인위적인 단일 모드 광섬유 길이와 RDPS 분포를 갖는 분산 제어 광전송 링크에서 선치 보상과 후치 보상을 통한 WDM 신호의 성능 개선

이성렬*

Performance Improvement of WDM Signals through Precompensation and
Postcompensation in Dispersion Managed Optical Transmission Links with Artificial
Distribution of Single Mode Fiber Length and RDPS

Seong-real Lee*

요 약

단일 모드 광섬유의 그룹 속도 분산과 자기 위상 변조에 의해 왜곡된 파장 분할 다중 신호의 효율적인 보상을 위한 새로운 광전송 링크 기술을 제안하였다. 제안된 전송 링크는 WDM 송신이나 수신단 근처에 광 위상 공액기(OPC; optical phase conjugator)가 위치하고 각 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS(residual dispersion per span)가 인위적으로 분포하는 구조이다. 시스템 성능을 개선하여 유효 입사 전력 범위와 유효 전체 잉여 분산(NRD; net residual dispersion)을 늘릴 수 있는 최적의 링크 구조는 OPC가 WDM 수신단에 가깝게 위치하고 후치 보상(postcompensation)에 의해 NRD를 결정하고 중계 구간이 증가할수록 SMF 길이와 RDPS를 점진적으로 감소시키는 링크라는 것을 확인하였다.

ABSTRACT

New optical transmission links technique for compensating of the distorted wavelength division multiplexed (WDM) signals due to group velocity dispersion (GVD) and self phase modulation (SPM) in single mode fiber (SMF) are proposed. The proposed optical links have optical phase conjugator (OPC) placed at nearby WDM transmitter or receiver and repeater spans with artificial distribution of SMF length and residual dispersion per span (RDPS). It is confirmed that optimal link configuration expanding effective launching power range and effective net residual dispersion (NRD) by improving system performance is that having OPC closely placed at WDM receiver and the gradually descended distribution of SMF length and RDPS of each repeater spans, related with the gradually increased optical link length. And, it is also confirmed that NRD is controlled by postcompensation in optimal optical link with OPC closely placed at WDM receiver.

키워드

분산 제어, 광 위상 공액기, 중계 구간 당 잉여 분산, 전체 잉여 분산, 단일 모드 광섬유 길이와 RDPS의 인위적 분포

Key word

Dispersion management, OPC, Residual dispersion per span, Net residual dispersion, Pre(post)compensation, SMF length, Artificial distribution of SMF length and RDPS.

* 정회원 : 목포해양대학교 해양정보통신공학과

접수일자 : 2012. 06. 04

심사완료일자 : 2012. 06. 20

I. 서 론

현재 광통신 네트워크 기술은 전송 기술면에서 채널 당 데이터 전송률이 빠르게 증가하여 10 Gbps를 넘어 40 Gbps에 육박하는 초고속 전송 단계에 있는 상태에 있고, 구조 설계 면에서는 광 add/drop multiplexer (OADM)의 배치를 이용하여 필요에 따라 네트워크 구조 변경을 용이하게 하는 기술 단계에 있다[1].

40 Gbps 이상의 진폭 변조를 기초로 한 초고속 장거리 광전송 시스템의 구현은 본질적으로 가지고 있는 한계인 그룹 속도 분산(GVD; group velocity dispersion)과 비선형성(nonlinearity)의 상호 작용에 의한 신호 왜곡을 다양한 기술들[2]-[6]로 보상했기 때문에 가능해졌다. 이러한 다양한 기술들 중 전체 전송로의 중간에 광 위상 공액기(OPC; optical phase conjugator)를 두어 전송되는 광 신호의 스펙트럼을 반전시켜 신호 왜곡을 보상하고자 하는 기술은 GVD에 의한 왜곡뿐만 아니라 비선형 효과에 의한 왜곡도 보상할 수 있다[4],[5].

그러나 이 기술을 실제적인 광전송 시스템에 적용하려면 해결해야 할 문제가 있다. 이는 OPC를 중심으로 두 전송 구간에서의 광 전력 분포와 분산량이 서로 대칭을 이루어야 한다는 것이다[5]. 그러나 광섬유에 존재하는 손실 때문에 대칭을 만들기가 매우 어렵고, 파장 분할 다중(WDM; wavelength division multiplexed) 전송에서 특정 파장에 대해 이러한 문제를 해결할 수 있다고 하더라도 WDM은 동시에 여러 파장을 전송하기 때문에 모든 파장에 공통적으로 적용되는 해결책을 찾는 것이 쉽지 않다.

