

대용량 WDM 전송을 위한 분산 제어 광 링크 구조 설계

Design of Dispersion Managed Optical Link for Wideband WDM Transmission

이성렬*

Seong-Real Lee*

요 약

대용량 WDM 전송 시스템의 구현을 위해 중간에 광 위상 공액기 (optical phase conjugator)를 갖는 광섬유에서 축적된 분산량을 precompensation과 postcompensation으로 조절하는 분산 제어 (DM; dispersion management) 전송 링크의 설계 기준을 제시하였다. 본 논문에서 살펴본 DM 구조는 precompensation과 postcompensation가 이루어지는 위치에 따라 bi-end 형태와 concentration 형태의 두 가지이다. 전송 링크 설계 파라미터인 송신기부터 OPC까지의 구간과 OPC부터 수신기까지의 유효 잉여 분산 범위는 OPC에 대해서만 대칭되어 있으면 precompensation과 postcompensation을 수행하는 분산 보상 광섬유(DCF; dispersion compensating fiber)의 위치에 크게 의존하지 않는다는 것을 확인하였다.

Abstract

Design rule of optical transmission link consisted of dispersion management (DM) controlling accumulated dispersion in total fiber length by precompensation and postcompensation, and optical phase conjugator (OPC) positioned at mid-way are proposed. DM schemes investigated in this paper are 2 types depending on the position of precompensation and postcompensation; bi-end type and concentration type. It is confirmed that effective residual dispersion ranges, as a design parameter of optical link, of transmission section from transmitter to OPC and transmission section from OPC to receiver are independence on the positions of dispersion compensating fiber (DCF) accomplishing precompensation and postcompensation, if both DCF position is symmetry with respect to OPC.

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

I. 서 론

광섬유에 존재하는 분산(dispersion) 효과는 광 펄스의 진폭에 왜곡을 발생시켜 장거리 광전송 시스템에서 시스템 성능을 저하시킨다. 더욱이 하나의 광섬유로 파장이 다른 채널들을 동시에 전송하는

WDM 전송 시스템의 경우 분산에 의해 퍼진 각 채널의 광 펄스들이 광섬유가 갖는 비선형 효과 (nonlinear effects)에 의해 상호 간섭이 생겨 시스템 성능은 더욱 저하된다[1].

광섬유의 분산에 의한 영향을 줄일 수 있는 효과적인 방법으로 주 전송로로 사용되는 광섬유, 예를

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

· 제1저자 (First Author) : 이성렬

· 접수일자 : 2008년 5월 9일

들어 단일 모드 광섬유 (SMF; single mode fiber)나 비영 분산 천이 광섬유 (NZ-DSF; non zero - dispersion shifted fiber)에서 축적된 총 분산량을 이들과 반대부호의 분산 계수를 갖는 분산 보상 광섬유 (DCF; dispersion compensating fiber)를 전체 전송 링크의 적당한 곳에 위치시켜 줄여주거나 제거하는 분산 제어 (DM; dispersion management)가 가장 대표적이다[2].

DM이 적용된 광전송 링크의 구조는 DCF의 위치에 따라 다양하게 만들 수 있는데, DCF를 송신기 다음에만 두어, 즉 전송로 시작점에만 위치시켜 분산을 보상하는 방식을 선치 보상 (precompensation)이라고 하는 반면 DCF를 수신기 앞에만 두어, 즉 전송로의 종단점에만 위치시켜 분산을 보상하는 방식을 후치 보상 (postcompensation)이라고 한다. 그리고 에르븀 첨가 광섬유 증폭기 (EDFA; erbium-doped fiber amplifier)와 같은 광 증폭기에 의해 전송로가 구성된 경우 각 증폭기 간격, 즉 광 중계 거리 (span)에서 축적된 분산을 중계 거리마다 DCF를 두어 보상하는 인라인 보상 (inline compensation)의 구조가 있다. 광전송 링크 구성 시 이들 다양한 DM의 구조들을 하나 이상 결합하여 설계할 수 있다.

