

중계 구간의 SMF 길이와 RDPS 분포가 일정하지 않은 분산 제어 광전송 링크를 통한 왜곡된 WDM 신호의 보상

Compensation for Distorted WDM Signals Through Dispersion Managed Optical Transmission Links with Ununiform Distribution of SMF Length and RDPS of Optical Fiber Spans

이성렬*

Seong-Real Lee*

요 약

분산 제어 (DM; dispersion management)은 파장 분할 다중 (WDM; wavelength division multiplexed) 채널의 고품질 전송을 위해 광섬유의 그룹 속도 분산 (GVD; group velocity dispersion)과 비선형 효과의 상호 작용에 의해 왜곡되는 신호의 보상을 할 수 있는 대표적 기술이다. DM이 적용된 광전송 링크의 유연한 구성에 필요한 중계 구간 (fiber span)을 구성하는 단일 모드 광섬유 (SMF; single mode fiber)의 길이와 중계 구간 당 잉여 분산 (RDPS; residual dispersion per span)을 랜덤하게 분포시키는 구조와 인위적으로 분포시키는 구조에서의 최적 전체 잉여 분산 (NRD; net residual dispersion)의 최적치와 유효 입사 전력 범위를 도출하였다. 고려한 SMF의 길이와 RDPS 분포 패턴 모두 precompensation으로 NRD를 조절하는 경우에는 +10 ps/nm, postcompensation으로 NRD를 조절하는 경우에는 -10 ps/nm이 최적 NRD라는 것을 알 수 있었다. 그리고 NRD가 상기 값으로 설정된 경우 중계 구간이 증가할수록 SMF 길이를 감소시키고, RDPS를 증가시키는 인위적인 분포의 전송 링크에서의 시스템 성능이 가장 양호하여 균일한 분포의 링크에 비해 유효 입사 전력 범위가 2 dB 정도 신장되는 것을 확인하였다.

Abstract

Dispersion management (DM) is the typical technique compensating for the distorted signals due to interaction of group velocity dispersion (GVD) and optical nonlinear effects for transmitting wavelength division multiplexed (WDM) channel with the excellent performance. Optimal net residual dispersion (NRD) and effective launching power range of optical transmission links with random distribution and artificial distribution of single mode fiber (SMF) length and residual dispersion per span (RDPS) required to flexibly design of optical links in DM. It is confirmed that optimal net residual dispersion (NRD) are +10 ps/nm and -10 ps/nm controlled by precompensation and postcompensation, respectively, in both of the considered distribution patterns of SMF length and RDPS. And, in optimal NRD, system performance in optical links with the descending distribution of SMF length and the ascending distribution of RDPS among the artificial distribution patterns are more improved, consequently, effective launching power range is expanded by almost 2 dB than those in optical links with the uniform distribution.

Key words : Dispersion management, Net residual dispersion, Residual dispersion per span, Random (or artificial) distribution of SMF length and RDPS, Effective launching power

I. 서 론

에르븀 첨가 광섬유 증폭기 (EDFA; erbium-doped fiber amplifier) 등의 광 증계기의 사용은 파장 분할

* 목포해양대학교 해양정보통신공학과 (Dept. of Marine Inform. & Comm. Eng., Mokpo National Maritime University)

- 제1저자 (First Author) : 이성렬
- 투고일자 : 2012년 9월 7일
- 심사(수정)일자 : 2012년 9월 8일 (수정일자 : 2012년 10월 8일)
- 게재일자 : 2012년 10월 30일

다중화 (WDM; wavelength division multiplexed), 광 시분할 다중화 (OTDM; optical time division multiplexed) 등의 대용량 전송 시스템의 전송 거리를 지난 수 십 년 동안 계속 늘려왔다 [1]. 이러한 광전송에서의 전송 능력 신장은 전송 거리와 비트율이 증가할수록 심해지는 광섬유의 비선형 현상 (Kerr effect)과 그룹 속도 분산 (GVD; group velocity dispersion)에 의한 전송 성능 저하를 개선하고자 하는 노력의 결과이다. 즉 전송 거리에 비례해 축적되는 자연 방출 잡음 (ASE; accumulated spontaneous noise)에 의한 수신단에서의 신호 대 잡음비 저하를 줄여주기 위해 증가시켜야 하는 입력 전력과 EDFA에 의해 증폭된 전력에 의해 더욱 커진 광섬유에서의 비선형 현상이 광섬유의 GVD와 결합되어 발생시키는 시스템 성능 저하를 개선하고자 하는 많은 연구들에 의해 전송 능력이 신장되었다. 이러한 기술의 대표적인 것으로 분산 제어 (DM; dispersion management) 기술[2],[3]과 광 위상 공액 (optical phase conjugation) 기술[4]-[6]이 있다.