GVD의 영향을 제거하거나 줄여주기 위한 가장 대표적인 또 다른 기술로 주 전송로로 쓰이는 단일 모드 광섬유(SMF; single mode fiber)와 반대 특성을 갖는 분산 보상 광섬유(DCF; dispersion compensating fiber)를 SMF의 전송 링크에 부가적으로 삽입 또는 추가하여 선치 보상(precompensation), 후치 보상(postcompensation)과 광 중계 거리 당 잉여 분산량(RDPS; residual dispersion per span) 등의 조절에 의해 전체 잉여 분산량(NRD; net residual dispersion)을 광 신호의 변조 방식, 중계 거리, 전송 속도, 채널수 등에 따라 최적화하여 적용하는 분산 제어(DM; dispersion management)가 있다[6],[7]. 여기서, 선치 보상과 후치 보상은 각각 전송로 가장 앞단과 끝단에서 DCF에 의해 조절되는 분산량으로 정의되고, RDPS

는 전송 링크를 구성하는 광 중계 거리마다 축적된 분산량으로 정의된다. 그리고 NRD는 전송 링크 최종단에서 축적된 전체 분산량으로 정의된다. 모든 중계 구간마다 DM을 적용하는 방식은 각 중계 구간에서의 RDPS를 필요에 따라 조절할 수 있다는 장점을 갖는다. 그러나 각 중계 구간의 RDPS를 다양하게 하면 전송 링크의 전체적인 구조가 복잡해지는 단점도 있다. 하지만 전체적인 구조가 복잡하다고 하더라도 중계 구간의 RDPS에 변화를 주어 시스템 성능이 더욱 향상된다면 대용량 정보 전송 측면에서 바람직하다.

본 논문의 저자는 그동안의 연구를 통해 전체 전송 링크 중간에 위치한 OPC가 DM 기술과 결합하면 앞서 언급한 대칭의 문제가 완화되어 성능 저하에 대한 한계가 개선되는 것을 보였다[8],[9]. 그러나 OPC가 전체 전송 링크 구조에서 중간에 있어야 한다는 것은 전송 링크를 설계하는데 있어 OADM 등을 이용하더라도 광전송 네트워크의 구조와 형태를 다양하게 만들지 못하는 또 다른 문제를 야기하게 된다. WDM 시스템 구현을 위한 광 전송 링크 설계에서는 GVD와 비선형 효과, 특히 자기 위상 변조(SPM; self phase modulation)의 영향을 최소화하는 기술의 적용과 동시에 광 네트워크의 구조와 형태를 필요에 따라 다양하게 변경할 수 있는 기술의 적용이 필요하다. 본 논문의 저자는 최근의 또 다른 연구를 통해 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 것도 확인하였다[10]. 그러나 효율적인 보상을 위한 OPC의 타력적인 위치는 전체 전송 링크의 중간에서 크게 벗어나지 못한다는, 즉 OPC가 WDM 송신단이나 수신단 근처에 위치할 수 없다는 한계를 가지고 있다.

지난 연구 [10]에서 고려한 전송 링크는 구조의 복잡성을 줄여주기 위해 이를 구성하는 모든 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS는 균일하게 고정한 구조이었다. DM을 전송 링크에 적용하는 데 있어서의 장점인 RDPS 등을 중계 구간에 따라 조절할 수 있다는 것을 이용하여 OPC가 송신단이나 수신단 근처에 위치하는 경우 각 중계 구간의 SMF의 길이와 RDPS를 인위적으로 불균일하게 분포시켰을 때 시스템 성능이 균일 분포의 전송 링크에 비해 개선된다면 대용량 정보 전송 측면과 광 네트워크의 다양한 형태와 구조 설계 측면에서 유리한 구조라

고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 OPC가 RZ 형식의 40 Gbps × 24 채널 WDM 송신단이나 수신단에 가깝게 위치하고 전송 링크를 구성하는 중계 구간의 SMF의 길이와 RDPS의 분포를 인위적으로 분포시킨 경우의 시스템 성능을 SMF 길이와 RDPS 분포가 균일한 링크와 비교해 살펴봄으로써 WDM 채널들을 최상으로 보상할 수 있는 최적 NRD를 도출하고, 최적 NRD에서 가장 효과적으로 시스템 성능을 개선할 수 있는 SMF 길이와 RDPS의 인위적 분포 조건을 도출해 보고자 한다.