현재까지 국내외 많은 연구들을 통해 다양한 DM 구조를 갖는 전송링크의 성능 평가에 대한 수치 해석 논문들과 실험적 논문들이 발표되어 왔다[3]-[6]. DM 링크 설계와 평가를 위한 시스템 파라미터로는 선치 보상량 (또는 후치 보상량), 광 중계 거리 당 잉여 분산량 (RDPS; residual dispersion per span), 전체 잉여 분산량 (NRD; net residual dispersion) 등이 있다. RDPS는 인라인 보상이 적용된 시스템에서 각 중계 거리마다 축적된 분산량으로 정의되고, NRD는 모든 전송 링크 최종단에서 축적된 총 분산량으로 정의된다[4].

장거리 광전송 링크에 DM이 적용되었다고 하더라도 광 신호의 입사 전력이 증가할수록 앞서 언급한 광섬유의 비선형 효과가 증가하며 시스템 수신 성능을 양호하게 얻기 힘들다. 따라서 광전송 링크에 이들 비선형 효과를 제거하거나 감소시킬 수 있는 부가적인 기술이 필요하다고 할 수 있다. 비선형 효과를 감소시킬 수 있는 기술들 중에 그동안 저자는 전체 전송 링크중간에 광 위상 공액기 (OPC;

optical phase conjugator)를 적용한 기술에 대해 꾸준히 연구해 왔다. OPC와 관련하여 발표된 그동안의 연구들은 전송 링크에 DM 기술이 적용되지 않은 구조에서 OPC만으로 WDM 전송 채널들의 시스템 성능을 개선할 수 있는 방법들에 대한 것들이었다. 그러나 안타깝게도 시스템의 전송 거리가 증가하고 시스템의 채널 용량이 증가하게 되면 증가된 거리에 비례한 축적 분산량의 증가와 WDM 채널수의 증가에 따라 채널 간 중심 파장의 차이에 의한 상이한 보상 효과 때문에 OPC만으로는 고품질의 수신 성능 개선이 어렵다는 것을 확인하였다.

전송 링크에 OPC만 적용된 경우의 이러한 한계는 전체 전송로에서 축적된 분산에 의한 영향이 가장 크기 때문에 전송 링크에 DM을 적용하여 어느 정도 해결될 수 있을 것으로 판단되고, 더욱이 전송 링크에 DM만이 적용된 경우에서의 비선형 현상에 의한 성능 저하는 OPC를 통해 개선될 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 논문에서는 전체전송로 중간에 OPC를 갖는 장거리 전송 링크의 적당한 곳에 DCF를 위치시켜 총 분산량을 제어하는 DM 구조의 링크 구조에 대해 분석해 보고자 한다. 그동안 발표된 DM 관련 논문들의 결과들을 살펴보면 전체 전송 링크에 선치 보상과 후치 보상을 적용한 경우에서보다 인라인 보상을 통한 분산 제어에 선치 보상과(혹은) 후치 보상을 추가적으로 적용한 경우에서 시스템 성능이 더욱 개선되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 이러한 방식은 링크의 전체적 구조를 매우 복잡하게 만드는 단점이 있다. 본 연구에서 살펴보고자 하는 링크 구조는 DM 외에 OPC를 추가적으로 적용한 것이기 때문에 발표된 다른 연구들과는 달리 비교적 간단한 링크 구조로 광 신호의 성능 개선이 이루어지리라고 예상된다. 즉 본 연구에서는 인라인 보상 없이 선치 보상과 후치 보상을 갖는 DM 구조를 가정하였다.

이론적으로 OPC를 이용한 기술에서 분산과 광 신호의 전력이 OPC에 대해 대칭을 이루어야 효과적인 보상이 이루어진다. 이에 본 연구에서 DM 구조의 선치 보상은 송신기 다음에, 후치 보상은 수신기 전에 같은 크기의 분산 계수를 갖는 DCF를 두어 수행하는 양단형 (bi-end type)과 선치 보상은 전체 전송

링크 중간에 있는 OPC 바로 앞에, 후치 보상은 OPC 바로 다음에 같은 크기의 분산 계수를 갖는 DCF를 두어 수행하는 집약형 (concentration type)의 2 가지를 고려하여 WDM 채널들을 효과적으로 보상하여 전송하기 위한 각 DM 구조의 링크 설계 기준을 제시하고자 한다. 이러한 2 가지 DM 구조에 대한 링크 설계 기준에 관련된 연구는 처음인 것으로 알고 있다.

