1, pp. 1~6, 2013.
- [12] S. R. Lee, "Compensation characteristics of distorted WDM signals depending on distribution patterns of SMF length and RDPS," *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 18, No. 2, pp. 158~164, 2014.
- [13] 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), 1992년 8월 : 한국항공대학교 대학원 통신정보공학과 (공학석사)  
2002년 2월 : 한국항공대학교 대학원 통신정보공학과 (공학박사), 2002년 6월~2004년 2월 : (주)에이티엔 기술연구소장  
2004년 3월~현재 : 국립목포해양대학교 해양정보통신공학과 부교수  
※관심분야 : WDM 전송 시스템, 광의 비선형 현상 분석, 광 솔리톤 전송