II. 광전송 링크의 모델링

그림 1은 본 연구에서 살펴보고자 하는 WDM 전송 시스템과 전송 링크의 구조를 나타낸 것이다. 전송 링크는 OPC를 중심으로 전반 전송 구획 (former half section)과 후반 전송 구획 (latter half section)으로 나누어지고, 주 전송로인 SMF와 여기서 축적된 분산을 제어하는 DCF로 구성된 9개의 중계 구간 (span)으로 이루어졌다. 선치 보상에 의해 NRD를 결정하는 전송 링크는 첫 번째 중계 구간 다음에 OPC를 위치시켰고, 후반 전송 구획에 나머지 중계 구간들, 즉 두 번째부터 9번째 중계 구간을 구성하였다. 반면, 후치 보상에 의해 NRD를 결정하는 전송 링크는 전반 전송 구획에 첫 번째부터 8번째의 중계 구간을 구성시켰고, 후반 전송 구획에는 9번째 중계 구간 하만 두는 구조로 하였다.

SMF의 손실 계수 α_{SMF} 는 0.2 dB/km, 비선형 계수 γ_{SMF} 는 $1.41 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ (@1,550 nm), 분산 계수 D_{SMF} 는 17 ps/nm/km (@ 1,550 nm)로 하였다. 그리고 DCF의 손실 계수 α_{DCF} 는 0.4 dB/km, 비선형 계수 γ_{DCF} 는 $4.83 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ (@1,550 nm), 분산 계수 D_{DCF} 는 -100 ps/nm/km로 모두 동일하게 가정하였다.

본 연구에서의 목적은 전송 링크를 구성하는 중계 구간의 SMF의 길이와 RDPS의 분포를 인위적으로 구성한 경우의 시스템 성능이 SMF 길이와 RDPS 분포가 균일한 링크에 비해 어느 정도 달라지는 지와 만일 개선된다면 어떠한 분포 조건에서 개선되는 지를 살펴보는 것이다. 이를 위하여 선치 보상으로 NRD를 결정하는 그림 1(a)와 후치 보상으로 NRD를 결정하는 그림 1(b) 모두 표 1과 같이 중계 구간이 증가할수록 SMF 길이가 증가(ascending)되고 동시에 RDPS가 증가되는 경우 (표 1에서 Asc:Asc), SMF 길이가 증가되고 동시에 RDPS가 감소(descending)되는 경우 (표 1에서 Asc:Des), SMF 길이가 감소되고 동시에 RDPS가 감소되는 경우 (표 1에서 Des:Des)와 SMF 길이가 감소되고 동시에 RDPS가 증가되는 경우 (표 1에서 Des:Asc)의 4가지를 고려하였다.

그림 1(a)에서 선치 보상은 첫 번째 중계 구간의 DCF 길이 l_{pre} 에 의해 조절되고 9번째 중계 구간의 RDPS는 2 번째부터 8번째 중계 구간까지 축적된 분산을 제거하기 위하여, 즉 후반 전송 구획에서의 잉여 분산을 0 ps/nm으로 하기 위하여 -560 ps/nm로 하였다. 반면, 그림 1(b)에

그림 1. WDM 광전송 링크의 구조. (a) 선치 보상 (b) 후치 보상

Fig. 1 The configuration of WDM optical transmission links. (a) precompensation (b) postcompensation

표 1. SMF 길이와 RDPS의 인위적 분포의 종류. (a) 선치 보상 (b) 후치 보상
 Table. 1 Specific of artificial distribution of SMF length and RDPS. (a) precompensation (b) postcompensation

기호	구분	분포 형태	span 1	span 2	span 3	span 4	span 5	span 6	span 7	span 8	span 9
Asc:	SMF 길이, km	ascending	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Asc:	RDPS, ps/nm	ascending	선치보상	0	30	50	80	110	130	160	-560
Asc:	SMF 길이	ascending	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Des:	RDPS	descending	선치보상	160	130	110	80	50	30	0	-560
Des:	SMF 길이	descending	120	110	100	90	80	70	60	50	40
Des:	RDPS	descending	선치보상	160	130	110	80	50	30	0	-560
Des:	SMF 길이	descending	120	110	100	90	80	70	60	50	40
Asc:	RDPS	ascending	선치보상	0	30	50	80	110	130	160	-560

(a)

기호	구분	분포 형태	span 1	span 2	span 3	span 4	span 5	span 6	span 7	span 8	span 9
Asc:	SMF 길이, km	ascending	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Asc:	RDPS, ps/nm	ascending	-560	0	30	50	80	110	130	160	후치보상
Asc:	SMF 길이	ascending	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Des:	RDPS	descending	-560	160	130	110	80	50	30	0	후치보상
Des:	SMF 길이	descending	120	110	100	90	80	70	60	50	40
Des:	RDPS	descending	-560	160	130	110	80	50	30	0	후치보상
Des:	SMF 길이	descending	120	110	100	90	80	70	60	50	40
Asc:	RDPS	ascending	-560	0	30	50	80	110	130	160	후치보상

(b)

서 후치 보상은 9번째 중계 구간의 DCF 길이 l_{post} 에 의해 조절되고 첫 번째 중계 구간의 RDPS는 2번째부터 8번째 중계 구간까지 축적된 분산을 제거하기 위하여 -560 ps/nm로 하였다.