DM은 주 전송로로 사용되는 광섬유, 예를 들어 단일 모드 광섬유 (SMF; single mode fiber)나 비 영 분산 천이 광섬유 (NZ-DSF; non zero-dispersion shifted fiber)에서 축적된 총 분산량을 이들과 반대 부호의 분산 계수를 갖는 분산 보상 광섬유 (DCF; dispersion compensating fiber)를 전체 전송 링크의 적당한 곳에 위치시켜 줄여주거나 제거하는 기술이다. 또한 광 위상 공액 기술은 시스템의 전체 전송로 중간에 광 위상 공액기 (OPC; optical phase conjugator)를 두어 송신단부터 OPC까지 전과되면서 겪은 GVD와 비선형 현상에 의한 신호 왜곡을 OPC에서 공액 변환하여 나머지 전송 구간, 즉 OPC부터 수신단까지 전송시켜서 보상하는 방법으로 이론적으로 광 신호의 전력이 OPC를 중심으로 대칭적이어야 한다. 그러나 광섬유에서의 손실과 EDFA에서의 증폭 때문에 실제로 대칭을 만들기 어렵다[4]. 광 전력의 대칭화를 위해 라만 펌핑 (counterpropagating Raman pumping)을 이용할 수 있지만 큰 라만 이득 (약 2~3 dB net gain)이 필요하다는 단점이 있다[7].

더욱이 OPC를 중심으로 한 광 전력 분포의 비대칭화가 시스템이 대용량일수록 커지기 때문에 대용

량 WDM 전송 시스템의 구현을 위해서는 추가적인 기술이 더해져야 한다. 본 논문의 저자는 그동안의 연구를 통해 OPC가 DM 기술과 결합하면 광 전력 비대칭 문제가 완화되어 성능 개선 효과가 더욱 증대되는 것을 보였다[8],[9]. 이는 단순히 OPC와 DM을 결합하는 것이 아니라 시스템의 전송 용량, 변조 파형 형식, 광섬유의 형태 등에 관계하여 precompensation, postcompensation, 중계 간격 당 잉여 분산 (RDPS; residual dispersion per span), 전체 잉여 분산량 (NRD; net residual dispersion) 등을 최적화시킴으로써 가능하였다. 여기서, precompensation와 postcompensation는 각각 전송 링크의 가장 앞단과 가장 끝단에서 DCF를 통해 제어하는 분산량, RDPS는 전송 링크를 구성하는 광 중계 거리마다 축적된 잉여 분산량이고, NRD는 전송 링크 최종단에서 축적된 총 잉여 분산량으로 정의된다[2].

DM의 가장 일반적인 구조는 주 전송로인 SMF의 길이와 RDPS를 일정하게 하고 전송 링크의 precompensation과 postcompensation, 그리고 중계 간격마다 일정한 RDPS를 통해 결정되는 NRD를 최적화하는 것이다. 모든 중계 구간마다 SMF 길이와 RDPS를 일정하게 고정하지 않으면 전송 링크의 전체적인 구조가 복잡해지게 된다. 하지만 전체적인 구조가 복잡하다고 하더라도 중계 구간의 RDPS에 변화를 주어 시스템 성능이 크게 향상된다면 대용량 정보 전송 측면에서 바람직하다고 할 수 있다. 저자가 아는 한 RDPS를 포함하여 SMF 길이를 중계 구간마다 랜덤하게 구성하거나 인위적으로 구성한 전송 링크에 대한 연구는 아직까지 보고되지 않았다.

따라서 본 논문에서는 전체 전송 링크 중간에 OPC가 적용되고, OPC를 중심으로 송신단부터 OPC까지의 전반 전송 구획 (former half section)과 OPC부터 수신단까지의 후반 전송 구획 (latter half section)에서의 모든 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS가 랜덤하게 분포하는 전송 링크와 인위적으로 분포하는 전송 링크의 시스템 성능을 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS가 모두 균일하게 고정된 전송 링크에서의 시스템 성능과 비교하여 각 경우의 최적 NRD를 도출해 보고자 한다. 또한 본 논문에서 고려한 40 Gbps × 24개 채널 WDM 시스템을 위한 최상의 SMF 길이

와 RDPS 분포 조건을 아울러 도출해 보고자 한다.

II. WDM 전송 시스템의 구성

그림 1은 본 논문에서 살펴보는 40 Gbps × 24 채널 WDM 신호 전송을 위한 송신부, 전체 전송로 중간에 OPC가 위치하고 DM이 적용된 광전송 링크와 수신부로 구성된 시스템의 전체 구조를 나타낸 것이다. 그림 1의 WDM 전송 시스템의 24개 송신기(Tx)는 분포 제환 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 소광비 (ER; extinction ratio)가 10 dB인 2차 가우시안 펄스의 RZ로 모델링하였다.

24개의 WDM 채널 신호들은 다중화기 (MUX; multiplexer)에서 다중화된 후 광 링크로 전송된다. 전체 광전송 링크는 MUX부터 OPC까지의 전반 전송 구획과 OPC부터 역다중화기(DEMUX)까지의 후반 전송 구획으로 나누어진다. 다중화되어 전송되는 24개 채널 신호들은 전체 전송로 중간에 위치한 OPC에서 공액 변환되어 나머지 전송 구획을 전파한 후 DEMUX에서 각 채널별로 분리된 후 수신기(Rx)로 보내진다. OPC는 참고 문헌 [8]에서와 동일한 파라미터를 갖는 HNL-DSF(highly nonlinearity - dispersion shifted fiber)를 비선형 매질로 갖는 구조로 모델링하였다. 그리고 수신기는 5 dB의 잡음 지수를 갖는 전

치 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[10]. NLSE를 단계 분할 푸리에 (SSF; split-step Fourier) 기법에 따라 시뮬레이션 하였다.

