
Inline 분산 제어가 적용된 WDM 시스템에서 전송 용량에 따른 전송 거리

이성렬* · 조성언**

Transmission Distance Depending on Transmission Capacity in Inline Dispersion
Managed WDM Systems

Seong-real Lee* · Sung-eon Cho**

요 약

Inline 분산 제어 (DM; dispersion management)와 전체 전송로 중간에 광 위상 공액기 (OPC; optical phase conjugator)를 갖는 WDM 시스템의 전송 용량에 따른 유효 전송 거리를 살펴보았다. 그리고 후치 보상량 (postcompensation)만으로 제어되는 1 Tbps WDM 시스템에서 1 dB 눈 열림 페널티 (EOP; eye opening penalty)를 얻을 수 있는 전체 잉여 분산 (NRD; net residual dispersion)의 범위를 살펴보았다. NRD를 시스템 전송 용량과 거리에 따라 최적화시킴으로써 유효 전송 거리가 수 백 킬로미터 이상 증가되는 것을 확인하였다. 그리고 1 Tbps WDM 시스템에서 NRD가 +17 ps/nm로 결정되면 최대 전송 거리를 얻을 수 있고, 특히 장거리 1 Tbps WDM 전송에서 유효 NRD 범위는 양의 값 내에서 결정되어야 하는 것을 확인하였다.

ABSTRACT

Effective transmission distance depending on transmission capacity of WDM systems with inline dispersion management (DM) and optical phase conjugator (OPC) at middle of total transmission length is investigated. The range of net residual dispersion (NRD) resulting 1 dB eye opening penalty (EOP) in 1 Tbps WDM system, in which NRD controlled by only postcompensation, is also investigated. It is confirmed that effective transmission distances are increased to longer than several hundreds kilometers by applying optimal NRD depending on transmission capacity and distance. And it is confirmed that in 1 Tbps WDM system if NRD is determined to +17 ps/nm, the maximum transmission distance is achieved, and, especially, in long-haul 1 Tbps WDM system the effective NRD range will be determined within positive value.

키워드

Dispersion management, effective transmission distance, WDM transmission capacity, OPC, net residual dispersion, pre(post)compensation, Dispersion compensating fiber.

* 목포해양대학교 해양전자통신공학부

접수일자 2008. 12. 24

** 순천대학교 정보통신공학부

심사완료일자 2009. 01. 16

I. 서 론

40 Gbps 시분할 다중화 (TDM; time division multiplexing) 채널들에 기반한 파장 분할 다중화(WDM; wavelength division multiplexing) 시스템은 향후의 Tbps 통신망 구현을 앞당길 수 있는 시스템이다. 이는 2.4 Gbps나 10 Gbps에 기반한 WDM 시스템에 비해 적은 채널들을 필요로 하고, 40 Gbps 채널들의 대용량화를 위한 100 GHz 이하의 높은 스펙트럼 효율 (즉 채널 간격이 0.8 nm 이하)이 WDM 다중화/역다중화 기술의 발전으로 가능해졌기 때문이다.

그러나 40 Gbps나 그 이상의 비트율에 기반한 WDM 시스템에서 고성능 수신이 가능한 유효 전송 거리는 광섬유의 색 분산 (chromatic dispersion) 영향으로 크게 제한받는다[1]. WDM 시스템의 전송 거리를 늘리면 늘릴 수록 축적된 총 분산량이 실제 시스템에서 허용 가능한 분산량을 초과하기 때문에, 또한 색 분산 효과는 채널의 파장, 즉 시스템들의 대역폭에 의존하기 때문에 장거리 대용량 WDM 전송 시스템의 구현을 위해서는 분산 보상 (dispersion compensation)이 필요하다.

주 전송로로 쓰이는 단일 모드 광섬유(SMF; single mode fiber)나 비 영 분산 천이 광섬유 (NZ-DSF; non zero - dispersion shifted fiber)와 반대 특성을 갖는 분산 보상 광섬유 (DCF; dispersion compensating fiber)나 분산 보상 모듈 (DCM; dispersion compensating module)을 주 전송로에 부가적으로 삽입 또는 추가하는 분산 제어 (DM; dispersion management)는 초고속 전송망을 위한 대표적인 분산 보상 기술이다[2].

