

1 Tbps WDM 전송 시스템의 전송 거리 신장

Increase of Transmission Distance in 1 Tbps WDM Transmission System

이성렬*

Seong-Real Lee*

요 약

Inline 분산 제어(DM; dispersion management)과 광 위상 공액기(OPC; optical phase conjugator)를 갖는 광 전송 링크 구조가 적용된 1 Tbps WDM 전송 시스템의 구현 가능성과 전송 거리 신장 정도를 연구하였다. 본 논문에서 제안하는 광 전송 링크 구조를 26 × 40 Gbps WDM 전송 시스템에 적용하고 전송 거리에 의존하는 전체 잉여 분산(NRD; net residual dispersion)를 결정한 경우 유효 전송 거리가 $NRD = 0$ ps/nm인 경우에 비해 매우 신장되는 것을 확인하였다. 또한 전송 거리와 WDM 채널의 입사 전력에 의존하는 precompensation과 postcompensation의 유효 범위를 도출하는 방법으로 inline DM의 광 전송 링크의 설계 기준을 제시하였다.

Abstract

The implementation possibility and increasement of transmission distance of 1 Tbps WDM transmission systems through the applying optical link configuration with inline dispersion management (DM) and optical phase conjugator (OPC) is investigated. When the considered optical link configuration is applied into 26 × 40 Gbps WDM transmission system and the optimal net residual dispersions (NRDs) depending on transmission length are decided, the effective transmission distance is highly increased than that resulted in same system with fixed 0 ps/nm NRD in all transmission length. And, design rule of inline DM optical link is also shown through inducing the effective range of precompensation and postcompensation depending on transmission distance and launching power of WDM channel.

Key words : Dispersion management, OPC, Net residual dispersion, Effective residual dispersion range, pre(post)compensation, Dispersion compensating fiber.

I. 서 론

광통신 네트워크에서 WDM 채널수와 채널 당 비트율은 전송 용량을 결정하는 중요 요소이다. 채널 당 10 Gbps는 현재 대륙간 전송 시스템에서 구현되

어 있고, 채널 당 40 Gbps의 전송 속도는 빠른 시일 내에 설치될 예정이다. 또한 차세대 시간 분할 다중화 시스템에서 160 Gbps도 현재 활발히 연구되고 있다[1]-[3].

시스템 소요 비용뿐만 아니라 전송 품질 면에서

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

- 제1저자 (First Author) : 이성렬
- 투고일자 : 2009년 6월 17일
- 심사(수정)일자 : 2009년 6월 19일 (수정일자 : 2009년 7월 3일)
- 게재일자 : 2009년 8월 30일

광섬유의 선택은 매우 중요하다. 분산과 비선형 효과의 상호 작용이 전송 성능에 매우 큰 영향을 끼치기 때문에 시스템 구조와 관련해 적당한 크기의 분산을 갖는 광섬유의 선택을 통해 시스템을 최적화하여야 한다. 1,550 nm 파장에서 영(zero) 분산을 갖는 분산 천이 광섬유(DSF; dispersion shifted fiber)는 4-광파 혼합(FWM; four-wave mixing)에 의한 성능 저하가 매우 크기 때문에 WDM 전송용으로 적당하지 않다. 반면 비 영 분산 천이 광섬유(NZ-DSF; non zero - DSF)는 분산 계수가 2-10 ps/nm/km이기 때문에 분산 보상을 적용하는데 유리하고 따라서 WDM에 적합하다. 그리고 단일 모드 광섬유(SMF; single mode fiber)는 분산 계수가 16 ps/nm/km에서 17 ps/nm/km로 비교적 크지만 분산 보상 기법이 채택되면 WDM 전송용으로 사용할 수 있다.