II. 광전송 링크의 구성

그림 1(a)와 (b)는 각각 OPC가 전체 전송 거리의 중간에 위치한 WDM 전송 시스템에서 송신기 바로 다음과 수신기 바로 앞에만 DCF를 위치시켜 축적된 전체 분산량을 보상하는 양단형 DM과 OPC 앞과 뒤에만 DCF를 두어 축적된 전체 분산량을 보상하는 집약형 DM이 적용된 시스템 구조를 나타낸 것이다. 그림 1(a)와 (b) 모두 OPC를 중심으로 송신기부터 OPC까지의 전송 구간을 전반 구간 (former half section)으로, OPC부터 수신기까지의 전송구간을 후반 구간 (latter half section)이라고 한다면, 그림 1(a)의 양단형의 DM은 우선 전반 구간에서 겪게 될 분산은 송신단 바로 다음에 있는 DCF를 통해 미리 보상시키고, 후반 구간에서 겪게 되는 분산은 수신기 바로 전에 있는 DCF를 통해 보상시키는 구조로 되어 있다. 반면 그림 1(b)의 집약형의 DM은 전반 구간에서 축적된 분산은 OPC 전에 위치한 DCF를 통

해 보상시키고, 후반 구간에서 겪게 되는 분산은 OPC 다음에 있는 DCF를 통해 보상시키는 구조로 되어 있다. 그림 1(a)와 (b) 모두 주 전송로는 NZ-DSF로 하였다. NZ-DSF에서 발생하는 손실을 보상하기 위해 EDFA로 연결된 각 증계 간격의 길이는 50 km로 하였고, 이 증계 간격이 송신기부터 OPC까지 10 개, OPC부터 수신기까지 10개, 즉 NZ-DSF에 의해 연결된 총 전송 거리는 1,000 km로 하였다. 양단형과 집약형 모두 NZ-DSF의 손실 계수 α_{NZDSF} 는 0.2 dB/km, 분산 계수 D_{NZDSF} 는 4와 6 ps/nm/km(@1,550 nm), 비선형 계수 γ_{NZDSF} 는 1.41 W-1km-1(@1,550 nm)로 가정하였다.

그림 1(a)와 (b)의 송신기(Tx)는 레이저 다이오드가 40 Gbps의 128(=2⁷) PRBS(pseudo random bit sequence)에 의해 강도 변조되는 것으로 가정하였다. 이 때 외부 광 변조기로부터 발생하는 출력 전계 강도는 10 dB의 소광비 (extinction ratio)를 갖는 RZ 형식의 2차 가우시안 펄스로 모델링하였다. 광 변조기로부터 출력되는 광 펄스는 그림 1(a)와 (b)의 광전송 링크를 통해 비선형 슈뢰딩거 방정식 (NLSE; nonlinear Schrödinger equation)에 따라 손실과 비선형성의 영향을 받으면서 수신단에 도착한다[7]. NLSE의 수치적 분석은 단계 분할 푸리에 (SSF; split-step Fourier) 기법을 이용하여 이루어졌다[7].

