

다양한 위치에 존재하는 OPC를 갖는 전송 링크에서 Inline 분산 제어를 이용한 WDM 채널의 성능 개선

Performance Improvement of WDM Channels using Inline Dispersion Management in Transmission Links with OPC Placed at Various Position

이성렬*

Seong-Real Lee*

요 약

광 위상 공액기 (OPC; optical phase conjugator)가 단일 모드 광섬유 (SMF; single mode fiber)로 이루어진 전체 전송 거리 1000 km의 50 km 간격으로 250 km부터 750 km까지 존재하는 광전송 링크에 inline 분산 제어 (DM; dispersion management)를 통해 24 × 40 Gbps WDM 채널의 신호 왜곡을 보상하기 위한 최적의 전체 잉여 분산 (NRD; net residual dispersion)을 OPC 위치별로 도출하였고, 최적 NRD가 적용된 경우의 WDM 채널의 성능 개선 정도를 NRD = 0 ps/nm로 고정된 전송 링크에서의 수신 성능과 비교하였다. 최적 NRD는 OPC가 전체 전송 거리의 중간인 500 km로부터 이동된 정도에 따라 결정되어야 하고, 최적 NRD의 결정과 적용에 있어 OPC가 500 km로부터 수신부쪽으로 이동되는 경우보다 송신부쪽으로 이동되는 경우가 더욱 안정적이고 효과적임을 확인하였다. 또한 0 ps/nm로 NRD가 고정된 전송 링크에 비해 최적 NRD로 설계된 전송 링크에서의 WDM 채널의 눈 열림 페널티 (EOP; eye opening penalty)가 OPC 위치에 따라 1.5 dB부터 3 dB까지 개선되는 것을 확인하였다.

Abstract

Optimal net residual dispersions (NRDs) of inline dispersion management (DM) for compensating the signal distortion of 24 × 40 Gbps WDM channels in optical transmission links, in which optical phase conjugator (OPC) is placed from 250 km to 750 km by spacing 50 km in 1,000 km total transmission length of single mode fiber (SMF), are induced as a function of various OPC positions. And, performance improvement of WDM channels in transmission links with the induced optimal NRD is investigated by comparing with that in transmission links with NRD = 0 ps/nm. It is confirmed that optimal NRDs are decided by displacement of OPC from mid-way of total transmission length, i.e. 500 km, and the determining and applying of optimal NRD in case of OPC displacement into transmitters is more stable and effective than that in case of OPC displacement into receivers from 500 km. Also, it is shown that eye opening penalties (EOPs) of WDM channels in transmission links with optimal NRD are improved by 1.5 dB to 3 dB, which are related with OPC position, from that obtained in transmission links with fixed NRD of 0 ps/nm.

Key words : Inline Dispersion management, Net residual dispersion, WDM, pre(post)compensation, Optical phase conjugator, OPC position, .

I. 서 론

대용량 정보의 장거리 전송 네트워크 구축을 위한

가장 대표적인 유선 전송 매체인 광섬유의 이용에 있어 광섬유 손실에 의한 전송 거리의 제한은 에르븀 첨가 광섬유 증폭기 (EDFA ; erbium- doped fiber

* 목포해양대학교 해양전자통신공학부 (Div. of Marine Electro. & Comm. Eng., Mokpo National Maritime University)

- 제1저자 (First Author) : 이성렬
- 투고일자 : 2010년 8월 26일
- 심사(수정)일자 : 2010년 8월 27일 (수정일자 : 2010년 10월 23일)
- 게재일자 : 2010년 10월 30일

amplifier) 등의 적용으로 극복되었다. 그러나 광섬유가 갖는 또 다른 고유 특성인 그룹 속도 분산 (GVD ; group velocity dispersion)에 의한 광 신호의 시간 영역에서의 퍼짐(temporal broadening)과 EDFA 적용에 의한 광 신호의 고전력화에 따른 비선형 효과 (Kerr effects)에 기인하는 신호 왜곡(distortion)은 광섬유의 길이가 증가하고 신호 대역폭이 넓어질수록 심각해진다 [1]-[3].

특히 장거리용으로 현재 가장 많이 설치되어 있는 단일 모드 광섬유 (SMF ; single mode fiber)를 전송로로 사용하는 경우 SMF의 분산 계수가 17 ps/nm/km로 크기 때문에 GVD에 의한 광 펄스 퍼짐은 더욱 심각해져서 유효 전송 속도가 줄어들게 된다. 다행히도 SMF를 통해 광 신호, 특히 파장 분할 다중 (WDM; wavelength division multiplexing) 신호들을 전송하는 경우 큰 GVD 값과 WDM 채널의 신호 파장과의 관계에 따라 광 펄스의 순시 전력이 감소하기 때문에 비선형 효과 중 4-광파 혼합 (FWM ; four-wave mixing)과 상호 위상 변조 (XPM ; cross phase modulation)에 의한 신호 왜곡은 상대적으로 줄어들게 된다. 하지만 자기 위상 변조 (SPM ; self phase modulation) 현상은 각각의 WDM 채널 자체에 영향을 주기 때문에 신호 왜곡을 만드는 비선형 효과 중 가장 심각하고, 더욱이 SMF에서 GVD와 상호 반응하여 시스템 성능을 저하시키는 요인이 된다. 따라서 대용량 장거리 전송을 위한 광 링크 (optical links) 설계와 구축은 다양한 기술들을 접목하여 GVD와 SPM에 의한 신호 왜곡을 보상할 수 있어야 한다.