현재 광통신 네트워크에서 가장 대표적인 분산 보상 기술은 분산 제어(DM; dispersion management)이다. DM은 SMF나 NZ-DSF와 반대 특성을 갖는 분산 보상 광섬유(DCF; dispersion compensating fiber)나 분산 보상 모듈(DCM; dispersion compensating module)을 부가적으로 삽입 또는 추가하여 precompensation량이나 postcompensation량, 광전송 구획 당 잉여 분산량(RDPS; residual dispersion per span), 전체 잉여 분산량(NRD; net residual dispersion) 등을 시스템 구조에 맞게 선택하고 적용하는 기술이다[4]. RDPS는 SMF나 NZ-DSF의 일정, 또는 가변 간격(이를 전송 구획이라 부른다)을 에르븀 첨가 광섬유 증폭기(EDFA; erbium-doped fiber amplifier) 등의 광섬유 증폭기에 의해 연결한 장거리 광전송 시스템에서 전송 구획 마다 적당한 길이의 DCF 링크를 추가한 inline DM 구조에서 SMF나 NZ-DSF의 한 구획과 추가된 DCF 구획에서 축적된 잉여 분산량으로 정의된다. 또한 NRD는 전송 링크 최종단, 즉 수신단에서 축적된 분산량으로 정의된다.

광전송 링크에 최적화된 DM을 적용하여 분산에 의한 신호 왜곡을 최소화시켜 광통신 네트워크의 대용량 전송이 가능하지만, 전송 용량의 좀 더 나은 증대를 위해 채널 간격을 100 GHz 이하로 줄이게 되면 Kerr 효과에 의한 비선형 현상이 증가되어 시스템 성능이 저하하게 된다. 또한 시스템의 전송 거리를 늘

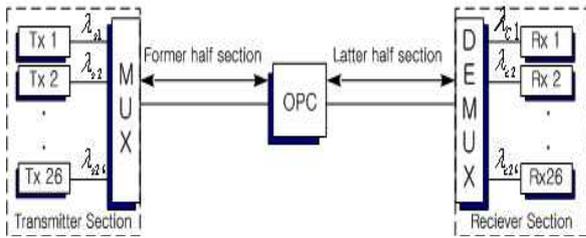
리기 위해 광 전송 링크에서 더욱 많은 EDFA를 사용하게 되면 광 신호 전력이 EDFA 수에 비례해 증가하고, 증가된 신호 전력은 비선형 현상을 증가시켜 신호 품질을 더욱 저하시킨다.

각 채널의 비트율이 40 Gbps이고 채널 간격이 100 GHz (즉 0.8 nm)인 WDM 시스템의 전송 링크에 최적화된 DM을 적용하여 분산을 보상하면서 동시에 비선형 현상에 의한 신호 왜곡은 전체 전송로 중간에 광 위상 공액기(OPC; optical phase conjugator)를 통해 보상하는 기술을 적용하면 시스템 성능이 개선되는 것을 그동안의 연구들을 통해 확인하였다[5],[6]. 특히 광전송 링크에 OPC를 적용할 때 본질적으로 발생하는 OPC를 중심으로 한 광 전력의 비대칭 분포에 의한 비선형성 보상의 한계를 시스템 구조에 따르는 최적화된 DM 기술의 적용을 통해 완화시킬 수 있다는 것을 확인하였다.

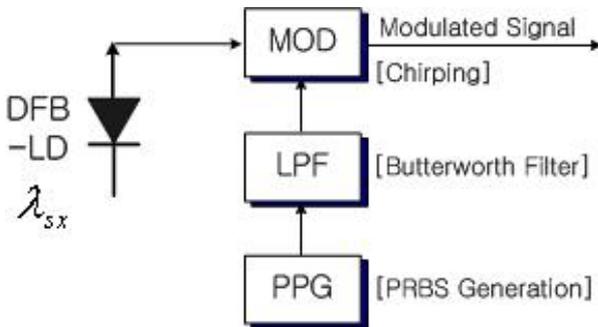
본 논문에서는 DM과 OPC를 적용한 1 Tbps급(26 채널 × 40 Gbps) WDM 전송 시스템에서 DM의 최적화, 즉 precompensation량, postcompensation량과 NRD의 최적화를 통해 신장시킬 수 있는 유효 전송 거리의 정도를 연구해 보고, 시스템의 전송 거리별 유효 precompensation량과 postcompensation량의 범위 도출을 통한 DM 설계 기준을 제시해보도록 하겠다. 1 Tbps급 WDM 전송 시스템의 주 전송로는 현재 가장 많이 설치되어 사용되는 분산 계수가 17 ps/nm/km인 SMF로 가정하였다.