III. 광전송 링크의 구조와 성능 평가

그림 1의 전송 링크의 전반과 후반 전송 구획의 각 7개의 중계 구간을 구성하는 모든 SMF와 DCF의 길이, 즉 $l_{SMF,n}$ (n=1,2,3,...,14)와 $l_{DCF,n}$ (n=2,3,4,...,13)는 본 연구의 목적을 위하여 일정하지 않다. 그러나 모든 중계 구간의 주 전송로인 SMF의 손실 계수 α_{SMF} 는 0.2 dB/km, 비선형 계수 γ_{SMF} 는 1.41 W⁻¹ km⁻¹ (@1,550 nm), 분산 계수 D_{SMF} 는 17 ps/nm/km (@ 1,550 nm)로 일정하게 하였다. 또한 각 중계 구간의 SMF에서 축적되는 분산량을 제거하거나 줄여주기 위해 추가되는 모든 DCF의 손실 계수 α_{DCF} 는 0.4 dB/km, 비선형 계수 γ_{DCF} 는 4.83 W⁻¹ km⁻¹ (@1,550 nm), 분산 계수 D_{DCF} 는 -100 ps/nm/km로 동일하게 가정하였다.

본 논문의 연구 목적인 각 중계 구간을 구성하는 SMF 길이와 각 중계 구간의 RDPS를 일정하지 않도록 하는 전송 링크의 구조를 2가지로 설정하였다. 그 중 하나는 SMF 길이와 RDPS를 모두 랜덤하게 분포시키는 구조로 우선 각 전송 반 구획의 7개 각각의 SMF의 길이가 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110 km 중 하

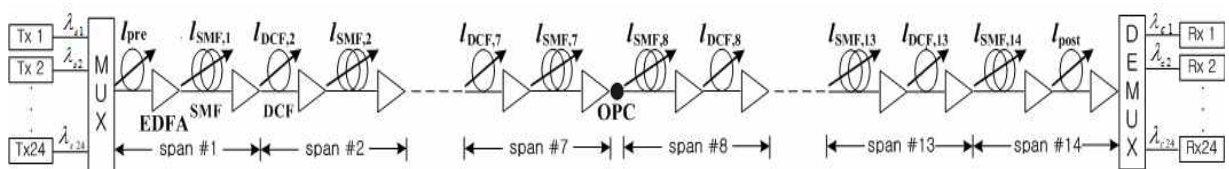


그림 1. 40 Gbps × 24 채널 WDM 전송 시스템 구조
 Fig. 1. Configuration of 40 Gbps × 24 channels WDM transmission system.

나의 값으로 랜덤하게 결정(이 분포는 각 전송 반 구획의 중계 구간의 평균 SMF 길이를 80 km가 되게 한다)되도록 하고, 동시에 첫 번째와 마지막 14번째 중계 구간을 제외한 각 전송 반 구획의 6개의 각각의 RDPS은 0, 100, 200, 300, 400, 800 ps/nm 중 하나의 값으로 랜덤하게 결정(이 분포는 각 전송 반 구획에서의 평균 RDPS를 300 ps/nm가 되게 한다)되도록 하였다. 각 중계 구간의 랜덤한 RDPS 값은 해당 구간의 아래 식 (1)의 DCF 길이 조절로 가능하다.

$$l_{DCF,n} = \frac{(l_{SMF,n} \times D_{SMF,n}) - RDPS}{D_{DCF,n}} \quad (1)$$

각 중계 구간을 구성하는 SMF 길이와 각 중계 구간의 RDPS를 일정하지 않도록 하는 전송 링크의 두 번째 구조는 SMF 길이와 RDPS를 인위적으로 분포시키는 것으로, 예를 들어 그림 1의 전반 전송 구획의 SMF 길이와 RDPS는 중계 구간 번호가 증가할수록 증가시키고, 즉 $l_{SMF,1}$ 는 50 km로 시작하여 $l_{SMF,7}$ 는 110 km가 되도록 중계 구간마다 10 km 간격으로

표 1. 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS의 인위적인 분포
Table 1. Artificial distribution of SMF length and RDPS of each fiber span.