또한 WDM 채널들을 좀 더 먼 거리로 전송하기 위해서는 수신단에서 높은 신호 대 잡음비 (SNR; signal-to-noise ratio)를 필요로 하기 때문에 신호의 전력을 높여주어야 한다. 그러나 증가된 신호 전력은 Kerr 효과에서 비롯되는 자기 위상 변조 (SPM; self phase modulation), 상호 위상 변조 (XPM; cross phase modulation), 4-광파 혼합(FWM; four-wave mixing) 등의 비선형 현상을 증가시켜 WDM 채널 신호들의 품질을 저하시킨다. 40 Gbps 이상의 WDM 채널의 변조 파형 형식으로 듀티 사이클 (duty cycle)이 50% 이하인 RZ를 사용한 경우에 펄스의 폭이 빠르게 퍼지게 되어 분산이 비선형 현상에 비해 우세해지고 따라서 신호 성능에 영향을 미치는 주요 요인들은 분산과 SPM인 것으로 알려졌

다[3].

색 분산뿐만 아니라 비선형 효과, 특히 SPM을 보상하기 위한 기술로 전체 전송로 중간에 광 위상 공액기 (OPC; optical phase conjugator)를 두어 송신단부터 OPC까지 전파되면서 겪은 왜곡된 신호파를 OPC에서 공액파로 변환하여 나머지 전송 구간을 전송시켜 수신하면 왜곡을 보상할 수 있는 위상 공액 (optical phase conjugation)이 있다[4],[5]. 그러나 광 위상 공액 기술에서 비선형 효과를 보상하기 위해서는 광 신호의 전력 분포가 OPC를 중심으로 대칭이 되어야 하지만 전송 링크를 구성하는 EDFA (erbium-doped fiber amplifier)에서의 신호 증폭과 광섬유 내에서의 손실 때문에 대칭을 만들기 매우 어렵다는 한계를 안고 있다. 본 논문의 저자는 그동안의 연구를 통해 OPC가 DM 기술과 결합하면 광 전력 대칭의 문제가 완화되어 성능 개선 효과가 더욱 증대되는 것을 보였다[6],[7]. 이는 단순히 OPC와 DM을 결합한 것을 통해서가 아니라 시스템 구조, 즉 전송 용량, 변조 파형 형식, 광섬유의 형태에 관련하여 선치 보상량 (precompensation), 후치 보상량 (postcompensation), 전송 링크 최종단에서 축적된 전체 분산량으로 정의되는 전체 잉여 분산량 (NRD; net residual dispersion) 등을 최적화하여 가능하였다.

본 논문에서는 OPC와 DM이 채택된 40 Gbps 기반 장거리 대용량 WDM 전송 시스템의 구현을 위한 분석으로써 전송 용량 (즉 채널 수)에 따른 유효 전송 거리를 살펴보고자 한다. WDM 시스템의 전송 용량별로 최적의 선치 보상량, 후치 보상량, NRD에 의한 최대 유효 전송 거리를 도출하고, 1 Tbps (26×40 Gbps) 전송에서 유효 후치 보상량의 범위를 전송 거리에 따라 도출해 보도록 한다.

본 논문에서 가정한 각 채널의 변조 파형 형식은 RZ로 하였고, DM의 구조는 집중형 (lumped) DM보다 시스템 성능 개선 효과가 좋은 매 광섬유 전송 구획 (span)마다 DCF를 두어 분산을 보상하는 inline DM을 사용하였다. 또한 각 전송 구획을 구성하는 광섬유는 SMF이고, 수신 신호의 성능 평가는 눈 열림 페널티 (EOP; eye opening penalty)를 사용하였다.

II. WDM 전송 시스템의 구성

그림 1(a)는 전송 링크에 inline DM이 적용되고 전체 전송 거리 중간에 OPC를 위치시킨 40 Gbps의 n-채널 WDM 전송 시스템의 전체 구조를 나타낸 것이다. 그림 1의 WDM 전송 시스템의 n개의 송신기는 분포 채환 레이저 다이오드 (DFB-LD; distributed feedback laser diode)로, n에 관계없이 채널 1의 DFB-LD의 중심 파장 λ_{s1} 은 각각 1,550 nm로 하고 채널 간격은 ITU-T 권고에 따라 100 GHz (즉 0.8 nm)로 모델링하였다[8]. 따라서 본 논문에서 살펴보는 WDM 시스템의 전송 용량별 신호 파장 범위는 표 1과 같이 정의된다.