본 연구에서 사용한 DM은 RDPS가 0 ps/nm로 설계된 간단한 구조의 inline DM으로 시스템의 NRD는 precompensation과 postcompensation량에 의해서만 제어되도록 하였다. WDM 채널의 변조 파형 형식은 듀티 사이클이 0.5인 RZ로 가정하였고, 이들 26개 RZ 채널 신호들의 수치 해석은 손실과 비선형 효과가 지배하는 광섬유를 따라 진행되는 광 펄스의 전파 방정식인 비선형 슈뢰딩거 방정식(NLSE; nonlinear Schrödinger equation)을 단계 분할 푸리에(SSF; split-step Fourier) 기법을 이용하여 선형적으로 풀어 수행하였다[7].

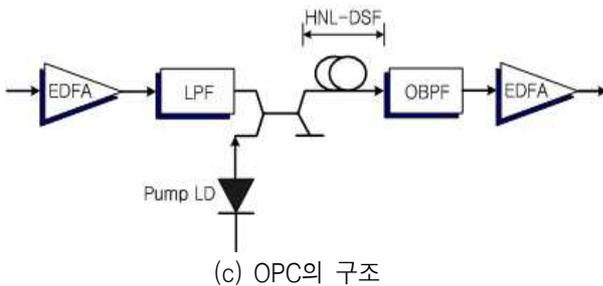
II. WDM 전송 시스템의 구성



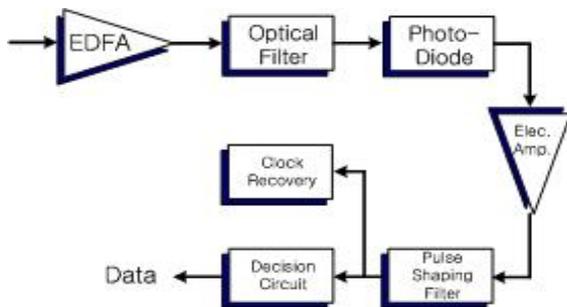
(a) WDM 전송 시스템의 전체 구성



(b) 송신기의 구조



(c) OPC의 구조



(d) 수신기의 구조

그림 1. WDM 전송 시스템의 구조

Fig. 1. The configuration of WDM transmission system.

본 논문에서 고찰하는 WDM 전송 시스템의 전반적인 구성은 그림 1(a)와 같이 송신부(transmitter section), 수신부(receiver section), 그리고 이들 사이를 연결하는 전송 링크로 구성되는데, 전체 전송 링크

는 송신부부터 중간에 위치한 OPC까지를 전반 구간 (former half section)과 OPC부터 수신부까지의 후반 구간 (latter half section)으로 나뉜다. 송신부는 병렬로 연결된 그림 1(b)의 송신기(Tx) 26개와 다중화기(MUX)로 구성된다. 그림 1(b)의 26개 분포 케환 레이저(DFB-LD; distributed feedback laser diode)의 파장들 $\lambda_{s,x}$ ($x=1, 2, 3, \dots, 26$)은 각각 1,500 nm부터 100 GHz 간격으로 1,570 nm까지 할당하였다. PPG(pseudo random pulse generator)는 서로 독립적으로 40 Gbps의 128(=2⁷) PRBS(pseudo random bit sequence)를 발생시키고 PRBS에 따라 변조기는 소광비 (extinction ratio)가 10 dB인 RZ 형식의 2차 수퍼 가우시안 펄스를 강도 변조 (IM; intensity modulation) 방식에 따라 생성시키는 것으로 모델링 하였다. 26개의 각기 다른 파장을 갖는 RZ 신호들은 MUX에서 다중화된 후 광 전송 링크로 전송된다.