기호	구분	former half section							latter half section						
		#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14
AA	l_{SMF} [km]	50	60	70	80	90	100	110	50	60	70	80	90	100	110
AA	RDPS [ps/nm]		0	100	200	300	400	800	0	100	200	300	400	800	
AA	l_{SMF} [km]	50	60	70	80	90	100	110	50	60	70	80	90	100	110
DD	RDPS [ps/nm]		800	400	300	200	100	0	800	400	300	200	100	0	
AA	l_{SMF} [km]	50	60	70	80	90	100	110	50	60	70	80	90	100	110
AD	RDPS [ps/nm]		0	100	200	300	400	800	800	400	300	200	100	0	
AA	l_{SMF} [km]	50	60	70	80	90	100	110	50	60	70	80	90	100	110
DA	RDPS [ps/nm]		800	400	300	200	100	0	0	100	200	300	400	800	
DD	l_{SMF} [km]	110	100	90	80	790	60	50	110	100	90	80	70	60	50
AA	RDPS [ps/nm]		0	100	200	300	400	800	0	100	200	300	400	800	
DD	l_{SMF} [km]	110	100	90	80	790	60	50	110	100	90	80	70	60	50
DD	RDPS [ps/nm]		800	400	300	200	100	0	800	400	300	200	100	0	
DD	l_{SMF} [km]	110	100	90	80	790	60	50	110	100	90	80	70	60	50
AD	RDPS [ps/nm]		0	100	200	300	400	800	800	400	300	200	100	0	
DD	l_{SMF} [km]	110	100	90	80	790	60	50	110	100	90	80	70	60	50
DA	RDPS [ps/nm]		800	400	300	200	100	0	0	100	200	300	400	800	
AD	l_{SMF} [km]	50	60	70	80	90	100	110	110	100	90	80	70	60	50
AA	RDPS [ps/nm]		0	100	200	300	400	800	0	100	200	300	400	800	
AD	l_{SMF} [km]	50	60	70	80	90	100	110	110	100	90	80	70	60	50
DD	RDPS [ps/nm]		800	400	300	200	100	0	800	400	300	200	100	0	
AD	l_{SMF} [km]	50	60	70	80	90	100	110	110	100	90	80	70	60	50
AD	RDPS [ps/nm]		0	100	200	300	400	800	800	400	300	200	100	0	
AD	l_{SMF} [km]	50	60	70	80	90	100	110	110	100	90	80	70	60	50
DA	RDPS [ps/nm]		800	400	300	200	100	0	0	100	200	300	400	800	
DA	l_{SMF} [km]	110	100	90	80	70	60	50	50	60	70	80	90	100	110
AA	RDPS [ps/nm]		0	100	200	300	400	800	0	100	200	300	400	800	
DA	l_{SMF} [km]	110	100	90	80	70	60	50	50	60	70	80	90	100	110
DD	RDPS [ps/nm]		800	400	300	200	100	0	800	400	300	200	100	0	
DA	l_{SMF} [km]	110	100	90	80	70	60	50	50	60	70	80	90	100	110
AD	RDPS [ps/nm]		0	100	200	300	400	800	800	400	300	200	100	0	
DA	l_{SMF} [km]	110	100	90	80	70	60	50	50	60	70	80	90	100	110
DA	RDPS [ps/nm]		800	400	300	200	100	0	0	100	200	300	400	800	

늘리면서 동시에 2번째 중계 구간의 RDPS부터 7번째 중계 구간의 RDPS를 각각 0, 100, 200, 300, 400, 800 ps/nm로 순차적으로 증가시키고, 후반 전송 구획의 SMF 길이와 RDPS도 같은 방법으로 중계 구간 번호가 증가할수록 증가시키는 구조 등이 있다. 이러한 인위적인 분포로 얻을 수 있는 전송 링크의 구조는 고려해야 할 파라미터가 4개이고 분포 방식이 각각 4개이기 때문에 표 1에 나타냈듯이 총 16가지이다. 표 1에서 사용한 기호 중 A는 중계 구간이 증가할수록 SMF 길이 또는 RDPS가 증가(ascending)한다는 것을 의미하고, D는 중계 구간이 증가할수록 SMF 길이 또는 RDPS가 감소(descending)한다는 것을 의미한다.

본 연구에서 고려한 각 전송 반 구획의 7개 중계 구간의 SMF 길이의 평균은 80 km이고, precompensation과 postcompensation을 위한 중계 구간을 제외한 12개 중계 구간의 RDPS 평균은 300 ps/nm이다. 따라서 본 연구에서 살펴보는 SMF 길이와 RDPS 분포가 일정하지 않은 전송 링크에서의 시스템 성능의 비교 대상인 균일 분포 전송 링크의 14개 SMF 길이는 모두 80 km으로 동일하게 하고, 2번째부터 13번째 중계 구간의 RDPS를 300 ps/nm로 모두 균일하게 하기 위하여 이들 중계 구간의 DCF 길이를 모두 10.6 km로 동일하게 하여 얻을 수 있다.

그림 1에서 3가지의 SMF 길이와 RDPS 분포 모두 NRD는 14번째 중계 구간의 DCF 길이를 후반 전송 구획에서의 축적 분산량이 0 ps/nm가 되도록 31.6 km로 고정시켜 놓고 첫 번째 중계 구간의 DCF 길이 l_{pre} 에 의해 결정되는 precompensation, 또는 첫 번째 중계 구간의 DCF 길이를 31.6 km로 고정시켜 놓고 14번째 중계 구간의 DCF 길이 l_{post} 에 의해 결정되는 postcompensation에 의해 결정되도록 하였다.

본 연구에서 사용한 시스템의 성능은 아래 식으로 정의된 눈 열림 패널티 (EOP; eye opening penalty)이다.

$$EOP[dB] = 10\log_{10}(EO_{rec}/EO_{btb}) \quad (2)$$

식 (2)에서 EOrec는 수신 신호의 눈 열림 (EO; eye opening) 정도이고 EObtb은 광섬유 전송 링크에 입사되기 전 송신 신호의 눈 열림 정도로, EO는 아래와 같이 정의된다.

$$2P_{av}/(P_{1,min} - P_{0,max}) \quad (3)$$

여기서 Pav는 광 신호의 평균 전력, P1,min은 펄스 '1'의 최소 전력이고 P0,max은 펄스 '0'의 최대 전력이다.