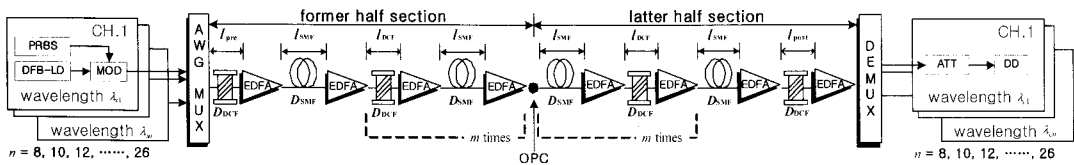
n개의 DFB-LB는 서로 독립적인 128(=2⁷) 의사 랜덤 비트열 (PRBS; pseudo random bit sequence)에 의해 외부적으로 변조되고, 변조기로부터 발생하는 변조 파형 형식은 소광비(ER; extinction ratio)가 10 dB인 2차 가우시안 펄스의 RZ로 모델링하였다.

n개의 WDM 채널 신호들은 배열 도파로 격자 다중화기 (AWG MUX; arrayed-waveguide grating multiplexer)에서 다중화된 후 광 전송 링크로 전송된다. 광전송 링크 구조에 대해서는 다음 장에서 언급하도록 하겠다.

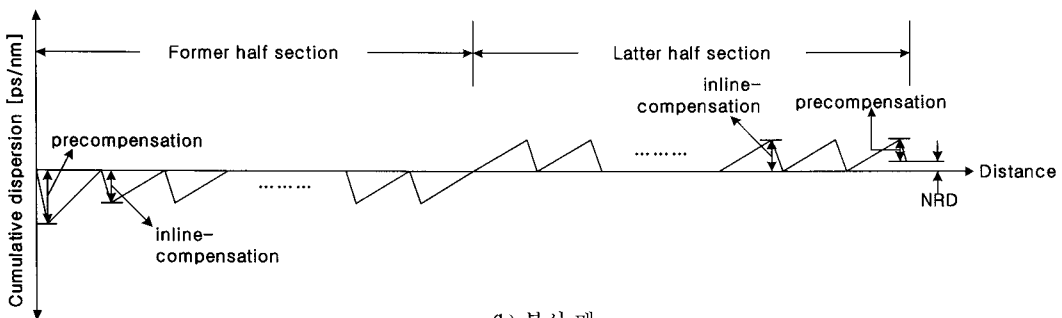
표 1. WDM 시스템의 전송 용량별 신호 파장 범위
Table 1. Signal wavelength width of WDM system capacities.

전송 용량	채널수	신호 파장 범위
320 Gbps	8	1,550.0 ~ 1,555.6 nm
400 Gbps	10	1,550.0 ~ 1,557.2 nm
480 Gbps	12	1,550.0 ~ 1,558.8 nm
560 Gbps	14	1,550.0 ~ 1,560.4 nm
640 Gbps	16	1,550.0 ~ 1,562.0 nm
720 Gbps	18	1,550.0 ~ 1,563.6 nm
800 Gbps	20	1,550.0 ~ 1,565.2 nm
880 Gbps	22	1,550.0 ~ 1,566.8 nm
960 Gbps	24	1,550.0 ~ 1,568.4 nm
1,040 Gbps	26	1,550.0 ~ 1,570.0 nm

다중화되어 전송되는 n개 채널 신호들은 전체 전송로 중간에 위치한 OPC에서 공역 변환되어 나머지 전송 구간을 전파한 후 DeMUX에서 각 채널별로 분리된 후 수신기로 보내진다. OPC는 참고 문헌 [9]에서와 동일한 파라미터를 갖는 HNL-DSF(highly nonlinearity - dispersion shifted fiber)를 비선형 매질로 갖는 구조로



(a) WDM 전송 시스템



(b) 분산 맵

그림 1. WDM 전송 시스템의 구조와 분산 맵

Fig. 1. The configuration of WDM transmission system and dispersion map.

모델링하였다. 그리고 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[10]. 수신 대역폭은 0.65×비트율로 가정하였다.