그림 1(c)는 HNL-DSF (highly nonlinearity - dispersion shifted fiber)를 이용한 OPC의 구조를 나타낸 것이다. 전반 구간을 전파해 OPC에 입력된 다중화된 신호는 첫 번째 EDFA에 의해 증폭되고, 펌프 레이저에 의해 생성된 광 신호와 결합된다. 결합된 광파들은 HNL-DSF에서 4-광파 혼합 (FWM; four-wave mixing) 현상을 통해 공액파를 생성시킨다. 이렇게 얻어진 위상 공액파는 대역 통과 필터 (OBPF; optical band pass filter)에 의해 특정 대역으로 여파되고, EDFA에 의해 증폭된 후 후반 구간으로 전송된다. HNL-DSF의 손실 계수는 0.61 dB/km, 비선형 계수는 20.4 W-1km-1, 길이는 0.7 km, 영 분산 파장은 1550.0 nm, 분산 기울기 (dispersion slope)는 0.032 ps/nm²/km로 가정하였다. 그리고 펌프 광 전력 파장은 각각 18.5 dBm과 1549.5 nm로 가정하였다.

후반 구간을 전파한 공액파는 우선 수신부의 역다중화기(DeMUX)에서 각 채널별로 분리된다. 분리된 각 채널들은 그림 1(d)의 직접 검파 (DD; direct detection) 방식의 수신기(Rx)에 입력되어 데이터로 복원된다. 전치 증폭기 (EDFA)의 잡음 지수 (noise figure)는 5 dB으로, 광 필터의 대역폭은 1 nm 로, 포토 다이오드는 PIN 다이오드로, 펄스 정형 필터는 버터워스 필터로 모델링하였다[8]. 그리고 수신 대역폭은 0.65 x 비트율로 가정하였다.

III. inline 분산 제어 전송 링크

그림 2는 광 전송 링크의 구조 (위 그림)와 분산 맵 (dispersion map, 아래 그림)을 나타낸 것이다. 전체적인 분산 분포가 OPC를 중심으로 대칭이 되도록 전반 전송 구간에서는 DCF 전송 구획 + SMF의 전송 구획 (이를 전송 세그먼트, segment라고 정의), 반면 후반 전송 구간에서는 SMF 전송 구획 + DCF 전송 구획의 구조로 설계하였다. 세그먼트의 수는 전체 전송 거리에 따라 가변하도록 하였다. 즉 전체 전송 거리의 변화는 그림 2에서 m 값의 변화에 따라 수행 되도록 하였다.

각 세그먼트에서 SMF 구획의 길이 l_{SMF} 는 모두 50 km로 고정하였고, 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-1km-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 세그먼트들의 DCF의 분산 계수 D_{DCF} 는 -85 ps/nm/km로, 손실 계수 α_{DCF} 는 0.4 dB/km, 비선형 계수 γ_{SMF} 는 4.83 W-1km-1(@1,550 nm)로 가정하였다. 전체적인 링크 구조의 간편한 설계를 위해 송신부 다음의 첫 번째 세그먼트 (segment 1)와 수신부 전의 마지막 세그먼트 (segment 2m) 외의 모든 세그먼트들의 RDPS가 0 ps/nm가 되도록 설계하였다. 즉 세그먼트 2부터 2m-1까지에 속한 DCF 구획의 길이 l_{DCF} 는 RDPS를 0 ps/nm로 만드는 10 km로 고정하였다. 그림 2의 분산 맵에서 이를 inline compensation으로 표

현하였고, 이 값은 고정된다.