그림 1(a)와 (b)에서 수신기(Rx)는 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 수

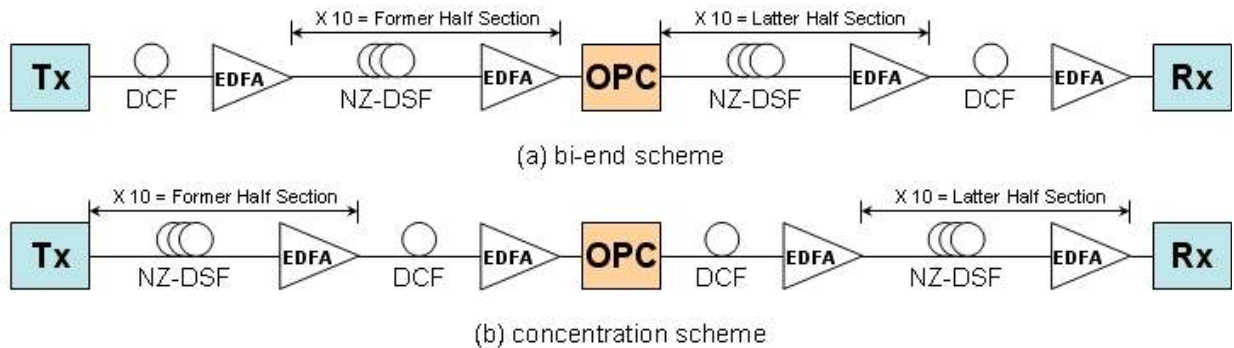


그림 1. OPC와 분산 제어 기술이 적용된 광섬유 전송 시스템의 구조

Fig. 1. The schemes of optical fiber transmission system with OPC and dispersion management.

신기로 가정하였다. 수신 대역폭은 0.65 x 비트/올로 가정하였다. 그리고 전체 전송 링크 중간에 위치한 OPC는 참고 문헌 [8]에서의 동일한 파라미터를 갖는 HNL-DSF(highly nonlinearity - dispersion shifted fiber)를 비선형 매질로 갖는 구조로 모델링하였다.

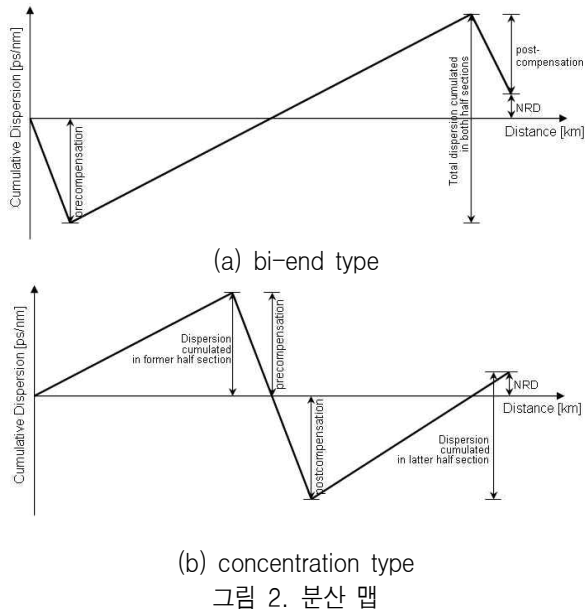


그림 2. 분산 맵
Fig. 2. Dispersion map.

그림 2(a)와 (b)는 각각 그림 1의 (a)와 (b)의 분산 맵 (dispersion map)을 나타낸 것이다. 그림 2(a)에서 선치 보상량 (precompensation)은 그림 1(a)의 구조에서 송신기 다음에 위치한 DCF의 길이에 의해 결정되는 보상 분산량이고, 후치 보상량 (postcompensation)은 그림 1(a)의 구조에서 수신기 전에 위치한 DCF의 길이에 의해 결정되는 보상 분산량이다. 반면 그림 2(b)에서 선치 보상량은 그림 1(b)의 구조에서 OPC 앞에 위치한 DCF의 길이에 의해 결정되는 보상 분산량이고, 후치 보상량은 그림 1(b)의 구조에서 OPC 다음에 위치한 DCF의 길이에 의해 결정되는 보상 분산량이다. 이 두 형태 모두 선치 보상량을 결정하는 DCF의 길이를 l_{pre} 라고 하고, 후치 보상량을 결정하는 DCF의 길이를 l_{post} 라고 하였다. 그리고 그림 1(a)와 1(b)의 DM 형태 모두 DCF의 분산 계수 D_{DCF} 는 -85 ps/nm/km(@1,550 nm)로, DCF의 손실 계수 α_{DCF} 는 0.4 dB/km, 비선형 계수 γ_{DCF} 는 4.83 W-1 km-1(@1,550 nm)로 가정하였다.