본 연구에서 고려한 9개 중계 구간의 SMF 길이의 평균은 80 km이고, 선치 보상과 후치 보상을 위한 중계 구간을 제외한 8개 중계 구간의 RDPS 평균은 80 ps/nm이다. 따라서 본 연구에서 살펴보는 인위적인 SMF 길이와 RDPS 분포에서의 시스템 성능의 비교 대상인 균일 분포 전송 링크의 SMF 길이는 선치 보상과 후치 보상으로 NRD를 결정하는 두 경우 모두 표 1에서 9개의 SMF 길이를 80 km으로 동일하게 대체하고, RDPS는 두 번째부터 8번째 중계 구간의 RDPS를 80 ps/nm로 대체하면 된다.

III. WDM 전송 시스템 모델링과 성능 해석

그림 1(a)와 (b)의 WDM 전송 시스템의 송신부는 서로 독립적인 40 Gbps 128(=2⁷) PRBS (pseudo random bit sequence)에 의해 강도 변조되는 24개 레이저 다이오드로 모델링하여 총 전송 용량을 960 Gbps (=24×40 Gbps)로 하였다. 여기서 24개 외부 광변조기로부터 발생하는 각각의 출력 전계 강도는 10 dB의 소광비 (extinction ratio)를 갖는 RZ 형식의 2차 가우시안 펄스로 모델링하였다.

24개의 WDM 채널 신호들은 다중화기 (MUX)에 의해 다중화된 후 광 링크로 전송된다. 다중화되어 전송되는 24개 채널 신호들은 OPC에서 공액 변환되어 나머지 전송 구간을 전파한 후 DEMUX에서 각 채널별로 분리된 후 수신기로 보내진다. OPC는 참고 문헌 [8]-[10]

에서와 동일한 파라미터를 갖는 HNL-DSF (highly nonlinearity -dispersion shifted fiber)를 비선형 매질로 갖는 구조로 모델링하였다. 24 채널 중 첫 번째 채널의 중심 파장은 1550.0 nm로 가정하였고, 각 WDM 채널들의 중심 주파수들은 ITU-T 권고에 따라 100 GHz (즉 0.8 nm)의 동일한 간격으로 분할하여 할당하였다.

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[11]. 수신 대역폭은 0.65×비트율로 가정하였다.

시스템의 성능 분석에 사용되는 EOP는

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

으로 정의되고, 여기서 EO_{rec} 은 수신 신호의 눈 열림 (EO; eye opening) 정도이고 EO_{bth} 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.

광전송 링크를 통해 손실과 비선형 효과의 영향을 겪으면서 전파하는 각 채널들은 비선형 쉬팅더거 방정식 (NLSE; nonlinear Schrödinger equation)에 의해 표현된다. NLSE를 단계 분할 푸리에 (SSF; split-step Fourier) 기법에 따라 시뮬레이션 하였다[12].

IV. 시뮬레이션 결과 및 검토

그림 2(a)와 (b)는 각각 그림 1(a)의 선치 보상과 그림 1(b)의 후치 보상에 NRD를 결정하는 링크에서 NRD에 따른 입사 전력이 -3 dBm인 24개 WDM 채널 중 최악 채널의 EOP를 표 1의 4개의 인위적 분포별로 나타낸 것이다. 그림 1을 통해 선치 보상과 후치 보상 모두 표 1에 따라 고려한 SMF 길이와 RDPS의 4가지의 인위적 분포의 대부분이 동일한 NRD에서 최악 채널의 EOP가 최소가 되는 것을 알 수 있다.

즉 선치 보상을 통해 NRD를 결정하는 구조에서 SMF 길이와 RDPS의 인위적 분포의 4가지 경우 모두 최소의 EOP를 만드는 최적 NRD가 11 ps/nm인 반면, 후치 보상을 통해 NRD를 결정하는 구조에서는 Asc:Des, Des:Des와 Des:Asc의 3가지의 인위적 분포에서는 최적 NRD가 -13 ps/nm이고, Asc:Asc의 분포에서는 -12 ps/nm로 얻어진다.