광전송 링크를 통해 손실과 비선형 효과의 영향을 겪으면서 전파하는 각 채널들은 비선형 슈뢰딩거 방정식 (NLSE; nonlinear Schrödinger equation)에 의해 표현된다 [11]. 본 논문에서는 NLSE를 단계 분할 푸리에 (SSF; split-step Fourier) 기법을 이용하여 수치적으로 분석하여 시뮬레이션 하였다.

III. 광 전송 링크의 구성과 수치 해석 방법

광 전송 링크는 OPC를 중심으로 AWG-MUX부터 OPC까지의 전반 전송 구간 (former half section)과 OPC부터 DeMUX까지의 후반 전송 구간 (latter half section)으로 나뉜다. 전체적인 분산 분포가 그림 1(b)에 나타난 분산 맵 (dispersion map)처럼 OPC를 중심으로 대칭이 되도록 전반 전송 구간에서는 SMF의 전송 구획(span) 전에, 반면 후반 전송 구간에서는 SMF의 구획 다음에 DCF를 두는 구조로 설계하였다.

SMF 구획의 길이 l_{SMF} 는 모두 50 km로 고정하였고, SMF 구획의 수는 전체 전송 거리에 따라 가변하도록 하였다. 즉 전체 전송 거리는 그림 1(a)에서 m 값에 변화를 주어 수행한다. SMF의 분산 계수 D_{SMF} 는 17 ps/nm/km, 손실 계수 α_{SMF} 는 0.2 dB/km, 비선형 계수 γ_{SMF} 는 1.41 W-1 km-1(@1,550 nm)로 가정하였다. 따라서 각 SMF 구획에서 축적된 총 분산량은 850 ps/nm (= 17 ps/nm/km × 50 km)이다. 그리고 모든 DCF의 분산 계수 D_{DCF} 는 -85 ps/nm/km로, 손실 계수 α_{DCF} 는 0.4 dB/km, 비선형 계수 γ_{DCF} 는 4.83 W-1km-1(@1,550 nm)로 가정하였다. 본 논문에서 고려하는 inline DM은 전체적 구조를 간단하게 하기 위해 송신기 바로 다음에 있는 DCF 구획과 수신기 바로 전에 있는 DCF 구획을 제외한 나머지 DCF 구획의 길이 l_{DCF} 는 한 SMF 구획에서의 축적 분산량을 0 ps/nm로 만드는 10 km로 고정

하였다. 즉 그림 1(b)에서 inline 보상량이 -850 ps/nm가 되도록 10 km로 하였다. 하지만 WDM 시스템의 전송 용량별 전송 거리의 최대화를 선치 보상량과 후치 보상량, 그리고 NRD의 제어를 통해 얻고자 그림 1(b)에서처럼 선치 보상량의 변화는 송신기 바로 다음에 있는 DCF의 길이, 즉 l_{pre} 와 후치 보상량의 변화는 수신기 바로 전에 있는 DCF의 길이, 즉 l_{post} 의 가변을 통해 얻도록 설계하였다. 그리고 NRD는 선택된 선치 보상량과 후치 보상량에 의해 결정된다.

본 논문의 목적인 그림 1(a)의 WDM 전송 시스템의 전송 용량에 따른 유효 전송 거리를 살펴보기 위하여 먼저 NRD가 0 ps/nm로 설계된 시스템, 즉 선치 보상량과 후치 보상량이 모두 -850 ps/nm로 설계된 시스템 (이는 l_{pre} 와 l_{post} 가 모두 10 km로 설계된 경우)에서의 전송 용량에 따른 유효 전송 거리를 도출한다. 그런 후 선치 보상량을 -850 ps/nm로 고정할 경우 전송 용량별 유효 전송 거리를 최대로 만드는 최적의 후치 보상량의 선택과 이때의 유효 전송 거리를 도출하고, 선치 보상량과 후치 보상량 모두 동시에 변화를 준 경우 전송 용량별 유효 전송 거리를 최대로 만드는 최적의 선치와 후치 보상량의 선택과 이때의 유효 전송 거리를 도출한다. 그리고 이 3가지 경우의 전송 용량별 유효 전송 거리를 비교하여 최적 inline DM에서의 전송 용량별 유효 전송 거리의 개선 정도를 살펴보도록 한다.