GVD의 영향을 제거하거나 줄여주기 위한 가장 대표적인 링크 기술로 주 전송로로 쓰이는 SMF와 반대 특성을 갖는 분산 보상 광섬유 (DCF; dispersion compensating fiber)를 SMF의 전송 링크에 부가적으로 삽입 또는 추가하여 precompensation, postcompensation과 광 증계 거리 당 잉여 분산량 (RDPS; residual dispersion per span) 등의 조절에 의해 전체 잉여 분산량 (NRD; net residual dispersion)을 광 신호의 변조 방식, 증계 거리, 전송 속도, 채널수 등에 따라 최적화하여 적용하는 분산 제어 (DM; dispersion management)가 있다[4]-[6]. 여기서,

precompensation과 postcompensation은 각각 전송로 가장 앞단과 끝단에서 DCF에 의해 조절되는 분산량으로 정의되고, RDPS는 전송 링크를 구성하는 광 증계 거리마다 축적된 분산량으로 정의된다. 그리고 NRD는 전송 링크 최종단에서 축적된 전체 분산량으로 정의된다.

광전송 링크에서의 SPM에 의한 신호 왜곡을 보상하는 대표적 기술로는 광 위상 공액 (optical phase conjugation)이 있다[7]. 그러나 광 위상 공액 기술에서 SPM에 의한 왜곡을 보상하기 위해서는 국부 분산량과 광 신호의 전력 분포가 광 위상 공액기 (OPC; optical phase conjugator)를 중심으로 대칭이 되어야 한다는 한계를 안고 있다[8]. 본 논문의 저자는 그동안의 연구를 통해 OPC가 DM 기술과 결합하면 이러한 대칭의 문제가 완화되어 성능 저하에 대한 한계가 개선되는 것을 보였다[9]-[11].

더욱이 최근의 연구에서는 앞서 연구한 논문들의 한계인 OPC가 전체 전송 링크의 중간에 위치해야 한다는 경우에서 벗어나 다양한 위치에 OPC가 존재하는 경우 DM의 적용으로 광전송 네트워크의 구조를 융통적으로 구성할 수 있다는 것을 확인하였다 [12]. 이의 결과를 좀 더 구체적으로 살펴보면 아래와 같다. 우선 SMF의 증계 거리 50 km마다 DCF를 추가하여 증계 거리별로 분산량을 조절하는 inline DM이 적용된 SMF의 총 전송 거리가 1,000 km인 전체 전송 링크에 OPC가 각 증계 간격마다의 어떠한 곳에서도 위치할 수 있다 (즉 OPC 위치 고려 범위는 50 km 간격으로 50 ~ 950 km)는 가정에서 각 OPC 위치별로 비트율이 40 Gbps인 RZ 형식의 24개 WDM 채널 중 최악 채널의 성능을 가장 우수하게 개선하는 최적 NRD를 도출한다. 그런 후 각 OPC 위치별로 이 최적 NRD를 적용했을 때 눈 열림 패널티 (EOP ; eye opening penalty)를 1 dB 이하로 만드는 OPC의 유효 위치 범위를 살펴본 결과 각 WDM 채널의 입사 전력이 3 dBm인 경우 300 ~ 750 km인 것을 알 수 있었다.

그러나 실제 WDM 전송에서 각 채널들은 각기 다른 전력으로 입사될 수 있고, 이 경우 최적 NRD는 채널의 입사 전력에 따라 달라질 수 있기 때문에 좀 더 다양한 채널 입사 전력을 고려한 최적 NRD를

OPC 위치별로 살펴볼 필요가 있다. 또한 단순히 한 입사 전력에서의 최적 NRD 도출이 아닌 두 가지 이상의 입사 전력을 동시에 고려한 최적 NRD 도출도 고려해야 한다. 아울러 전송 링크에서의 GVD와 SPM의 상호 작용 메커니즘이 복잡하고 결과적으로 이들의 영향을 최소화할 수 있는 최적 NRD 도출의 조건이 OPC의 위치 등 경우에 따라 달라질 수 있기 때문에 모든 다양한 조건들을 비교해 보아야 할 것이다.

따라서 본 논문에서는 [12]와 동일한 구조의 전송 링크에서 OPC가 SMF 전체 전송 거리인 1,000 km 중 250 km부터 750 km 사이에 위치한 경우 다양한 WDM 채널 입사 전력을 고려한 각 OPC 위치별 최적 NRD를 도출하고, 최적 NRD가 어떠한 조건에서 도출되었는지를 살펴보도록 한다. 아울러 OPC 위치별로 최적 NRD에 의한 WDM 전송 성능이 어느 정도 개선되었는지를 NRD = 0 ps/nm에서의 수신 성능과 비교하도록 한다.

II. inline 분산 제어 전송 링크의 구조

그림 1은 본 연구에서 살펴볼 광전송 링크들 중 OPC가 각각 250 km, 500 km와 750 km에 위치한 경우의 WDM 전송 시스템과 전송 링크의 구조를 나타

낸 것이다. 모든 구조에서 각 중계 구간 (span)의 SMF 길이 l_{SMF} 는 모두 50 km로 하였고, 각 중계 간격마다 DCF를 추가하여 분산량을 제어하는 inline DM을 사용하였다. SMF와 이의 분산 보상을 위한 DCF의 한 묶음을 그림 1에서 세그먼트(seg.)로 표시하였다. 본 논문에서 살펴볼 OPC 위치는 그림 1 (a)의 seg. 5 다음 (즉 OPC가 250 km에 위치한 경우)부터 그림 1(c)의 seg. 15 다음 (즉 OPC가 750 km에 위치한 경우)까지의 범위이다.