그림 2. NRD 변화에 따른 최악 채널의 EOP
(a) 선치 보상 (b) 후치 보상

Fig. 2 EOP of worst channel as a function of NRD variation. (a) precompensation (b) postcompensation

그림 1을 통해 알 수 있는 중요한 또 다른 결과는 선치 보상을 통해 NRD를 결정하는 링크에서는 NRD 변화에 따른 최악 채널의 EOP가 비슷하게 얻어지는 반면 후치 보상을 통해 NRD를 결정하는 링크에서는 SMF 길이와 RDPS의 구체적 인위적 분포에 따라 성능이 크게 달라지는 것을 알 수 있다. 특히, 중계 구간이 증가할수록 SMF 길이와 RDPS를 증가시키는 분포 (Asc:Asc 분포)에 비해 SMF 길이와 RDPS를 감소시키는 분포 (Des:Des 분포)에서 약 0.5 dB 정도 EOP가 개선되는 것을 알 수 있다.

그림 2에서 확인한 최적 NRD는 WDM 채널의 입사 전력이 -3 dBm인 경우로 그림 2를 통해 도출된 최적 NRD는 넓은 입사 전력 범위에서 만족되는 최적 NRD라고 보기 어렵다. 따라서 그림 2와 같은 분석을 좀 더 넓은 범위의 입사 전력에 걸쳐서 수행하여 OPC가 송신단과 수신단 근처에 있는 링크 구조에서 최악 채널의 EOP를 최소로 만드는 일반적인 최적 NRD를 도출할 필요가 있다.

그림 3. NRD에 따른 다양한 입사 전력의 최악 채널의 EOP

Fig. 3 EOP of worst channel of various launching power as a function of NRD

그림 3은 선치 보상과 표 1의 4가지 인위적 분포를 갖는 링크와 후치 보상과 표 1의 4가지 인위적 분포를 갖는 링크 각각에서 WDM 채널의 입사 전력이 -8 dBm부터 -1 dBm까지 1 dB 간격으로 변화시킨 경우 각각의 입사 전력에서 얻어진 최적 NRD를 나타낸 것이다.

그림 3에서 전체 32개의 최적 NRD 값 중에 선치 보상을 통해 NRD를 결정하는 링크에서는 22개의 NRD가 11 ps/nm의 값을 갖고, 후치 보상을 통해 NRD를 결정하는 링크에서는 15개의 NRD가 -13 ps/nm의 값을 갖는 것을 알 수 있다. 즉 OPC가 WDM 송신부 근처에 있고 선치 보상을 통해 NRD를 결정하는 링크와 OPC가 WDM 수신부 근처에 있고 후치 보상을 통해 NRD를 결정하는 링크 각각의 SMF 길이와 RDPS의 인위적 분포 형태와 입사 전력에 일반적인 최적 NRD는 11 ps/nm와 -13 ps/nm라고 할 수 있다.

그림 4(a)와 (b)는 각각 그림 3을 통해 도출된 결과에 따라, 즉 선치 보상을 통해 NRD가 11 ps/nm로 고정된 링크(그림 4(a))와 후치 보상을 통해 NRD가 -13 ps/nm로 고정된 링크(그림 4(b)) 각각에 WDM 채널들을 전송시킨 경우 입사 전력에 따른 최악 채널의 EOP를 표 1의 4가지 인위적 분포의 링크별로 나타낸 것이다. 또한 두 경우 모두 각각 NRD가 11 ps/nm와 -13 ps/nm로 고정되고 SMF 길이는 80 km로, 각 중계 구간의 RDPS는 80 ps/nm로 균일하게 분포된 링크에서의 최악 채널의 EOP와 비교하였다.

그림 4를 살펴보면, 우선 그림 2의 -3 dBm에서의 최적 NRD 도출을 위한 그래프에서의 결과처럼 선치 보상을 통해 NRD를 결정하는 링크에서 입사 전력에 따른 최악 채널의 EOP에 SMF 길이와 RDPS의 구체적인 인위적 분포 형태가 미치는 영향에 비해 후치 보상을 통해 NRD를 결정하는 링크에서의 SMF 길이와 RDPS의 구체적인 인위적 분포 형태가 미치는 영향이 더 큰 것을 알 수 있다. 즉 1 dB EOP를 수신 성능 기준으로 하는 경우 그림 4(a)의 선치 보상으로 NRD를 11 ps/nm로 고정하고 각 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS가 균일하게 분포하는 링크에서의 유효 입사 전력은 -8 ~ -4.2 dBm인데 반해 중계 구간이 증가할수록 SMF 길이가 증가하고 RDPS도 증가하는 링크(Asc:Asc)에서의 유효 입사 전력은 -8 ~ -4.8 dBm으로 그 차이가 0.6 dB 정도로 얻어진다. 반면에 그림 4(b)의 후치 보상으로 NRD를 -13 ps/nm로 고정하고 각 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS가 균일하게 분포하는 링크에서의 유효 입사 전력은 -6.7 ~ -3 dBm인데 반해 중계 구간이 증가할수록 SMF 길이가 감소하고 RDPS도 감소하는 링크(Des:Des)에서의 유효 입사 전력은 -7.4 ~ -1 dBm으로 낮은 전력에서는 0.7 dB, 높은 전력에서는 2 dB 정도로 크게 개선되는 것을 알 수 있다.