본 연구에서 살펴보는 전송 용량별 유효 전송 거리는 최악(worst) 채널의 EOP가 1 dB가 되는 전송 거리로 정의한다. 여기서 EOP는

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

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

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

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.

IV. 시뮬레이션 결과 및 검토

4.1. 전송 용량에 따른 유효 전송 거리

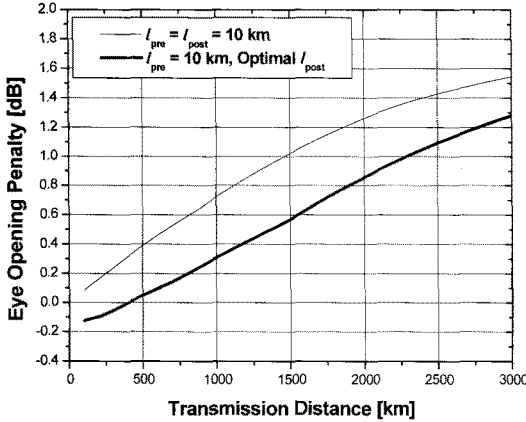


그림 2. 960 Gbps WDM 시스템의 전송 거리에 따른 EOP

Fig. 2. EOP as a function of transmission distance in 960 Gbps WDM system.

그림 2는 그림 1(a)의 WDM 전송 시스템에서 l_{pre} 와 l_{post} 가 모두 10 km로 설정된 경우 (즉 $NRD = 0$ ps/nm)와 l_{pre} 만 10 km로 설정되고 전송 거리별로 l_{post} 가 최적으로 결정된 경우 각 채널의 입사 전력 P_s 가 3 dBm인 24개 채널 (즉 전송 용량이 960 Gbps)을 전송했을 때 전송 거리에 따른 수신 신호의 성능이 최악인 채널의 EOP를 나타낸 것이다. WDM 전송 링크에 inline DM을 적용하는데 있어 단순히 NRD 가 0 ps/nm가 되도록 설계하여 적용한 경우에서보다 후치 보상량만이라도 전송 거리에 따라 최적화시켜 적용하면 동일한 전송 거리에 대해 전송 성능이 개선되는 것을 알 수 있다. $NRD = 0$ ps/nm로 inline DM이 적용된 경우 1 dB EOP가 되는 유효 전송 거리는 약 1,400 km인 반면 후치 보상량만 최적화한 경우 유효 전송 거리는 약 2,300 km로 900 km 신장되는 것을 알 수 있다.

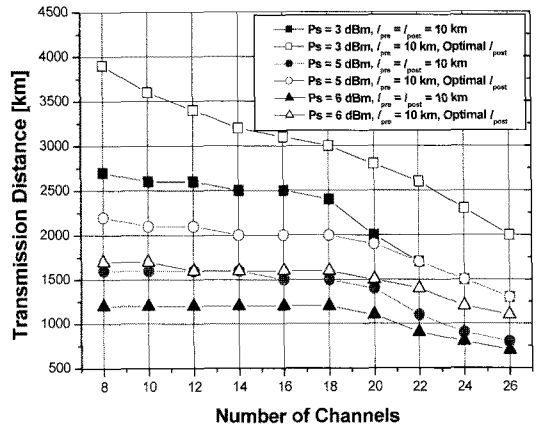


그림 3. $l_{pre} = l_{post} = 10$ km로 설계된 WDM 시스템과 $l_{pre} = 10$ km에서 l_{post} 가 최적으로 설계된 WDM 시스템의 채널 수에 따른 유효 전송 거리
Fig. 3. Effective transmission distance depending on number of channels in WDM system with $l_{pre} = l_{post} = 10$ km, and WDM system with $l_{pre} = 10$ km and optimal l_{post} .