송신부(Tx) 바로 다음, 즉 seg. 1의 DCF는 길이 l_{pre} 의 변화를 통해 precompensation을, 수신부(Rx) 바로 전, 즉 Seg. 20의 DCF는 길이 l_{post} 의 변화를 통해 postcompensation을 동시에 조절하여 NRD를 결정하도록 하였고, 이들을 제외한 나머지 구간에서의 RDPS는 0 ps/nm가 되도록 설계하였다. 각 중계 구간을 구성하는 SMF의 손실 계수 α_{SMF} 는 0.2 dB/km, 분산 계수 D_{SMF} 는 17 ps/nm/km(@1,550 nm), 비선형 계수 γ_{SMF} 는 1.41 W-1km-1(@1,550 nm)이고, DM을 위해 추가되는 DCF의 분산 계수 D_{DCF} 는 -85 ps/nm/km(@1,550 nm), 손실 계수 α_{DCF} 는 0.4 dB/km, 비선형 계수 γ_{DCF} 는 4.83 W-1km-1(@1,550 nm)를 갖도록 설계하였다. 각 중계 구간의 SMF 길이 l_{SMF} 는 모든 전송 구간에서 50 km로 하였기 때문에 각 중계 구간에서 축적된 분산량은 850 ps/nm이다. 따라서 Seg. 1과 Seg. 20의 DCF를 제외한 나머지 Seg.들에서의 RDPS

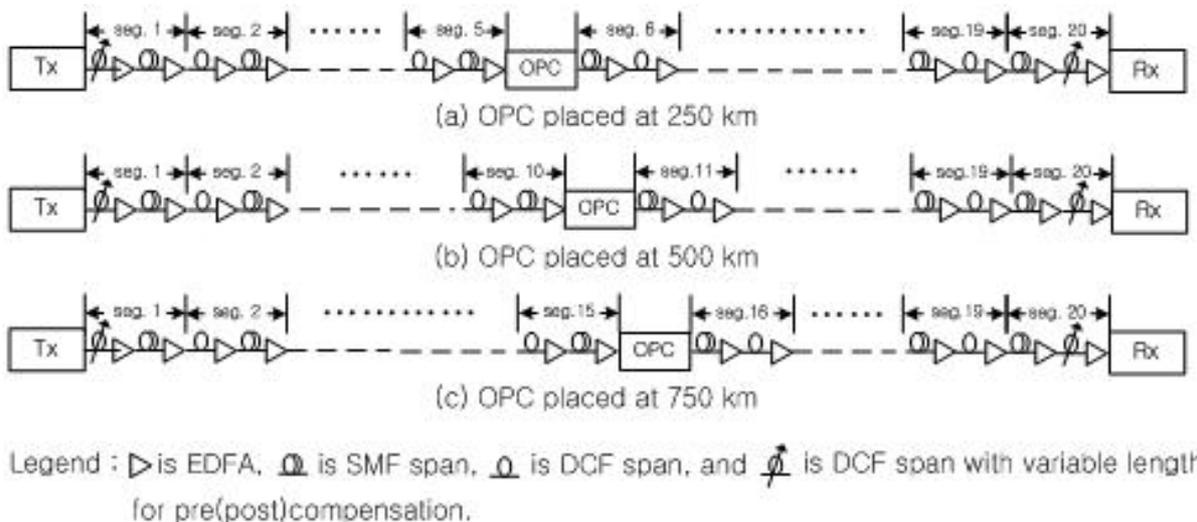


그림 1. WDM 전송 시스템과 전송 링크의 구조
Fig. 1. Configuration of WDM system and transmission links.

을 0 ps/nm하기 위한 DCF의 길이 l_{DCF} 는 10 km로 하였다.

OPC가 전체 전송 링크의 중간에 위치한 경우 (본 논문에서 500 km)에 분산 분포가 OPC를 중심으로 대칭이 되기 위해서 Tx부터 OPC까지의 DCF를 포함한 각 전송 구간의 구성은 SMF 앞에 DCF를 두는 구조로, OPC부터 Rx까지의 각 전송 구간의 구성은 SMF 뒤에 DCF를 두는 구조로 설계하였다.

III. 전송 시스템의 구성과 시스템 성능 분석

그림 1에서 송신부 Tx는 960 Gbps 전송을 위한 40 Gbps 속도의 독립적인 24개의 송신기들로 구성된다. 각각의 송신기는 분포 궤환 레이저 다이오드 (DFB-LD; distributed feedback laser diode)로 가정하였고, 채널 1과 24의 DFB-LD의 중심 파장은 각각 1,550 nm와 1,568.4 nm로 하고 각 채널의 파장 간격은 ITU-T G.694.1의 권고에 따라 100 GHz (즉 0.8 nm)로 모델링하였다. 각 DFB-LB는 서로 독립적인 128(=2⁷) 의사 랜덤 비트열 (PRBS; pseudo random bit sequence)에 의해 외부적으로 변조되는 것으로 모델링하였다. 이 때 외부 변조기로부터 발생하는 변조 파형 형식은 듀티 싸이클이 0.5인 RZ 형식의 2차 가우시안 펄스로 모델링하였고, RZ 파형의 소광비 (extinction ratio)는 10 dB로 모델링하였다.