(a)

(b)

그림 4. 최적 NRD에서 입사 전력에 따른 최악 채널의 EOP

- (a) NRD = +11 ps/nm에서의 선지 보상
- (b) NRD = -13 ps/nm에서의 후지 보상

Fig. 4 EOP of worst channel as a function of launching power at optimal NRD.

- (a) precompensation @ NRD = +11 ps/nm
- (b) postcompensation @ NRD = -13 ps/nm

이 결과를 달리 분석하면 OPC를 송신단이나 수신단에 가깝게 위치시켜 WDM 신호를 보상하는 경우 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS를 모두 균일하게 분포시키는 구조보다 중계 구간에 따라 점진적으로 증가시키거나 감소시키는 인위적인 분포의 구조가 성능 개선 효과 면

에서 더욱 효과적이고, 그 중에서도 OPC를 수신단 근처에 위치시키고 후지 보상으로 NRD를 결정하는 전송 링크에서 중계 구간이 증가할수록 SMF 길이와 RDPS를 감소시키는 분포 (Des:Des)로 구성하는 링크 구조가 왜곡된 WDM 신호를 가장 양호하게 보상한다는 것을 확인할 수 있다.

그림 5는 그림 1(b), 즉 후지 보상으로 NRD를 결정하고 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS가 점진적으로 감소하는 링크 (Des:Des 분포)의 분산 맵 (dispersion map)을 나타낸 것이다.

그림 5. Des:Des 분포의 후지 보상 전송 링크의 분산 맵

Fig. 5 Dispersion map of optical links with postcompensation of Des:Des distribution.

그림 5의 분산 맵을 통한 WDM 펄스의 전파 형태를 살펴보면, 첫 번째 중계 구간의 DCF를 통해 WDM 펄스는 매우 큰 음(negative)의 분산 값으로 인해 크게 압축되어 입사되고 중계 구간이 늘어날수록 RDPS가 감소되기 때문에 압축이 점점 줄어들기는 하지만 OPC 바로 전까지의 모든 위치에서 축적된 분산이 모두 음의 값을 갖기 때문에 압축이 완전히 풀리지는 않고 WDM 펄스가 OPC에 도달하였을 때 축적된 분산이 0 ps/nm가 되어 전송 링크에 입사된 WDM 펄스와 같은 정도의 압축 정도를 갖고 OPC를 통과하게 된다. WDM 펄스가 OPC를 통해 전반 전송 구획을 전파하면서 겪게 된 SPM에 의한 신호 왜곡이 어느 정도 보상되고 OPC 다음의 9번째 중계 구간의 SMF를 통해 인가되는 SPM에 의한 왜

곡은 동일한 SMF가 갖는 GVD와의 상호 반응에 의해 상쇄되고 여기서 동시에 겪은 분산은 다음의 DCF에서의 NRD에 의해 보상되어 수신단에 도착하게 되는 것을 알 수 있다.

즉 그림 1(b)의 구조는 전반 전송 구획과 후반 전송 구획의 길이가 크게 달라 OPC를 중심으로 WDM 신호의 광 전력과 국부 분산의 대칭이 불가능하기 때문에 OPC를 통해 효과적인 보상을 얻기 매우 어렵지만 이러한 비대칭성을 전반 전송 구획에서의 WDM 펄스의 전반적인 압축을 통해 GVD에 의한 펄스의 퍼짐(broadening)에 의한 왜곡을 보상하고 각 중계 구간의 0 ps/nm가 아닌 RDPS에 의한 WDM 펄스의 피크치 감소를 통해 각 SMF에서 겪게 되는 SPM의 영향을 전반적으로 억제하고 전반 전송 구획을 통과한 후 남아 있는 SPM에 의한 비선형 왜곡을 OPC를 통해 거의 제거한 후 후반 전송 구획으로 전송하여 효과적인 보상을 얻는 것이라고 분석할 수 있다. 아울러 전반 전송 구획의 각 중계 구간의 RDPS를 통한 SPM에 의한 신호 왜곡의 보상은 WDM 송신기에 가까울수록 중계 구간의 RDPS를 크게 하고 OPC에 가까워질수록 RDPS를 감소시켜, 즉 전체 전송로의 앞부분에서 SPM에 의한 비선형 왜곡을 크게 억제한 후 점진적으로 억제 정도를 줄이는 구조가 효과적이라는 것을 알 수 있다.