그림 3은 고려하는 모든 전송 용량에 대한 전송 거리에 따른 최악 채널의 EOP를 얻은 후 그 중 1 dB EOP가 되는 유효 전송 거리를 정리한 것이다. 전송 링크에 DM을 적용하는데 있어 단순히 l_{pre} 와 l_{post} 를 모두 10 km로 설정하는 경우에 비해 l_{post} 만이라도 전송 용량에 관계해 최적화하면 유효 전송 거리가 증가되는 것을 알 수 있다. P_s 가 3 dBm인 채널들의 전송에서 l_{pre} 와 l_{post} 가 모두 10 km로 설정된 경우에 대한 l_{post} 만 최적으로 결정된 경우의 유효 전송 거리 신장 정도는 700 ~ 1,200 km인 반면 P_s 가 6 dBm인 채널들의 전송에서는 400 ~ 500 km로 채널들의 입사 전력이 작을수록 후치 보상량의 최적화를 통한 전송 거리 신장 효과가 커지는 것을 알 수 있다. 그림 3의 결과 중 동일한 입사 전력에서 전송 용량, 즉 채널 수가 변해도 유효 전송 거리가 변하지 않는 결과 (즉 예를 들어 $P_s = 5$ dBm에서 $l_{pre} = 10$ km이고 l_{post} 만을 최적화시킨 경우 채널 수가 14, 16, 18 세 경우의 유효 전송 거리는 모두 2,000 km로 늘어났다)는 본 논문에서 살펴보는 전송 링크의 구조가 OPC를 중심으로 50 km의 SMF 링크 구획 2개 단위로 대칭되게 설계되어 결국 100 km 단위로 유효 전송 거리가 구분되기 때문이다. 즉 14 채널

전송 시 유효 전송 거리가 18 채널 전송에 비해 길었지만 이 두 경우의 유효 전송 거리 편차가 100 km가 안 되었기 때문에 그림 3에서 같은 값으로 나타난 것이다.

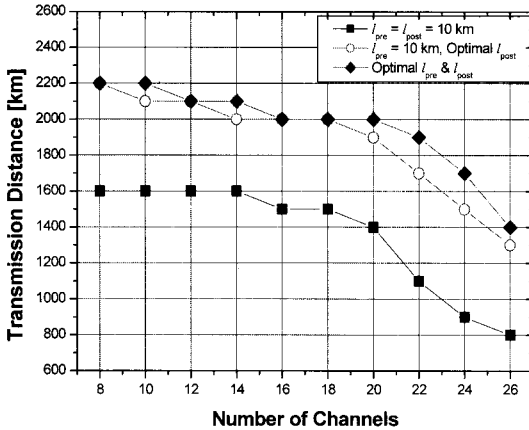


그림 4. $l_{pre} = l_{post} = 10$ km로 설계된 WDM 시스템, $l_{pre} = 10$ km에서 l_{post} 가 최적으로 설계된 WDM 시스템과 l_{pre} 와 l_{post} 가 모두 최적으로 설계된 WDM 시스템의 채널 수에 따른 유효 전송 거리
Fig. 4. Effective transmission distance depending on number of channels in WDM system with $l_{pre} = l_{post} = 10$ km, WDM system with $l_{pre} = 10$ km and optimal l_{post} , and WDM system with optimal l_{pre} and l_{post} .

그림 4는 $P_s = 5$ dBm의 채널 전송 시 선치와 후치 보상량을 최적화 (즉 l_{pre} 와 l_{post} 의 최적화)한 경우에서의 전송 용량에 따른 유효 전송 거리를 $NRD = 0$ ps/nm인 경우와 후치 보상량만을 최적화한 경우에서의 전송 용량에 따른 유효 전송 거리와 비교한 것이다. 앞선 결과, 즉 그림 3으로부터 예상할 수 있듯이 후치 보상량만을 최적화한 경우에 비해 선치와 후치 보상량 모두를 최적화하여 적용하면 전송 용량에 따른 유효 전송 거리가 더욱 신장되는 것을 알 수 있다. 선치와 후치 보상량의 최적화를 통한 유효 전송 거리의 신장은 WDM 전송 용량이 큰 경우 (즉 20 채널 전송 이상)에서 더욱 뚜렷하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