본 논문에서 고찰하는 1 Tbps WDM 신호의 전송 거리 신장은 전송 거리별로 precompensation과 postcompensation, 그리고 NRD을 최적화하여 얻고자 한다. 이를 위해 precompensation와 postcompensation의 변화는 각각 첫 번째 세그먼트에 있는 DCF의 길이, 즉 l_{pre} 와 마지막 세그먼트에 있는 DCF의 길이, 즉 l_{post} 의 가변을 통해서 얻도록 설계하였다. 그리고 NRD는 선택된 precompensation과 postcompensation에 의해 결정된다.

동일한 조건 아래에서 WDM 신호의 성능은 전송 거리를 늘릴수록 저하되는 것을 예상할 수 있다. 따라서 전송 링크에 inline DM과 OPC의 적용으로 전송 거리 개선 정도를 평가할 기준이 필요하다. 이를 위해 유효 전송 거리를 정의하고 사용하였다. 유효 전송 거리는 수신 상태가 최악(worst)인 채널의 눈 열림 패널티 (EOP; eye opening penalty)가 1 dB가 되는 전송 거리로 정의하였다. 여기서 EOP는

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

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

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

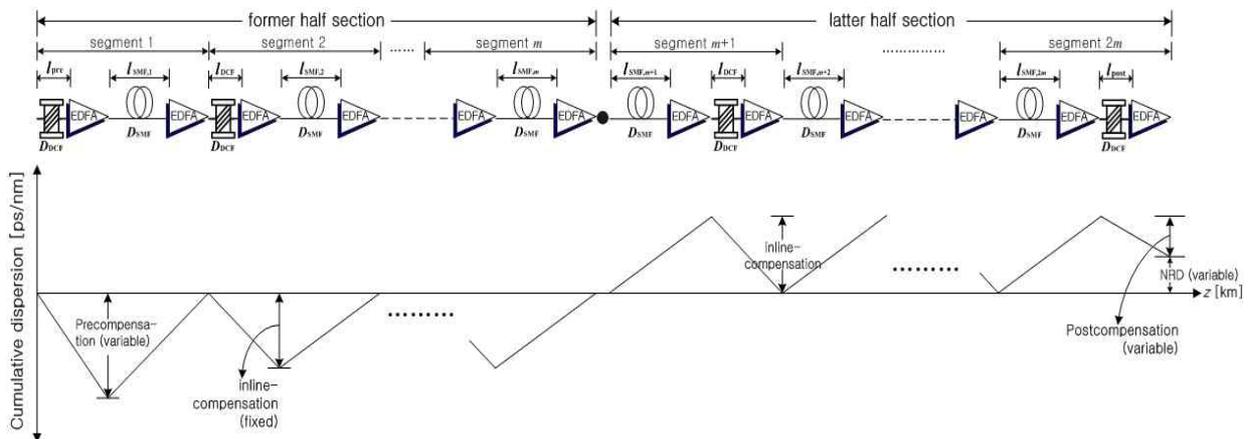


그림 2. 전송 링크 구조와 분산 맵
Fig. 2. The configuration of transmission links and dispersion map.

여기서 P_{av} 는 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

그림 3은 전송 거리가 1,500 km인 시스템에서 precompensation을 -850 ps/nm, 즉 l_{pre} 를 10 km로 고정시키고 postcompensation에 변화를 주기 위해 l_{post} 를 변화시킨 경우 26 개 채널 중 수신 성능이 최악인 채널(그림 3의 ■)과 최상인 채널(그림 3의 ○)의 EOP를 나타낸 것이다. 이 경우 26개 채널의 입사 전력은 모두 3 dBm이다. 최악 채널과 최상 채널 모두의 EOP를 가장 양호하게 만들면서 동시에 이 채널의 EOP 차이를 크게 만들지 않는 postcompensation은 precompensation과 같은 -850 ps/nm가 아닌 -841.5 ps/nm (즉 $l_{post} = 9.9$ km) 또는 -833.0 ps/nm (즉 $l_{post} = 9.8$ km)인 것을 알 수 있다. 각 경우 NRD는 각각 +8.5 ps/nm와 +17.0 ps/nm이다.