앞선 분석, 즉 그림 2와 3을 통해 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS가 표 1과 같이 인위적으로 분포하는 링크에 선치 보상으로 NRD를 결정하는 구조와 후치 보상으로 NRD를 결정하는 구조의 최적 NRD는 각각 11 ps/nm와 -13 ps/nm인 것을 알 수 있었다. 하지만 전송 링크의 실제적 구성을 하는데 있어 항상 이 값만을 고정적으로 적용하게 되면 융통적인 시스템 구성에 많은 한계를 수반할 수밖에 없다. 앞서 언급했던 1 dB EOP를 성능 기준으로 그림 2(b)를 다시 한 번 분석해 보면 다행히도 -13 ps/nm 외에 이들 근처의 다른 NRD 값들을 링크에 적용해도 1 dB EOP 기준 이내의 수신 품질을 얻을 수 있는 것을 알 수 있다. 즉 1 dB EOP 기준 이하로 만드는 각 경우의 NRD 범위를 구할 수 있고 이 범위 내의 특정 값으로 NRD가 유지되도록 링크 구조를 설계하는 것이 실제적으로 더욱 효과적이라고 할 수 있다.

EOP를 1 dB 이하가 되게 하는 NRD 범위를 유효 NRD라고 정의하고, 선치 보상으로 NRD를 결정하고 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS 분포를 Asc:Asc로 한 전송 링크

에서의 유효 NRD를 입사 전력에 따라 구한 것이 그림 6(a)이고, 후치 보상으로 NRD를 결정하고 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS 분포를 Des:Des로 한 전송 링크에서의 유효 NRD를 입사 전력에 따라 구한 것이 그림 6(b)이다. 그리고 그림 6(a)와 (b) 모두 유효 NRD의 개선 정도를 살펴보기 위하여 모든 중계 구간의 SMF 길이가 80 km, RDPS가 80 ps/nm로 균일한 링크에서의 유효 NRD도 동시에 나타냈다.

(a)

(b)

그림 6. 입사 전력 대 유효 NRD

(a) 선치 보상 (b) 후치 보상

Fig. 6 Launching power versus effective NRD.
(a) precompensation (b) postcompensation

우선 그림 6(a)의 선치 보상으로 NRD를 결정하고 SMF 길이와 RDPS 분포가 Asc:Asc인 구조에서의 유효 NRD는 SMF 길이와 RDPS 분포가 균일한 구조와 비교해 입사 전력이 -8 dBm부터 -3.5 dBm까지 범위에서 양(positive)의 NRD 값으로 약 2~3 ps/nm 정도만 개선하는 것을 알 수 있다. 반면, 그림 6(b)의 후치 보상으로 NRD를 결정하고 SMF 길이와 RDPS 분포가 Des:Des인 구조에서의 유효 NRD는 SMF 길이와 RDPS 분포가 균일한 구조와 비교해 입사 전력이 -6 dBm부터 -4 dBm까지 범위에서는 양의 NRD 값으로 약 20 ps/nm, 음의 NRD 값으로는 15 ps/nm 정도 개선되고, -7.5~-6 dBm의 범위와 -4~-2 dBm 범위에서는 균일 분포의 링크에서 1 dB EOP를 얻을 수 있는 NRD가 존재하지 못했던 것을 5~45 ps/nm의 유효 NRD를 갖게 하는 것을 알 수 있다.

또 한 가지 중요한 결과는 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS가 인위적으로 분포한 경우의 그림 6(a)와 (b)를 비교해 보면, 선치 보상으로 NRD를 결정하는 Asc:Asc 분포의 링크에서는 유효 NRD를 -18~17 ps/nm (35 ps/nm의 유효 NRD 폭)로 비교적 넓게 갖는 입사 전력 범위가 -7~-5 dBm인 반면, 후치 보상으로 NRD를 결정하는 Des:Des 분포의 링크에서 동일한 유효 NRD 폭을 갖는 입사 전력 범위가 -6.5~-3.5 dBm로 크게 증가한다는 것이다.

즉 WDM 입사 전력에 따른 유효 NRD 범위의 관점에서 그림 4의 결과와 같이 OPC가 WDM 수신단 근처에 있고 후치 보상으로 NRD를 결정하고 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS를 중계 구간이 증가할수록 감소시키는 분포를 갖는 링크 구조가 더욱 효과적이라는 것을 확인할 수 있다.