III. 시뮬레이션 결과 및 검토

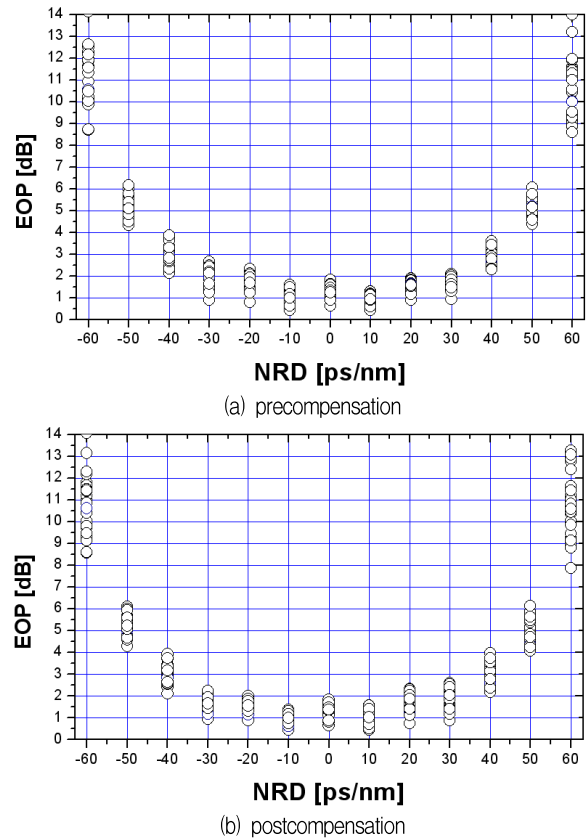


그림 2. SMF 길이와 RDPS가 랜덤한 전송 링크에서 각각 precompensation과 postcompensation에 의해 결정되는 NRD에 따른 최악 채널의 EOP

Fig. 2. EOP of worst channel as a function of NRD determined by precompensation and postcompensation, respectively, in optical transmission links with random distribution of SMF length and RDPS.

그림 2의 (a)와 (b)는 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS 분포가 랜덤한 전송 링크에서 입사 전력이 0 dBm인 24개의 WDM 채널 중 EOP 특성이 가장 나쁘게 나타나는 최악 채널의 EOP를 각각 precompensation과 postcompensation에 의해 결정되는 NRD의

변화에 따라 나타낸 것이다. 실제 랜덤한 SMF 길이와 랜덤한 RDPS에 의한 조합의 수는 무수히 많지만 본 연구에서는 랜덤하게 30번 발생시켜 얻어진 결과를 나타냈다. 그림 2의 (a)와 (b)에서 확인할 수 있듯이 랜덤 분포의 SMF의 길이와 RDPS의 구체적 조합에 따라 NRD에 따른 EOP가 달라지지만, precompensation에 의해 NRD를 결정하는 전송 링크에서는 NRD가 +10 ps/nm인 경우, 그리고 postcompensation에 의해 NRD를 결정하는 전송 링크에서는 NRD가 -10 ps/nm인 경우 EOP 편차가 비교적 적게 나타나고, 동시에 다른 NRD에 비해 EOP도 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 즉 SMF 길이와 RDPS 분포가 랜덤하고 precompensation과 postcompensation으로 NRD를 결정하는 전송 링크에서 최적 NRD는 각각 +10 ps/nm와 -10 ps/nm라고 판단할 수 있다.

그림 2를 통해 얻은 결과가 WDM 채널의 입사 전

력이 다른 경우에서도 일치하는 지와 SMF 길이와 RDPS가 균일하게 분포하는 전송 링크 구조와 표 1과 같이 인위적으로 분포시킨 전송 링크 구조에서도 동일하게 얻어지는 지를 확인하기 위한 그래프가 그림 3이다. 즉 그림 3은 전송 링크의 SMF 길이와 RDPS를 모두 균일하게 분포시킨 경우, 랜덤하게 분포시킨 경우와 표 1과 같이 인위적으로 분포시킨 경우에 입사 전력이 -3 dBm과 2 dBm인 WDM 채널을 전송시켰을 때 수신 성능이 가장 나쁜 최악 채널의 EOP를 NRD에 따라 나타낸 것이다. 각 그림들에서 "Min. value of random distribution"과 "Max. value of random distribution"은 SMF 길이와 RDPS 분포가 랜덤한 30가지의 경우 중 EOP 특성이 각각 최상과 최악인 경우를 나타낸 것이다. 그리고 그림에서 "DDAA(또는 ADAA)"와 "AADD"는 각각 표 1의 인위적 분포의 16가지 경우 중 EOP 특성이 최상과 최