두 DM 형태 모두 동일한 파라미터의 NZ-DSF를 사용했기 때문에 각 반구간에서 축적된 총 분산량은 $D_{NZDSF}=4$ ps/nm/km인 경우 +2,000 ps/nm (=4 ps/nm/km×500 km)이고, $D_{NZDSF}=6$ ps/nm/km인 경우 +3,000 ps/nm (=6 ps/nm/km×500 km)이다. NRD는 앞서 언급했듯이 전송 링크 최종단에서 축적된 분산량으로 이 값이 0이 되려면 이론적으로 두 DM 형태 모두 D_{NZDSF} 가 4 ps/nm/km인 경우 $l_{pre}=l_{post}=23.53$ km, 6 ps/nm/km인 경우 $l_{pre}=l_{post}=35.3$ km이어야 한다.

ITU-T는 WDM 전송에서 채널 간격을 100 GHz (즉 0.8 nm)로 권고하고 있다[9]. 만일 24 채널 전송을 위한 WDM 채널들 중 첫 번째 채널의 파장을 1,550 nm로 한다면 24번째 채널은 ITU-T 권고에 따라 1,568.4 nm가 되어야 한다. 본 논문에서 제안하는 전송 링크의 설계 기준은 0.8 nm의 파장 간격을 갖는 24 채널 WDM 전송 시스템을 대상으로 하고 있다. 따라서 파장이 1,550 nm인 광 신호와 1,568.4 nm인 광 신호의 시스템 성능을 비교 분석하여 전송 링크의 설계 기준을 제시하도록 한다.

III. 광전송 링크의 성능 분석

그림 3(a)와 (b)는 각각 NZ-DSF의 분산 계수가 4와 6 ps/nm/km로 선택된 그림 1(a)의 양단형 DM이 적용된 광전송 링크에서 선치 보상량과 후치 보상량에 변화를 주기 위해 DCF의 길이, 즉 l_{pre} 와 l_{post} 를 동시에 같은 크기로 변화시켰을 때 DCF 길이에 따른 입사 전력 6 dBm인 1,550.0 nm의 광 신호와 1,568.4 nm의 광 신호의 EOP를 나타낸 것이다. 그리고 3(c)와 (d)는 각각 NZ-DSF의 분산 계수가 4와 6 ps/nm/km로 선택된 그림 1(b)의 집약형 DM이 적용된 광전송 링크에서 DCF 길이에 따른 광 신호의 EOP를 나타낸 것이다.

앞서 언급했듯이 주 전송로인 NZ-DSF의 분산 계수가 4 ps/nm/km인 경우 NRD를 0 ps/nm으로 만드는 DCF의 길이는 $l_{pre}=l_{post}=23.5$ km이고, 6 ps/nm/km인 경우 $l_{pre}=l_{post}=35.3$ km이다. 그림 3의 4 가지 경우 모두 DCF가 이 길이로 결정되면 두 광 신호의 EOP 특성이 1 dB 이하로 양호하게 얻어지는 것을 알 수