24개의 WDM 채널 신호들은 Tx 내의 다중화기 (MUX; multiplexer)에서 다중화된 후 광 링크로 전송된다. 전체 광전송 링크는 MUX부터 OPC까지의 전반 구간 (former half section)과 OPC부터 역다중화기 (DEMUX)까지의 후반 구간 (latter half section)으로 나누어진다. 다중화되어 전송되는 24개 채널 신호들은 전체 전송로 중간에 위치한 OPC에서 공액 변환되어 나머지 전송 구간을 전파한 후 DEMUX에서 각 채널별로 분리된 후 수신부 Rx로 보내진다. OPC는 참고 문헌 [9]에서와 동일한 파라미터를 갖는 HNL-DSF (highly nonlinearity - dispersion shifted fiber)를 비선형 매질로 갖는 구조로 모델링하였다.

그리고 Rx는 24개의 수신기로 구성되는데, 각각의 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.

광전송 링크를 통해 손실과 비선형 효과의 영향을 겪으면서 전파하는 각 채널들은 비선형 슈뢰딩거 방정식 (NLSE; nonlinear Schrödinger equation)에 의해 표현된다[9]. NLSE를 단계 분할 푸리에 (SSF; split-step Fourier) 기법에 따라 시뮬레이션 하였다.

시스템의 성능 분석은 수신측에 도착한 24개의 WDM 채널 중 전송 성능이 가장 나쁘게 나타나는 최악 채널의 EOP를 가지고 수행한다. 여기서 EOP는

$$EOP[dB] = 10 \log_{10} (EO_{rec} / EO_{btb}) \quad (1)$$

으로 정의되고, 여기서 EO_{rec}는 수신 신호의 눈 열림 (EO; eye opening) 정도이고 EO_{btb}은 광섬유 전송 링크에 입사되기 전 송신 신호의 눈 열림 정도로 EO는 아래와 같이 정의된다.

$$2P_{av} / (P_{1,min} - P_{0,max}) \quad (2)$$

여기서 P_{av}는 광 신호의 평균 전력, P_{1,min}은 펄스 '1'의 최소 전력이고 P_{0,max}은 펄스 '0'의 최대 전력이다.

OPC 위치별 다양한 채널 입사 전력에 대한 최적 NRD를 살펴보기 위하여 본 논문에서 고려한 채널 입사 전력은 0 dBm, 3 dBm과 5 dBm으로 하였다. 이는 입사 전력을 그 이상으로 하게 되면 성능 평가 대상인 WDM 채널 중 최악 채널의 시스템 성능이 너무 나빠지게 되어 다른 입사 전력에서의 성능과 비교가 어렵기 때문이다. 앞선 연구인 [12]에서 얻은 결과를 살펴보면, OPC 위치별로 선택된 최적 NRD로 DM이 설계되었다고 하더라도 OPC가 전체 전송 거리의 중간인 500 km에 위치한 경우에서 동일한 입사 전력에 대한 수신 EOP가 가장 양호하고 OPC 위치가 500 km로부터 멀어질수록 수신 EOP가 더욱 나빠지는 것을 확인하였다. 또한 이 성능 특성은 채널 입사 전력이 커질수록 심해진다는 것도 알 수 있었다. 이러한 결과는 본 논문에서의 NRD 값에 따른 수신 성능의 비교 분석은 OPC 위치에 따라, 그리고 동시에 3가지 채널 입사 전력에 따라 각기 다른 기준을

가지고 수행해야 좀 더 효율적이라는 것을 의미한다.

표 1. OPC 위치와 채널 입사 전력별 EOP 기준
Table 1. EOP criterion of OPC position and channel launching power

OPC 위치	입사 전력	EOP 기준
250 km	0 dBm	1 dB
	3 dBm	2 dB
	5 dBm	4 dB
300 km	0 dBm	1 dB
	3 dBm	2 dB
	5 dBm	3 dB
350 km	0 dBm	1 dB
	3 dBm	1.5 dB
	5 dBm	2 dB
400 km	0 dBm	1 dB
	3 dBm	1 dB
	5 dBm	1.5 dB
450 km	0 dBm	1 dB
	3 dBm	1 dB
	5 dBm	1 dB
500 km	0 dBm	1 dB
	3 dBm	1 dB
	5 dBm	1 dB
550 km	0 dBm	1 dB
	3 dBm	1 dB
	5 dBm	1 dB
600 km	0 dBm	1 dB
	3 dBm	1 dB
	5 dBm	1.5 dB
650 km	0 dBm	1 dB
	3 dBm	1.5 dB
	5 dBm	2 dB
700 km	0 dBm	1 dB
	3 dBm	2 dB
	5 dBm	3 dB
750 km	0 dBm	1 dB
	3 dBm	2 dB
	5 dBm	4 dB

표 1은 본 논문에서 고려한 OPC 위치와 WDM 채널 입사 전력별 최악 채널의 수신 EOP 기준 값이다. 즉 OPC가 전체 전송 거리의 250 km에 위치한 경우를 예를 들어 설명하면, WDM 채널의 입사 전력이