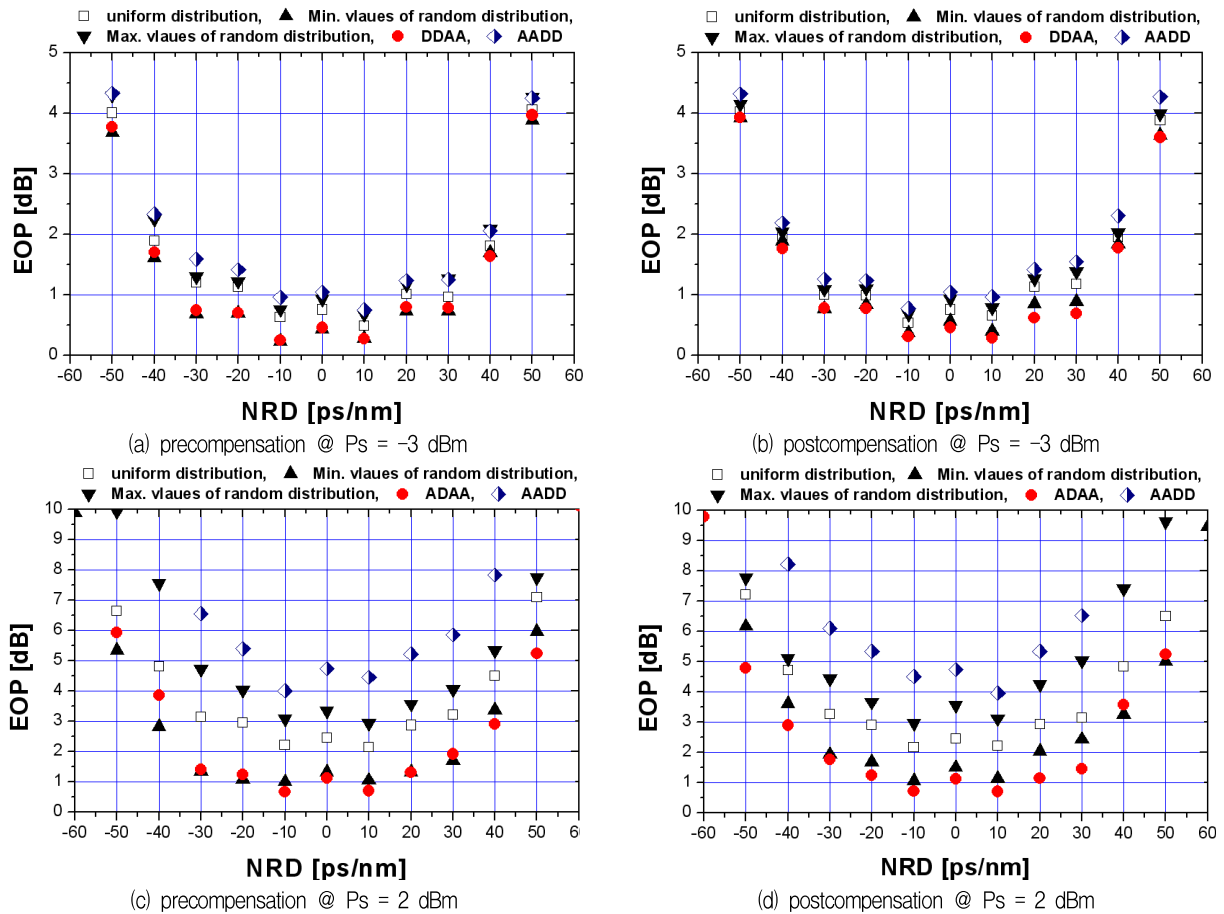
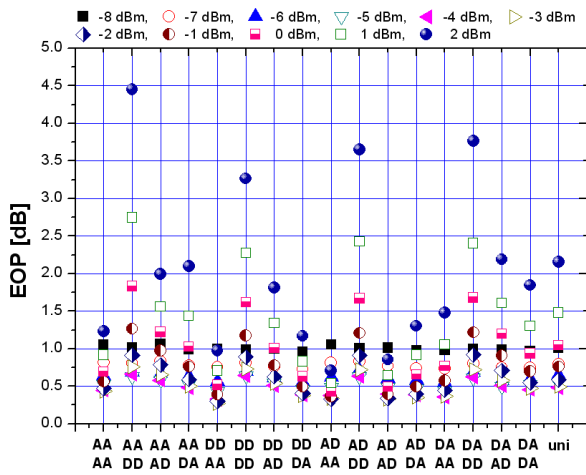
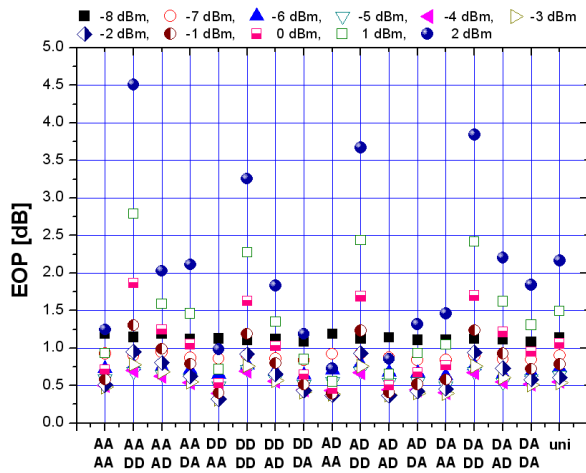


그림 3. precompensation과 postcompensation에 의해 결정되는 NRD에 따른 최악 채널의 EOP
 Fig. 3. EOP of worst channel as a function of NRD determined by precompensation and postcompensation, respectively.

악인 경우의 NRD 변화에 따른 EOP이다. 그림 3을 살펴보면, 모든 경우에 대해 성립하는 것은 아니지만 전반적으로 그림 2에서 얻은 결과와 같이 precompensation과 postcompensation으로 NRD를 결정하는 전송 링크에서 최적의 NRD는 각각 +10 ps/nm와 -10 ps/nm인 것을 알 수 있다.



(a) NRD = +10 ps/nm determined by precompensation



(b) NRD = -10 ps/nm determined by postcompensation

그림 4. SMF 길이와 RDPS의 인위적 분포에 따른 WDM 채널의 입사 전력별 EOP

Fig. 4. EOP as a function of the specifically artificial distribution of SMF length and RDPS.