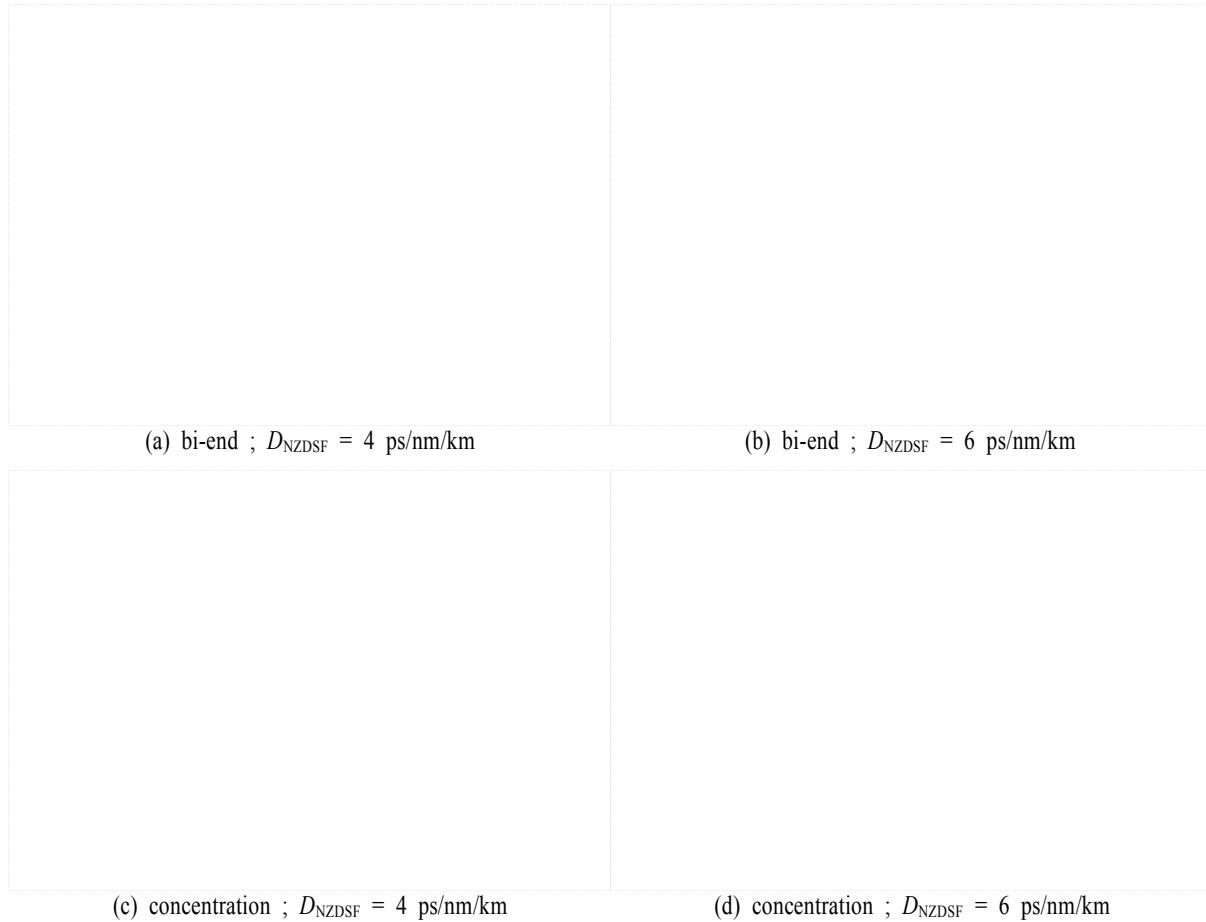


그림 3. DCF 길이에 따른 눈 열림 페널티
 Fig. 3. Eye opening penalty as a function of DCF length.

있다. NRD = 0 ps/nm의 전송 링크에서 두 광 신호의 EOP 차이가 가장 좋은, 즉 두 광 신호의 전력 페널티가 가장 양호한 경우는 $D_{NZDSF}=6$ ps/nm /km의 양단형이고, 그 다음은 $D_{NZDSF}=4$ ps/nm/km의 양단형, $D_{NZDSF}=6$ ps/nm/km의 집약형, $D_{NZDSF}=4$ ps/nm/km의 집약형인 것을 알 수 있다. 즉 전체 전송로 중간에 OPC를 두고 전체 NZ-DSF에서 축적된 분산을 DCF를 통해 0 ps/nm로 보상시키는 광전송 링크를 설계하고자 한다면 집약형보다 양단형이 수신 품질 개선 면에서 더 우수하다고 할 수 있다.

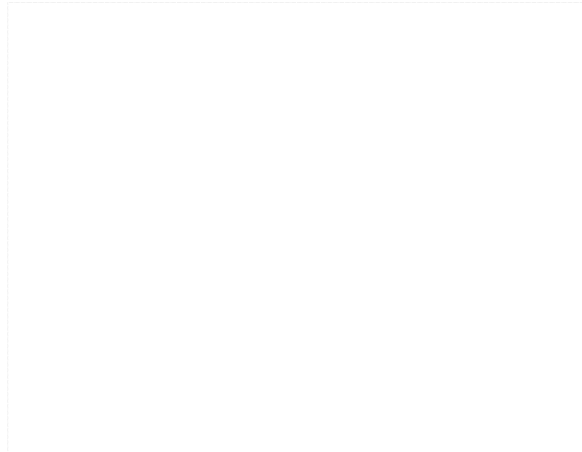
그림 3의 결과에서 보다 중요한 것은 두 광 신호들의 EOP가 더욱 우수하면서 두 신호 간 EOP 차이도 거의 없게 만드는 NRD가 0 ps/nm이 아닌 곳에서도 나타난다는 것이다. 그림 3(a)를 살펴보면, $l_{pre} = l_{post}=22.4$ km와 $l_{pre}=l_{post}=25.5$ km가 이에 해당하는 경우로, $l_{pre}=l_{post}=22.4$ km는 선치 보상량(또는 후치