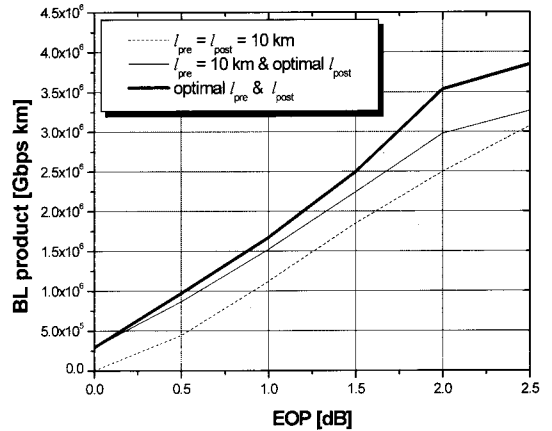


그림 5. $l_{pre} = l_{post} = 10$ km로 설계된 WDM 시스템과 $l_{pre} = 10$ km에서 l_{post} 가 최적으로 설계된 WDM 시스템의 EOP에 따른 비트율 전송 거리 곱
Fig. 5. Product of bit rate and transmission length depending on EOP in WDM system with $l_{pre} = l_{post} = 10$ km, and WDM system with $l_{pre} = 10$ km and optimal l_{post} .

그림 5는 l_{pre} 와 l_{post} 가 모두 10 km로 설정된 경우, 후치 보상량만 최적으로 설정된 경우, 그리고 선치와 후치 보상량 모두 최적으로 설정된 경우 P_s 가 5 dBm인 전송 품질이 최상인 채널의 비트율 전송 거리 곱 (BL product; product of bit rate and transmission length)을 EOP에 따라 나타낸 것이다. 수신 신호의 EOP의 성능 기준을 1 dB로 한다면 l_{pre} 와 l_{post} 가 모두 10 km로 설정된 $NRD = 0$ ps/nm의 시스템에서 BL product는 1,120,000 Gbps·m로 이는 26 채널, 즉 1.04 Tbps의 전송 용량으로 최대 1,100 km까지, 후치 보상량만 최적으로 설계된 시스템에서는 1,520,000 Gbps·m로 동일한 전송 용량을 1,400 km까지 전송 가능한 반면 선치와 후치 보상량 모두를 최적으로 설계한 시스템에서는 1,672,000 Gbps·m로 동일한 전송 용량을 1,600 km까지 전송할 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

4.2. 1 Tbps WDM 시스템의 설계 기준

V. 결 론

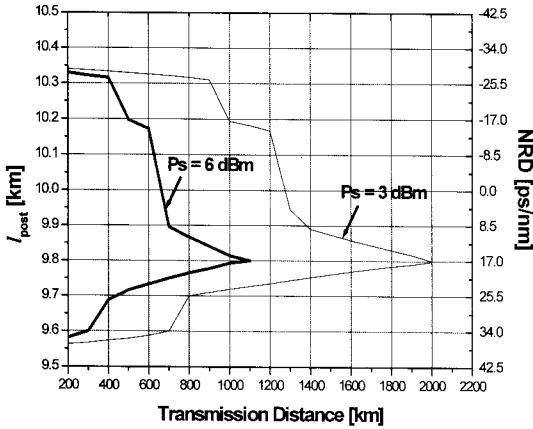


그림 6. 1 Tbps WDM 시스템에서 유효 전송 거리에 따른 l_{post} 와 NRD의 범위

Fig. 6. Range of l_{post} and NRD depending on effective transmission distance in 1 Tbps WDM system.

그림 6은 1 Tbps, 즉 26×40 Gbps WDM 전송 시스템에서 NRD를 후치 보상량으로만 결정하는 경우, 즉 $l_{pre} = 10$ km로 고정하고 l_{post} 에만 변화를 준 경우 1 dB EOP를 얻을 수 있는 l_{post} 의 범위와 NRD의 범위를 전송 거리와 채널의 입사 전력에 따라 나타낸 것이다. 우선 l_{post} 가 9.8 km로 설정되면 (이 경우 NRD는 +17 ps/nm) 3 dBm과 6 dBm의 입사 전력 모두 1 Tbps WDM 시스템의 유효 전송 거리를 최대화할 수 있는 것을 알 수 있다. 그리고 시스템의 유효 전송 거리를 늘릴수록 NRD의 설계 범위가 줄어들어야 하고, 더욱이 유효 전송 거리가 긴 시스템에서의 NRD는 양의 값으로만 결정되어야 하는 것을 알 수 있다. 즉 예를 들어, $P_s = 3$ dBm의 WDM 전송에서 유효 전송 거리를 1,200 km로 하고자 하는 경우 NRD 범위는 -14 ~ +22.5 ps/nm이어야 하는 반면 1,600 km로 하고자 하는 경우의 NRD 범위는 +12 ~ +19.6 ps/nm이어야 한다.