그림 3. 전송 거리가 1,500 km인 WDM 시스템에서 $l_{pre} = 10$ km인 경우 postcompensation, 즉 l_{post} 의 변화에 따른 눈 열림 패널티

Fig. 3. Eye opening penalty as a function of postcompensation, that is l_{post} , in the case of $l_{pre} = 10$ km in WDM system of 1,500 km total transmission distance.

그림 3의 결과가 의미하는 것은 시스템의 구조와 파라미터 값들에 의존하여 모든 WDM 채널들을 효과적으로 보상할 수 있는 최적 NRD가 결정되어야 한다는 것이다. 따라서 그림 2(a)에서 m을 각각 1, 2, 3, ..., 15으로 한 경우, 즉 전송 거리를 100부터 3,000 km까지 고려한 각 시스템에서 l_{pre} 와 l_{post} 를 동시에 변화시킨 경우 최악 채널이 나타내는 EOP 중 최소의 EOP 값과 이 값을 만드는 l_{pre} 와 l_{post} 를, 즉 NRD를 도출해 볼 수 있다.

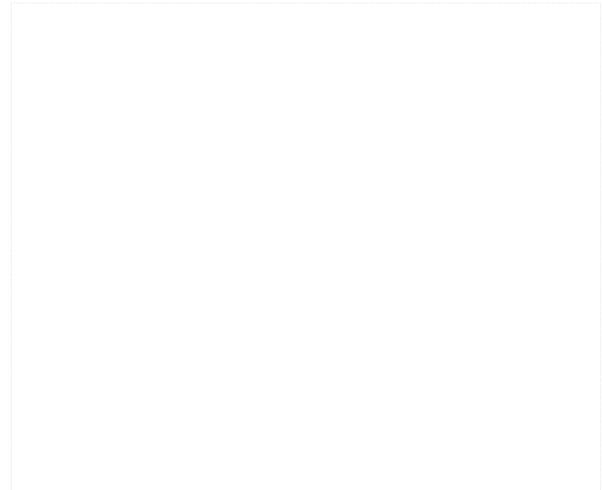


그림 4. WDM 시스템의 전송 거리에 따른 최악 채널의 EOP

Fig. 4. EOP of worst channel as a function of transmission distance of DM system.

그림 4는 최악 채널의 EOP를 최소로 만드는 l_{pre} 와 l_{post} 의 도출로 얻어지는 최적 NRD로 설계된 1 Tbps WDM 전송 시스템에서 전송 거리별 최악 채널의 최소 EOP를 NRD = 0 ps/nm, 즉, l_{pre} 와 l_{post} 가 10 km로 고정된 경우에서의 최악 채널의 EOP와 비교해 나타낸 것이다. 1 dB EOP를 수신 성능의 기준으로 한다면, NRD가 0 ps/nm로 고정된 경우 모든 채널의 입사 전력이 3 dBm과 5 dBm인 1 Tbps급 WDM 전송에서 1 dB EOP 기준 최대 전송 거리가 각각 약 1,700 km와 1,100 km인 반면, 전송 거리에 따라 최적으로 설계된 NRD가 적용된 1 Tbps WDM 전송에서는 최대 전송 거리를 각각 2,600 km와 1,700 km까지, 즉 채널 입사 전력에 따라 600 km에서 900 km까지 신장시킬 수 있는 것을 알 수 있다.