보상량)을 -1,904 ps/nm, NRD를 +192 ps/nm (= (4 ps/nm/km × 1,000 km) + (-85 ps/nm/km × 22.4 km × 2))로 만드는 거리이다. $l_{pre}=l_{post}=25.5$ km은 -335 ps/nm의 NRD에 상응하는 거리이다.

그림 3의 4가지 경우 모두에서 NRD가 0 ps/nm가 아닌 다른 값에서 두 광 신호의 더 우수한 성능이 나타난다는 것은 본 논문에서 제안하는 광전송 링크는 전송하는 변조 파형 형식, 광 신호의 전력, 주 전송로의 분산 계수, 증계 간격, DM의 구조 등 시스템 파라미터에 따라 NRD가 결정되어야 하고, 결정된 NRD 값과 관련하여 구체적인 링크 설계를 해야 한다는 것을 의미한다. 아울러 그림3의 경우 두 광 신호의 EOP가 다양한 l_{pre} 와 l_{post} 에서 1 dB 이내로 얻어지는 것으로부터 알 수 있듯이 만일 시스템의 성능 기준을 두 신호 중 최악의 성능을 갖는 신호의 EOP가 1 dB 이내까지라고 한다면 이 기준 이내로 성능을

유지할 수 있는 전송 링크의 설계 기준을 구할 수 있을 것이다.

IV. 광전송 링크 설계 기준



(a) bi-end type



(b) concentration type

그림 4. 잉여 분산 등고선

Fig. 4. Contour of residual dispersion.

그림 3은 선치 보상량과 후치 보상량을, 즉 l_{pre} 와 l_{post} 을 동일한 값으로 변화시키면서 얻은 결과이다. 그러나 본 논문에서 제안하는 OPC와 DM을 결합하여 시스템 성능을 개선하고자 하는 기술이 실제적 시스템에도 유효하려면 임의의 선치 보상량 (또는 후치 보상량)에 대한 최적의 후치 보상량 (또는 선치 보상량)이 결정되어야 한다. 이를 위해 본 논문에서는 OPC부터 수신기까지의 후반 구간의 후치 보상량을 임의의 값으로 고정시켜 놓고, 즉 l_{post} 을 하나의

값으로 고정시켜 놓은 상태에서 선치 보상량에 변화를 주면서, 즉 l_{pre} 에 변화를 주면서 입사 전력이 +7 dBm인 두 광 신호 중 최악의 EOP를 나타내는 신호의 1 dB EOP 범위를 구해 각각의 후치 보상량에 대한 유효 선치 보상량을 도출하였다. 그림 4의 x-축은 후반 구간의 잉여 분산으로 선택된 l_{post} 에 의해 결정되는 값이고, y-축은 최악의 광 신호의 EOP가 1 dB 가 되는 후반 구간 잉여 분산 값에 대한 전반 구간의 잉여 분산 편차이다. 그림 4(a)의 $D_{NZDSF}=4$ ps/nm/km 에서의 경우를 예로 들어 설명하면 후반 구간의 잉여 분산을 +2.5 ps/nm ($l_{post}=23.5$ km에 상응)가 되게 링크를 설계하고자 하는 경우 이에 대한 전반 구간의 유효 잉여 분산 편차는 -20.4 ps/nm부터 +24.2 ps/nm의 범위이다 (즉 전반 구간의 잉여 분산이 -17.9 ps/nm부터 +26.7 ps/nm 사이의 값이 되게 결정하면 된다). 달리 말해, $l_{post}=23.5$ km로 설정하고자 한다면 l_{pre} 는 23.2 km부터 23.8 km 사이에서 결정하면 된다. 이렇게 그림 4의 결과에 따라 NZ-DSF의 분산 계수 값과 DM의 형태에 의존하여 선치 보상량과 후치 보상량을 결정하여 링크를 설계하면 0.8 nm의 간격의 40 Gbps 전송률의 24 채널 WDM 전송 시스템의 구현이 가능할 것으로 예상된다.