지금까지 OPC와 inline DM이 채택된 40 Gbps 기반 WDM 전송 시스템에서 전송 거리에 따라 NRD를 최적화하여 시스템의 유효 전송 거리, 즉 비트율과 전송 거리의 곱이 개선되는 것을 살펴보았다. NRD = 0 ps/nm로 고정된 시스템에 비해 후치 보상량만으로도 유효 전송 거리를 신장할 수 있어서 비교적 간단한 시스템 구조로 비트율 전송 거리 곱을 늘릴 수 있다는 것을 확인하였다. 또한 전송 용량이 큰 시스템에서의 유효 전송 거리의 개선은 선치와 후치 보상량을 동시에 제어해 얻는 NRD의 최적화가 더욱 효과적임을 알 수 있었다.

그리고 본 논문에서는 1 Tbps WDM 전송에서 l_{pre} 를 10 km로 고정한 경우 1 dB EOP를 얻을 수 있는 l_{post} 의 범위와 NRD의 범위를 전송 거리와 채널의 입사 전력에 따라 살펴보았다. $l_{pre} = 10$ km, $l_{post} = 9.8$ km로 설정되면 시스템의 유효 전송 거리가 최대가 되는 것을 확인하였고, 시스템의 유효 전송 거리를 늘릴수록 NRD의 범위가 양의 좁은 값으로만 결정되어야 하는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] A. Hasegawa, Y. Kodama, and A. Maruta, "Recent progress in dispersion-managed soliton transmission technologies," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 3, pp. 197 - 213, July 1997.
- [2] C. Caspar, H.-M. Foisel, A. Gladisch, N. Hanik, F. Küppers, R. Ludwig, A. Mattheus, W. Pieper, B. Strebel, and H. G. Weber, "RZ versus NRZ modulation format for dispersion compensated SMF-based 10-Gb/s transmission with more than 100-km amplifier spacing," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, no. 11, pp. 481 - 483, Apr. 1999.
- [3] R. Ludwig, U. Feiste, E. Dietrich, H. G. Weber, D. Breuer, M. Martin, and F. Kueppers, "Experimental comparisons of 40 Gbit/s RZ and NRZ transmission over standard single mode fiber", *Electron. Lett.*, vol. 35, no. 25, pp. 2216~1128, 1999.

[4] A. Yariv, D. Fekete, and D. M. Pepper, "Compensation for channel dispersion by nonlinear optical phase conjugation", *Opt. Lett.*, vol. 4, pp 52 ~ 54, 1979.

[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] 이성렬, "Inline 분산 제어 광전송 링크에서 전체 잉여 분산", 한국항행학회논문지 제 12권 4호, pp. 311 ~ 316, 2008.

[7] 이성렬, 임황빈, "WDM(24x40 Gbps) 전송에서 광 위상 공액기와 분산 제어 기술을 이용한 성능 개선", 한국통신학회논문지 제 33권 10호, pp. 855 ~ 864, 2008.

[8] ITU Recommendation "Spectral grids for WDM applications : DWDM frequency grid"G.694.1, 2006.

[9] 이성렬, "WDM 채널수에 따른 최적의 OPC 위치 및 광섬유 분산 계수", 한국항행학회논문지 제 11권 2호, pp. 177 ~ 186, 2007.

[10] G. P. Agrawal, *Fiber-optic communication systems*, John Wiley & Sons, Inc., 2002.

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



조성언(Sung-Eon Cho)

1989년 2월: 한국항공대학교
통신정보공학과 (공학사)
1991년 2월: 한국항공대학교
대학원 통신정보공학과
(공학석사)

1997년 2월: 한국항공대학교 대학원 전자공학과
(공학박사)
1997년 3월 ~ 현재: 국립 순천대학교 정보통신공학부
교수

※ 관심분야: Wireless 통신, 환경 전자공학, 광통신

저자소개



이성렬(Seong-Real Lee)

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

2002년 2월 한국항공대학교 대학원 통신정보공학과
(공학박사)

2002년 6월 ~ 2004년 2월 (주)에이티엔 기술연구소장
2004년 3월 ~ 현재 국립목포해양대학교 해양전자통신
공학부 조교수

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