그림 4 (a)와 (b)는 각각 precompensation에 의한 NRD를 +10 ps/nm로, postcompensation에 의한 NRD를 -10 ps/nm로 설정한 전송 링크에서 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS를 인위적으로 분포시킨 표 1의 16가지의 경우 각각에서의 입사 전력별 EOP를 SMF의 길이가 80 km로 균일하고 RDPS가 300 ps/nm로

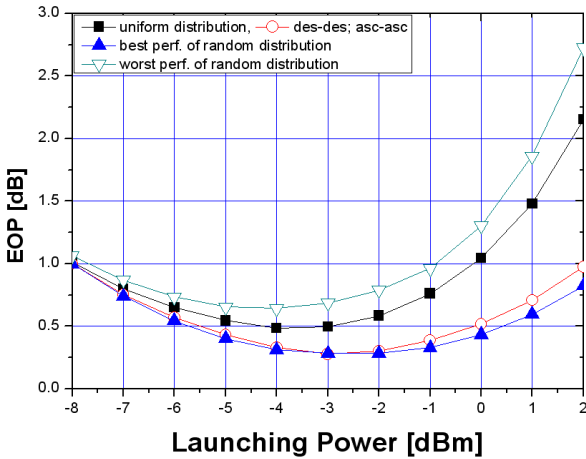
일정한 (그림 4의 x축에서 “uni”) 경우의 입사 전력별 EOP와 비교한 그래프로, 우선 전반과 후반 전송 구획 모두에서 중계 구간이 증가할수록 RDPS가 증가되는 4가지 경우 (즉 그래프 x축에서 xxAA인 4가지 경우) 모두 -8 ~ 2 dBm의 전력 범위에서의 EOP가 SMF의 길이와 RDPS가 균일한 전송 링크의 경우보다 입사 전력 변화에 따른 EOP의 편차가 적은 것을 확인할 수 있다.

특히, 4가지 경우 중에서도 전반과 후반 전송 구획 모두에서 SMF의 길이는 감소하고 중계 구간의 RDPS는 점점 증가하는 경우 (그래프의 x축에서 DD AA)가 고려한 입사 전력 변화에 따른 EOP 변동이 가장 적은 것을 알 수 있다. 즉 SMF의 길이와 각 중계 구간의 RDPS를 인위적으로 하고자하는 경우에 전반과 후반 전송 구획 모두 SMF의 길이는 중계 구간이 증가할수록 감소시키고 RDPS는 증가시키는 구조가 비교적 넓은 입사 전력 범위에 대해 고품질의 안정된 수신 성능을 얻게 하는 구조라고 판단할 수 있다.

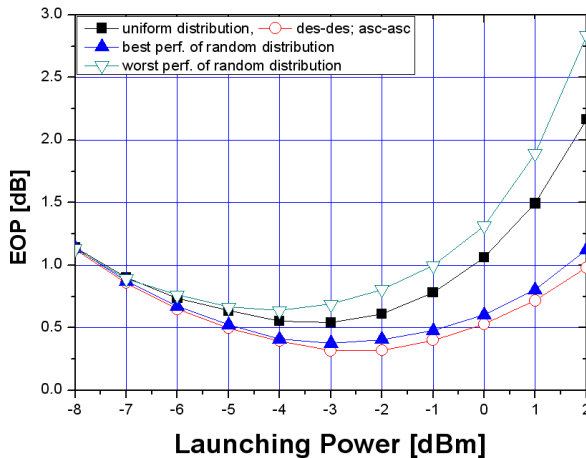
그림 3으로부터 알 수 있듯이 SMF 길이와 RDPS 분포를 모두 랜덤하게 구성한 경우의 수신 성능을 SMF 길이와 RDPS 분포를 균일하게 한 경우의 수신 성능보다 우수하게 얻을 수는 있지만 이것을 가능하게 하는 특정한 랜덤 분포 패턴을 찾는 것이 쉽지 않고, 더욱이 특정 랜덤 분포 패턴이 WDM 채널의 입사 전력에 따라 달라지기 때문에 실제 전송 링크를 구성하는데 있어 이 방법은 현실적이지 않다. 반면, 광 네트워크를 구성하는데 있어 SMF 길이와 RDPS를 균일하게 분포시킬 수 없는 경우 그림 4의 결과에 따라 전송 링크를 xxAA의 분포가 되도록 구성하면 수신 성능을 균일 분포의 전송 링크에서의 성능에 준하거나 그 이상으로 얻을 수 있다는 것이 그림 4의 결과가 갖는 의미이다.

그림 5는 SMF 길이와 RDPS 분포가 균일한 경우, 랜덤한 경우와 “DDAA”로 인위적인 경우에서 WDM 채널의 입사 전력 변화에 따른 EOP를 나타낸 것으로, 30가지의 랜덤 분포의 경우에 대해서는 최악 채널의 수신 성능을 가장 우수하게 만드는 분포(“best perf. of random distribution”)에서의 EOP와 가장 나쁘게 만드는 분포(“worst perf. of random distribution”)

에서의 EOP를 나누어 나타냈다. 1 dB EOP 이하의 성능으로 수신되는 입사 전력의 범위를 유효 입사 전력 범위라고 정의하면, SMF 길이와 RDPS를 균일하게 분포시키지 않은 전송 링크에서의 유효 입사 전력 범위가 더욱 늘어나는 것을 알 수 있다.



(a) NRD = +10 ps/nm determined by precompensation



(b) NRD = -10 ps/nm determined by postcompensation

그림 5. 입사 전력에 따른 최악 채널의 EOP
Fig. 5. EOP of worst channel as a function of launching power.