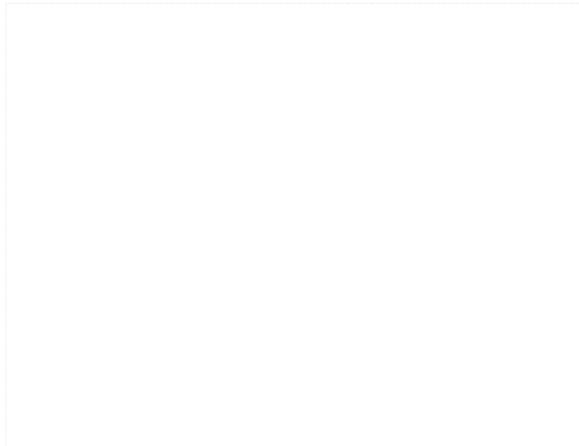
0 dBm인 경우에는 OPC가 다른 위치에 있는 경우와 마찬가지로 최악 채널의 EOP를 1 dB 이하로 만드는 NRD만을 고려 범위에 넣은 반면 입사 전력이 3 dBm과 5 dBm인 경우는 OPC가 500 km로부터 멀리 이격되어 있기 때문에 각각 최악 채널의 EOP를 2 dB와 4 dB 이하로 만드는 NRD만을 고려 대상으로 삼았다. 반면 OPC가 450~550 km에 위치한 경우에는 OPC가 전체 전송 거리의 중간이나 그 이동 거리가 크지 않아 모든 입사 전력에서 최악 채널의 EOP 기준을 1 dB 이하로 하였다.

모든 경우의 각 채널 입사 전력에서 수신 EOP를 최소로 만드는 NRD를 입사 전력별 최상의 NRD (best NRD)라고 하고, 입사 전력이 0 dBm에서의 EOP와 5 dBm에서의 EOP의 차이를 최소로 만드는 NRD를 최소 EOP 차이 도출 NRD (NRD resulting minimum difference EOP)라고 정의하여 OPC 위치별로 최악 채널의 EOP를 가장 최소로 만드는 NRD (이를 최적 NRD라고 정의)는 어떠한 조건에서 얻어지는지를 알아보고, OPC 위치에 따라 결정된 최적 NRD가 적용된 경우의 성능 개선 정도를 $\text{NRD} = 0$ ps/nm인 경우에서의 성능과 비교해 고찰한다.

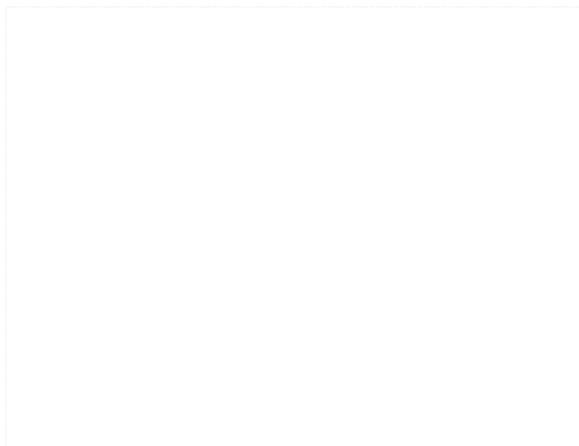
IV. 시뮬레이션 결과 및 검토

그림 2는 본 연구에서 고찰하고자 하는 표 1의 11가지 경우 중 OPC가 각각 250 km, 400 km와 600 km에 위치하고 WDM 채널 입사 전력이 0 dBm, 3 dBm, 5 dBm으로 한 경우 NRD 변화에 따른 최악 채널의 EOP를 채널 입사 전력별로 나타낸 것이다. 또한 모든 경우에서 입사 전력 5 dBm일 때와 EOP와 입사 전력이 0 dBm일 때의 EOP 차이도 동시에 나타냈다.

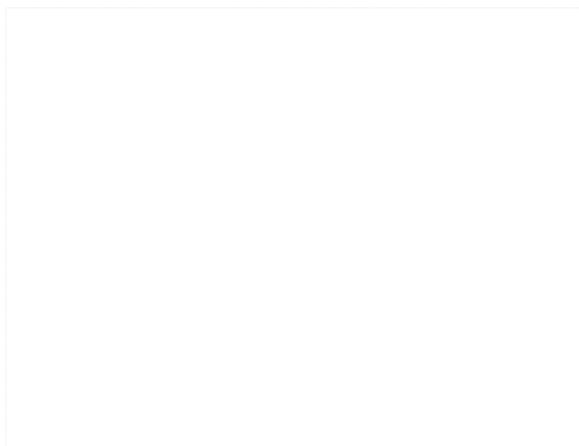
그림 2를 통해 알 수 있는 것은 최악 채널의 EOP를 최소로 만드는 최상의 NRD는 입사 전력과 OPC 위치에 관계하여 달라진다는 것이다. 예를 들어, 그림 2(a)의 OPC가 250 km에 위치한 경우 입사 전력이 0 dBm에서의 최상의 NRD는 680 ps/nm, 3 dBm



(a) OPC placed at 250 km



(b) OPC placed at 400 km



(c) OPC placed at 600 km

그림 2. NRD에 따른 입사 전력별 최악 채널의 EOP
Fig. 2. EOP of worst channel as a function of NRD for launching power.