그림 4의 결과를 살펴보면, 우선 NZ-DSF의 분산 계수 값과 DM의 형태에 따라 다소 차이가 있지만 각 반구간의 유효 잉여 분산 범위가 일치하는 것을 알 수 있다. 이는 NZ-DSF의 분산 계수에 따른 축적 분산량은 결국 DCF에 의해 보상되기 때문에 고려 대상에서 제외될 수 있다고 한다면 중심 파장의 차이가 심한 광 신호들의 고품질 전송을 위한 각 반구간의 유효 잉여 분산 범위는 DM 구조에 크게 의존하지 않는다는 것을 의미한다. 즉 전체 전송로 중간에 OPC를 갖는 전송 링크에서 선치 보상과 후치 보상의 위치가 크게 중요하지 않다는 것을 알 수 있다.

그러나 각 반구간의 유효 잉여 분산 범위를 엄격하게 분석하여 실제 시스템에 적용하고자 한다면 $D_{NZDSF}=6$ ps/nm/km의 집약형 DM의 링크 구조로 설계하는 것이 유효 잉여 분산 범위의 적용 면에서 가장 융통성이 있다고 할 수 있다.

V. 결 론

지금까지 채널 전송률이 40 Gbps인 WDM 채널 신호를 고품질로 전송하기 위한 전송 링크와 그 설계 기준을 살펴보았다. 전체 전송로 중간에 OPC를 두고 송신기부터 OPC까지의 전반 구간에서의 선치 보상과 OPC부터 수신기까지의 후반 구간에서의 후치 보상을 수행하는 구조에서 전송 링크 설계의 주요 파라미터인 각 반구간의 유효 잉여 분산 범위는 선치 보상과 후치 보상을 결정하는 DCF의 위치에 크게 의존하지 않는 것을 확인하였다. 이는 본 논문에서 제안한 집중형 (lumped) DM을 OPC와 결합하는데 있어 두 DCF의 위치가 OPC를 중심으로 서로 대칭만 이루어면 위치의 선택에 구애받지 않는 링크 설계의 간편성을 제공한다는 것을 의미한다.

본 논문에서 제안한 전송 링크의 성능 평가와 설계 기준 도출 시 RZ 외의 다양한 변조 파형 형식에 대한 고찰, 다양한 입사 전력에서의 고찰, Q-factor 등의 다른 성능 파라미터에 대한 분석 등은 미처 다루지 못했다. 그러나 본 논문에서 살펴본 전송 링크 구조에서 제안하고 있는 링크 설계 기준의 도출 방법은 특정 시스템 파라미터와 성능 기준 값에 크게 영향 받지 않기 때문에 선택된 시스템 파라미터와 성능 기준 값에 따라 그 구체적인 설계 기준에 다소 변화가 있음을 예상할 뿐 광전송 시스템 구현에서 그 기술적 역할과 의미는 중요하다고 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] L. Grüner-Nielsen, et al., "Dispersion-Compensating Fibers", *J. Lightwave Technol.*, Vol. 23, No. 11, pp. 3566~3578, 2005
- [3] A. Färbert, 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.

- [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] Y. Frignaca and S. Bigo, "Numerical optimization of residual dispersion in dispersion-managed systems at 40 Gb/s," in *Proc. OFC, Baltimore, MD*, 2000, pp. 48-50.
- [6] A. Bertaina, S. Bigo, C. Francia, S. Gauchard, J.-P. Hamaide, and M. W. Chbat, "Experimental investigation of dispersion management for an 8 × 10-Gb/s WDM transmission system over nonzero dispersion shifted fiber," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, no. 8, pp. 1045-1047, Aug. 1999.
- [7] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, 2001.
- [8] 이성렬, "WDM 채널수에 따른 최적의 OPC 위치 및 광섬유 분산 계수", *한국항공학회논문지* 제 11권 2호, pp. 177~186, 2007.
- [9] ITU Recommendation "Spectral grids for WDM applications : DWDM frequency grid" G.694.1, 2006.

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, 광솔리톤 전송