V. 결 론

지금까지 OPC가 WDM 송신단에 위치한 전송 링크에서 선치 보상으로 NRD를 결정하고 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS를 인위적으로 분포한 구조와 OPC가 WDM 수신단에 위치한 전송 링크에서 후치 보상으로 NRD를 결정하고 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS를 인위적으로 분포한 구조에서 GVD와 SPM에 의한 WDM 신호 왜곡의 보상을 통해 시스템 성능이 향상되는 것을 SMF 길이와 RDPS가 균일하게 분포하는 링크에서의 성능과 비교

해 살펴보았다.

OPC가 WDM 송신단에 위치하고 선치 보상으로 NRD를 결정하는 링크에서는 중계 구간이 증가할수록 SMF 길이와 RDPS 분포를 증가시키는 구조가 성능 개선 면에서 효과적이고, OPC가 WDM 수신단에 위치하고 후치 보상으로 NRD를 결정하는 링크에서는 중계 구간이 증가할수록 SMF 길이와 RDPS 분포를 감소시키는 구조가 효과적이라는 것을 알 수 있었다. 그러나 SMF 길이와 RDPS의 인위적 분포의 두 경우를 비교해 보면 후치 보상으로 NRD를 결정하고 SMF 길이와 RDPS를 감소시키는 구조가 1 dB EOP 기준 유효 입사 전력과 유효 NRD를 더욱 개선시키는 것을 확인하였다.

본 연구에서 얻은 결과를 실제 광 네트워크 설계에 적용한다면 DM과 OPC를 통해 WDM 성능이 개선되고 동시에 그동안의 기술적 한계였던 OPC의 위치 제한에 기인했던 네트워크 구조와 형태 변경의 어려움이 해소될 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] Shieh, W; Bao, H; Tang, Y, "Coherent optical OFDM: theory and design", Optics Express, Vol. 16 Issue 2, pp.841~859, 2008.
- [2] T. L. Koch Alferness, "Dispersion compensation by active predistorted signal synthesis", J. Lightwave Technol., vol. LT-3, pp. 800~805, 1985.
- [3] S. Kawai and K. Iwatsuki, "System design of filter-guided soliton transmission considering amplitude noise and timing jitter", J. Lightwave Technol., Vol. LT-16, No. 12, pp. 2347~2354, 1998.
- [4] X. Xiao, C. Yang, and P. Shum, "Analytical Design of SPM-Limited Systems With Optical Phase Conjugation", IEEE Photonics Technol. Lett. Vol. 20, No. 7, pp. 472~474, 2008.
- [5] 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.
- [6] X. Xiao, S. Gao, Y. Tian, and C. Yang, "Analytical

- optimization of the net residual dispersion in SPM-limited dispersion-managed systems," J. Lightwave Technol., Vol. 24, No. 5, pp. 2038~2044, May 2006.
- [7] I. E. Araci¹, S. Vorbeck, M. Schneiders, M. J. Ansari, N. Peyghambarian¹ and F. Kueppers¹ "System optimization and significant reach extension using alternating dispersion compensation for 160 Gbit/s transmission links", Optics Express, Vol. 13, No. 17, pp. 6336~6344, 2005.
- [8] 이성렬, 임황빈, "WDM (24×40 Gbps) 전송에서 광 위상 공액기와 분산 제어를 이용한 시스템 성능 개선", 한국통신학회논문지, 제 33권 제 10호, pp. 855~864, 2008.
- [9] 이성렬, "Inline 분산 제어 광전송 링크에서 전체 잉여 분산", 한국항행학회논문지 제 12권 4호, pp. 311~316, 2008.
- [10] 이성렬, "다양한 위치에 존재하는 OPC를 갖는 전송 링크에서 Inline 분산 제어를 이용한 WDM 채널의 성능 개선", 한국항행학회논문지, 제 14권 5호, pp. 668~676, 2010.
- [11] G. P. Agrawal, Fiber-optic communication systems, John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [12] G. P. Agrawal, Nonlinear Fiber Optics, Academic Press, 2001.

저자소개

이성렬(Seong-Real Lee)

1990년 2월 한국항공대학교
통신정보공학과 (공학사)
1992년 8월 한국항공대학교 대학원
통신정보공학과 (공학석사)

2002년 2월 한국항공대학교 대학원 통신정보공학과
(공학박사)
2002년 6월~2004년 2월 (주)에이티엔 기술연구소장
2004년 3월~현재 국립목포해양대학교 해양정보통신
공학과 부교수

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