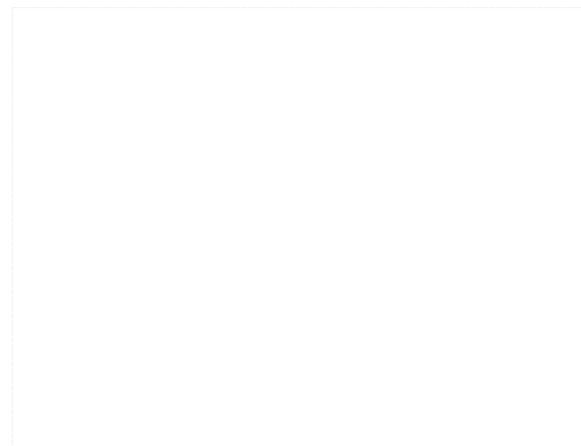
에서는 782 ps/nm, 5 dBm에서는 544 ps/nm, 그리고 입사 전력이 0 dBm과 5 dBm에서의 EOP 차이를 최소로 만드는 최소 EOP 차이 도출 NRD는 544 ps/nm이지만, 그림 2(c)의 OPC가 600 km에 위치한

경우에서 입사 전력이 0 dBm, 3 dBm, 5 dBm 모두에서의 최상의 NRD는 1088 ps/nm인 반면, 최소 EOP 차이 도출 NRD는 884 ps/nm로 얻어졌다. 그림 2에 나타낸 3가지의 OPC 위치를 포함한 나머지 OPC 위치에서의 최적 NRD 도출을 위해 고려해야 할 조건들인 WDM 채널의 입사 전력별 최상 NRD와 최소 EOP 차이 도출 NRD 값들을 표 2에 정리하였다.

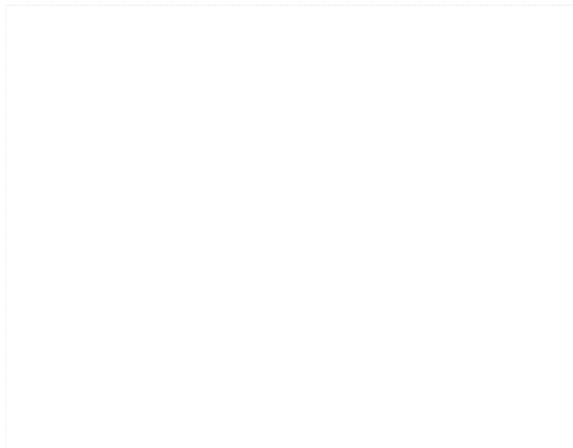
그림 2와 표 2의 결과를 통해 알 수 있는 사실은 채널의 다양한 입사 전력을 고려한 최적의 NRD의 결정과 적용은 OPC 위치에 따라 달라지기 때문에 OPC 위치에 구애받지 않는 최적 NRD는 단순히 하나의 값으로 결정될 수 없다는 것이다.

따라서 최적 NRD 도출은 OPC 위치별로 이루어져야 하고, 각 OPC 위치별 최적 NRD 도출을 위해서는 표 2에 정리한 각각의 NRD 값으로 설계된 전송 링크로 24개의 WDM 채널들을 전송한 경우 최악 채널의 EOP를 보다 다양한 채널 입사 전력에 따라 살펴봐야 한다.

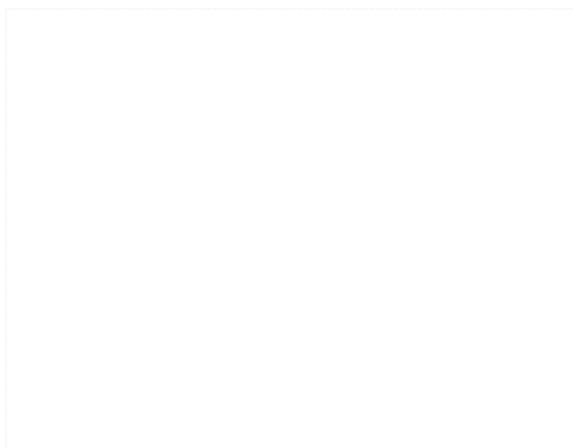
그림 3은 OPC 위치별로 얻어진 각각 표 2의 3가지의 최상 NRD와 한가지의 최소 EOP 차이 도출 NRD에 따라 inline DM이 설계된 링크에 WDM 채널들을 전송시켰을 때 최악 채널의 EOP를 입사 전력 변화에 따라 나타낸 것이다. 또한 모든 경우에서 $NRD = 0$ ps/nm에서의 최악 채널의 EOP와 비교하였다.



(a) OPC placed at 250 km



(b) OPC placed at 400 km



(c) OPC placed at 600 km

그림 3. NRD별 입사 전력에 따른 최악 채널의 EOP
Fig. 3. EOP of worst channel as a function of launching power for NRD.