즉 precompensation으로 NRD를 +10 ps/nm로 설정한 전송 링크에서 SMF 길이와 RDPS를 균일하게 분포시킨 경우의 유효 입사 전력 범위가 -8~0 dBm인 반면, 이들 분포를 DDAA로 인위적으로 하는 경우 -8~2 dBm으로 2 dB 정도 늘어나고, 이들 분포를 최상의 수신 성능이 얻어지도록 랜덤하게 하는 경우에서도 2 dB 이상 신장되는 것을 알 수 있다. 그리고

postcompensation으로 NRD를 -10 ps/nm로 설정한 전송 링크에서 SMF 길이와 RDPS를 균일하게 분포시킨 경우의 유효 입사 전력 범위가 -7.5~0 dBm인 반면, 이들 분포를 DDAA로 인위적으로 하는 경우와 최상의 수신 성능이 얻어지도록 랜덤하게 하는 경우에는 각각 -7.5~2 dBm과 -7.5~1.5 dBm으로 유효 입사 전력 범위가 마찬가지로 개선되는 것을 알 수 있다.

그러나 앞서 분석했듯이 최상의 수신 성능을 얻을 수 있는 SMF 길이와 RDPS의 구체적인 랜덤 분포 패턴을 찾는 것이 쉽지 않기 때문에 수신 성능을 1 dB EOP 이하로 얻을 수 있는 유효 입사 전력 범위 측면에서도 전반과 후반 전송 구간 모두에서 SMF의 길이는 감소시키고 중계 구간의 RDPS는 점점 증가시키는 DDAA가 가장 바람직한 분포 구조라고 할 수 있다.

V. 결 론

지금까지 광 위상 공액과 DM이 적용된 전송 링크를 이용한 광 네트워크의 유연한 구성을 위해 중계 구간을 구성하는 SMF의 길이와 RDPS를 랜덤하게 분포시키는 구조와 인위적으로 분포시키는 구조에서의 최적 NRD를 통한 수신 성능 개선 정도를 살펴 보았다. 또한 각 링크 구조에서의 유효 입사 전력 범위를 도출하였다. 우선 SMF의 길이와 RDPS의 분포 상태에 관계없이 precompensation으로 NRD를 조절하는 경우에는 +10 ps/nm, postcompensation으로 NRD를 조절하는 경우에는 -10 ps/nm이 최적 NRD라는 것을 알 수 있었다.

전송 링크가 최적의 NRD로 결정되었다고 하더라도 WDM 채널을 최상으로 보상할 수 있는 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS의 특정한 랜덤 패턴을 찾는 것이 쉽지 않은 것을 확인하였다. 반면 SMF 길이와 RDPS를 인위적으로 분포시킨 경우 중에서 중계 구간이 증가할수록 RDPS를 증가시키는 xxAA의 분포에서의 수신 성능은 균일 분포의 전송 링크에서의 성능에 준하거나 그 이상으로 얻어지는 것을 확인하였다. 특히, 인위적인 분포 중에서 중계 구간이 증가

할수록 SMF 길이를 감소시키고, RDPS를 증가시키는 구조를 사용하게 되면 precompensation과 postcompensation에 의해 NRD가 각각 +10 ps/nm와 -10 ps/nm로 설정된 링크 모두에서 유효 입사 전력 범위를 균일한 분포의 링크에 비해 2 dB 정도 개선시키는 것을 확인하였다.

본 논문에서는 중계 구간의 SMF 길이와 RDPS가 균일하지 않고 랜덤하거나 인위적으로 변동되는 구조에서의 설계 조건을 도출하였기 때문에 장거리 대용량 광전송 링크의 구축에서 융통성을 제공할 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

[1] K. Song, and M. Premaratne, "Effects of SPM, XPM, and Four-Wave-Mixing in L-Band EDFAs on Fiber-Optic Signal Transmission", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 12, No. 12, pp. 1630~1632, 2000.

[2] 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.

[3] L. Grüner-Nielsen, et al., "Dispersion Compensating Fibers", *J. Lightwave Technol.*, Vol. 23, No. 11, pp. 3566~3578, 2005.

[4] 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.

[5] H. Wei and D. V. Plant, "Simultaneous nonlinearity suppression and wide-band dispersion compensation using optical phase conjugation", *Optics Express*, Vol. 12 No. 9, pp. 1938~1958, 2004.

[6] S. L. Jansen, D. van den Borne, B. Spinnler, S. Calabrò, H. Suche, P. M. Krummrich, W. Sohler, G. D. Khoe, and H. de Waardt, "Optical phase conjugation for ultra long-haul phase shift-keyed transmission," *J. Lightwave Technol.* Vol. 24, No. 1, pp. 54~64. 2006.

[7] J. Bromage, P. J. Winzer, and R.-J. Essiambre, "Multiple

path interference and its impact on system design," in *Raman Amplifiers for Telecommunications 2*, M. N. Islam, Ed. New York: Springer-Verlag, 2003.

[8] 이성렬, "집중형 분산 제어 WDM 전송 시스템에서 Mid-span spectral inversion 기술", *한국통신학회 논문지*, 제 33권 1호, pp. 7~15, 2008.

[9] 이성렬, "분산 제어가 적용된 광전송 링크에서 광 위상 공역의 비대칭성", *한국통신학회논문지*, 제 35권 8호, pp. 801~809, 2010.

[10] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, 2001.

이 성 렬 (李成烈)



1990년 2월 : 한국항공대학교 통신정보공학과 (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 해양정보통신공학과 부교수
 관심분야 : WDM 시스템, 광의 비선형 현상 분석, 광솔리톤 전송