그림 4는 앞서 언급했듯이 최악 채널의 EOP 중

최소 EOP를 얻을 수 있는 최적 NRD를 전송 거리에 따라 구한 후 최적 NRD에서의 최악 채널의 최소 EOP를 전송 거리에 따라 나타낸 것이다. 그림 5는 그림 4에 나타낸 최악 채널의 최소 EOP를 얻을 수 있는 최적 NRD를 전송 거리에 따라 나타낸 것이다. 그림 5를 통해 확인할 수 있는 중요한 결과는 1 Tbps WDM 시스템의 전송 거리를 특정한 거리 이상으로 하게 되면 최적 NRD를 전송 거리에 의존하지 않고 하나의 값으로 고정시킬 수 있다는 것이다. 즉 채널 입사 전력이 3 dBm와 5 dBm인 1 Tbps WDM 전송에서 전송 거리를 각각 1,200 km와 900 km 미만으로 하게 되면 최적 NRD가 전송 거리에 따라 각기 다르게 결정되어야 하지만 WDM 전송 거리를 그 이상으로 하게 되면 전송 거리에 관계없이 두 경우 모두 NRD가 +8.5 ps/nm로 최적화되어야 하는 것을 알 수 있다.

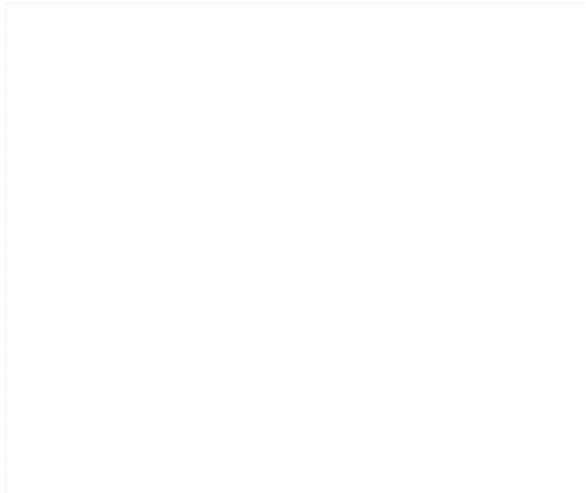
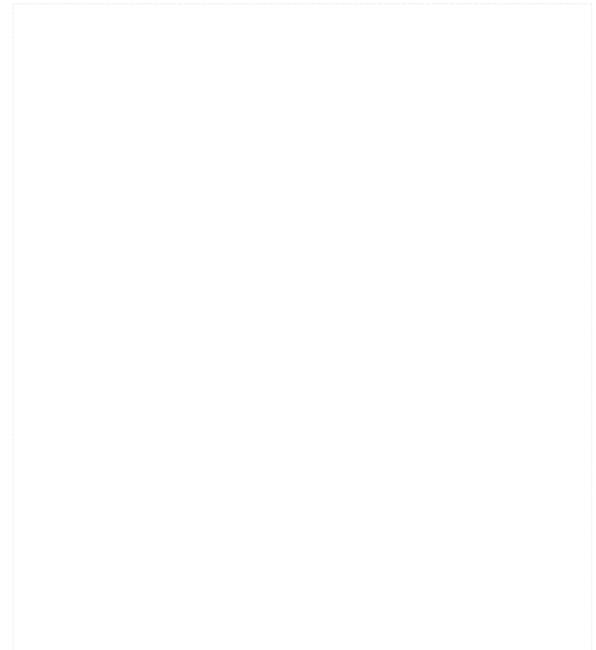


그림 5. 전송 거리별 최적 NRD

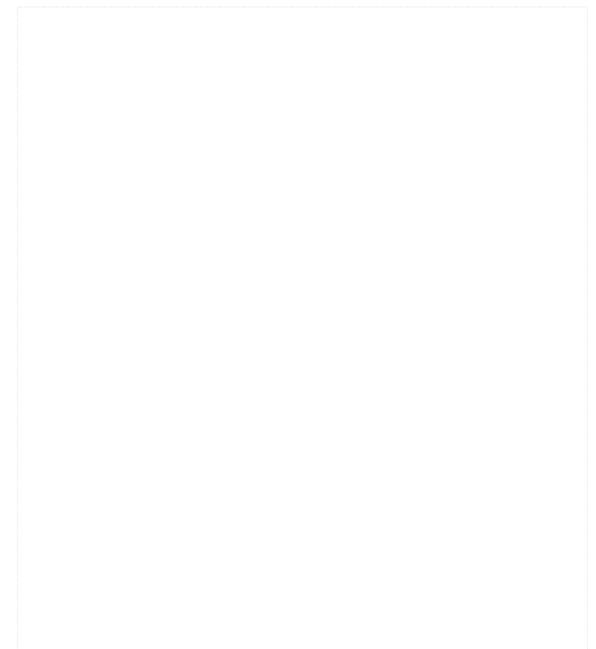
Fig. 5. Optimal NRD as a function of transmission distance.