수신 성능 허용 기준을 1 dB EOP로 하고 이 1 dB EOP가 되는 최악 채널의 전력을 최대 허용 전력이라고 하고, 이 최대 허용 전력을 만드는 NRD를 최적의 NRD라고 한다면 그림 3(a)의 OPC가 250 km에 위치한 경우에는 입사 전력이 3 dBm에서의 최상 NRD인 782 ps/nm가 최적 NRD가 되고, 그림 3(b)의

400 km에 위치한 경우에는 최소 EOP 차이 도출 NRD인 697 ps/nm가 최적 NRD가 되고, 그림 3(c)의 600 km에 위치한 경우에는 입사 전력이 0, 3과 5 dBm모두에서의 최상 NRD인 1088 ps/nm가 최적 NRD가 된다는 것을 알 수 있다. 그리고 각 경우 최적 NRD가 적용되면 최대 허용 전력이 각각 2.95 dB, 6.0 dB와 6.36 dB로 NRD = 0 ps/nm로 설계된 경우에 비해 크게 개선되는 것을 알 수 있다.

그림 4. OPC 위치에 따른 최대 허용 전력
Fig. 4. Maximum allowable power as a function if OPC position.

그림 4는 그림 3과 같은 방법으로 도출된 NRD = 0 ps/nm로 고정된 경우와 최적 NRD로 설계된 경우의 최대 허용 전력을 OPC 위치별로 나타낸 것이다. OPC 위치가 전체 전송 거리의 중간인 500 km로부터 이동될수록 두 경우 모두 최대 허용 전력이 줄어들지만 NRD = 0 ps/nm로 inline DM이 적용된 경우에 비해 최적 NRD를 적용하게 되면 OPC 위치에 따라 최대 허용 전력이 1.5 ~ 3 dB 정도 개선되는 것을 알 수 있다. 그리고 최적 NRD를 이용한 성능 개선 효과는 OPC가 500 km로부터 크게 이동될수록 증가

표 2. OPC 위치별 최상의 NRD와 최소 EOP 차이 도출 NRD
Table 2. Best NRDs and NRD resulting minimum difference EOP for various OPC positions.

OPC 위치 Ps	250 km	300 km	350 km	400 km	450 km	500 km	550 km	600 km	650 km	700 km	750 km
0 dBm	680	663	357	442	-136	-170	1258	1088	901	918	918
3 dBm	782	697	697	612	561	544	1292	1088	901	918	918
5 dBm	544	782	782	782	578	459	1326	1088	918	1207	612
최소 EOP 도출	544	816	782	697	527	561	1326	884	1224	1224	612

되는 것도 확인할 수 있다.

표 2의 여러 경우 중 최대 허용 전력을 만드는 최적 NRD들을 그림 3과 같은 방법으로 도출하여 OPC 위치별로 그림 5에 나타냈다. 그림 5의 결과를 표 2에 정리된 OPC 위치별 최적 NRD 도출을 위해 고려하는 조건들과 비교해 보면 OPC 위치별 최적 NRD는 OPC 위치에 상관없이 하나의 일관된 조건으로 결정될 수 없다는 것이다. 즉 예를 들어, OPC가 500 km에 위치한 경우의 최적 NRD는 최소 EOP 차이 도출 NRD인 561 ps/nm인 반면, OPC가 450 km에 위치한 경우의 최적 NRD는 채널 입사 전력을 5 dBm로 하였을 때 얻어진 최상의 NRD인 578 ps/nm, OPC가 350 km에 위치한 경우의 최적 NRD는 채널 입사 전력을 3 dBm로 하였을 때 얻어진 최상의 NRD인 697 ps/nm로 얻어져 최적 NRD의 결정 조건은 OPC 위치에 따라 달라진다는 것이다.

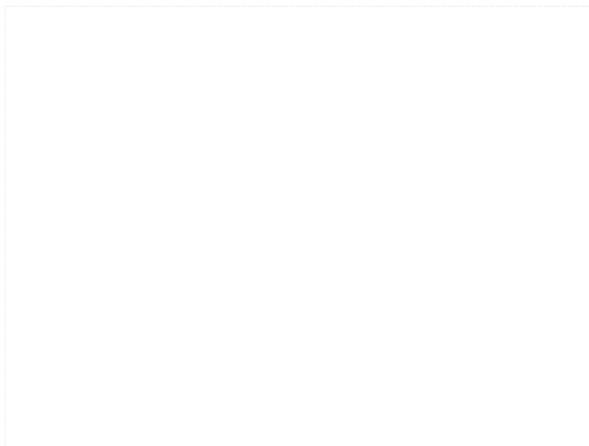


그림 5. OPC 위치별 최적 NRD
Fig. 5. Optimal NRD for OPC position.

오히려 그림 5를 통해 알 수 있는 중요한 결과는 OPC 위치별 최적 NRD는 OPC가 전체 전송 거리 중간 (즉 500 km)으로부터 Tx나 Rx쪽으로 얼마만큼 이동되었느냐에 따라 결정된다는 것이다. 즉 OPC가 전체 전송 거리 중간인 500 km에 위치한 경우의 최적 NRD인 561 ps/nm를 기준으로 OPC가 500 km를 중심으로 이동된 정도에 비례하여 최적 NRD가 증가되어야 하고, 그 증가 정도는 OPC가 Rx쪽으로 이동될수록 더욱 커져야 한다는 것이다. 이러한 결과는 OPC 위치 변동에 따라 전송 링크에서의 OPC를 중심으로 한 분산 분포의 대칭 조건이 유지되지 못하기 때문

에 오는 신호 왜곡의 증가를 inline DM을 통해 OPC 위치 변동 정도에 비례하는 NRD로써 감소시키거나 제거하여야 하기 때문이라고 할 수 있다.