그림 6은 1 Tbps급 WDM의 고품질 전송을 위해 그림 2의 분산 맵과 링크 구조로 구성된 전송 시스템의 설계 기준을 제시하고자 전송 거리에 따라 1 dB 이내로 EOP를 얻을 수 있는 precompensation과 postcompensation의 범위를 등고선 형태로 나타낸 것이다. 1 Tbps WDM 전송에서 채널의 입사 전력이 증가시킬수록, 총 전송 거리를 증가시킬수록 1 dB EOP를 얻을 수 있는 precompensation과 postcompensation의 범위 결정, 즉 NRD 값의 결정이 어려워지는

것을 알 수 있다. 하지만 본 논문에서 고찰한 채널 입사 전력은 3 dB 이내, 그리고 전송 거리 1,500 km 이내에서는 NRD를 0 ps/nm에 가깝게 설계하는 것이 시스템 파라미터에 크게 구애받지 않고 고품질 전송을 얻을 수 있는 방법임을 알 수 있다.



(a) 3 dBm



(b) 5 dBm

그림 6. Precompensation과 postcompensation에 의한 1 dB EOP 등고선

Fig. 6. Contour of 1 dB EOP as a function of precompensation and postcompensation.

V. 결 론

1 Tbps급 WDM 광전송을 고품질로 전송하기 위한 방법으로 SMF 전송 링크에 inline DM을 적용하고 전체 전송로 중간에 OPC를 추가로 적용한 링크 구조에서 전송 거리에 따른 NRD의 최적화로 1 dB EOP 기준 최대 전송 거리를 늘릴 수 있다는 것을 확인하였다. 전송 거리별 NRD의 최적화를 통한 전송 능력의 신장을 위해 제안한 링크 설계 방법에서 최적 NRD는 채널의 입사 전력과 관련해 특정한 거리 이상으로 시스템을 설계하는 경우 그 이상의 구체적인 전송 거리에 상관없는 하나의 값으로 결정되기 때문에 안정적이고 효과적 기술이라고 할 수 있다.

또한 본 논문에서는 전송 거리에 따라 1 dB 이내로 EOP를 얻을 수 있는 precompensation과 postcompensation의 범위를 도출하고 제시함으로써 1 Tbps급 WDM 신호의 고품질 전송을 위한 분산 맵 설계에 필요한 구체적 기준을 제시하였다. 따라서 본 연구에서 제안한 inline DM과 OPC를 이용한 링크 기술은 1 Tbps 이상의 WDM 전송 시스템의 간편한 구현에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] F. Buchali, W. Baumert, M. Schmidt, H. Biilow, "Dynamic Distortion Compensation in a 160 Gb/s RZ OTDM System: Adaptive 2 stage PMD Compensation", *Optical Fiber Communications Conference 2003*, Vol. 2, OFC 2003, pp. 23-28, March, 2003.

[2] T. Hirooka, T. Nakada, and A. Hasegawa, "Feasibility of Densely Dispersion Managed Soliton Transmission at 160 Gb/s", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 12, No. 6, JUNE, 2000.

[3] L. J. Richardson, W. Forysiak, and N. J. Doran, "Trans-Oceanic 160-Gb/s Single-Channel Transmission Using Short-Period Dispersion Management", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 13, No. 3, MARCH, 2001.

[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 Techno.*, Vol. 24, No. 5, MAY 2006.

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

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

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

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

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