그림 5의 결과 중 얻을 수 있는 또 다른 중요한 사실은 OPC 위치를 Tx쪽으로 이동된 경우 최적 NRD의 적용이 Rx쪽으로 이동된 경우에 비해서 적은 값으로 안정되게 이루어질 수 있다는 것이다. 즉 달리 말해 광 네트워크를 위한 전송 링크 설계 시 OPC 위치 이동이 필요하다면 OPC를 Tx에 가깝게 위치시키는 경우가 inline DM의 적용에 더욱 효율적이라고 할 수 있다.

V. 결 론

OPC가 전체 전송 거리 1,000 km의 250 km부터 500 km 간격으로 750 km까지 존재하는 광 전송 링크에 inline DM 기술을 이용한 OPC 위치별 최적 NRD의 도출과 이의 적용으로 WDM 채널의 GVD와 SPM에 의한 신호 왜곡을 보상하여 성능이 개선되는 것을 살펴보았다. OPC 위치별 최적 NRD는 고려한 3가지의 최상 NRD와 한 가지의 최소 EOP 차이 도출 NRD의 4가지 조건 중 특정한 하나의 조건으로부터 결정되는 것이 아닌 전체 전송 거리의 중간인 500 km로부터의 OPC 이동 정도에 비례하는 NRD 값으로 결정되어야 한다는 것을 확인하였다.

또한 OPC 위치에 따라 결정된 최적 NRD를 전송 링크에 적용하면 $\text{NRD} = 0 \text{ ps/nm}$ 로 고정된 전송 링크에 비해 최악 채널의 수신 성능이 OPC 위치별로 1.5 dB부터 3 dB까지 개선되고, 성능 개선 효과는 OPC의 위치가 500 km로부터 많이 벗어날수록 커지는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 얻은 결과가 갖는 가장 중요한 의미는 OPC 위치별 최적 NRD를 이용한 inline DM의 전송 링크 적용으로 OPC 위치에 구애받지 않는 융통적인 광 네트워크의 구성이 가능하다는 것이다. 즉 다양한 링크 구조와 여기에 OPC와 inline DM 기술의 적용으로 대용량 WDM 전송의 고품질 전송이 이루어질 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] G. P. Agrawal, *Fiber-optic communication systems*, John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [2] N. Shibata, K. Nosu, K. Iwashita and Y. Azuma, "Transmission limitations due to fiber nonlinearities in optical FDM systems," *IEEE J. Select. Areas in Comm.*, Vol.8, No.6, pp.1068-1077, 1990.
- [3] A. R. Chraplyvy, "Limitations on lightwave communications imposed by optical-fiber nonlinearities," *J. Lightwave Technol.*, Vol.8, No.10, pp.1548-1557, 1990.
- [4] Xiaosheng Xiao, Shiming Gao, Yu Tian, and Changxi Yang, "Analytical Optimization of the Net Residual Dispersion in SPM-Limited Dispersion- Managed Systems", *J. Lightwave Technol.*, Vol. 24, No. 5, pp. 2038-2044, 2006.
- [5] A. Fä rbert, C. Scheerer, J.-P. Elbers, C. Glingener and G. Fischer, "Optimized dispersion management scheme for long-haul optical communication systems," *Electron. Lett.*, Vol.35, No.21, pp.1865-1866, Oct. 1999.
- [6] Y. Frignaca and S. Bigo, "Numerical optimization of residual dispersion in dispersion-managed systems at 40 Gb/s," in *Proc. OFC, Baltimore, MD*, pp.48-50, 2000.
- [7] K. Kikuchi, and C. Lorattanasane, "Compensation for pulase waveform distortion in ultra-long distance optical communication systems by using midway optical phase conjugator", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 6, No. 1, pp. 1-4-105, 1994.
- [8] S. Watanabe and M. Shirasaki, "Exact compensation for both chromatic dispersion and Kerr effect in a transmission fiber using optical phase conjugation", *J. Lightwave Technol.*, Vol. 14, No. 3, pp. 243-248, 1996.
- [9] 이성렬, "집중형 분산 제어 WDM 전송 시스템에서 Mid-span spectral inversion 기술", *한국통신학회 논문지*, 제 33 권 1 호, pp. 7 ~15, 2008.
- [10] 이성렬, "Inline 분산 제어 광전송 링크에서 전체 잉여 분산", *한국항행학회논문지*, 제 12 권 4 호, pp. 311 ~316, 2008.
- [11] 이성렬, "분산 제어와 OPC를 갖는 광 전송 링크를 이용한 WDM 신호의 Q-factor 개선", *한국항행학회논문지*, 제 13 권 1 호, pp. 27 ~34, 2009. 2.
- [12] 이성렬, 임황빈, "분산 제어가 적용된 광전송 링크에서 광 위상 공액의 비대칭성", *한국통신학회논문지*, 제 35 권 8 호, pp. 801 ~809, 2010. 8.

이 성 렬 (李成烈)



1990년 2월 : 한국항공대학교 통신
정보공학과 (공학사)

1992년 8월 : 한국항공대학교 대학원
통신정보공학과 (공학석사)

2002년 2월 : 한국항공대학교 대학원
통신정보공학과 (공학박사)

1996년 1월~2002년 5월 : (주)세영통신

전파기술연구소 책임연구원

2002년 6월~2004년 2월 : (주)에이티엔 기술연구소장

2004년 3월~현재 국립목포해양대학교 해양전자통신
공학부 부교수

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