

집중형 분산 제어 WDM 전송 시스템에서 Mid-Span Spectral Inversion 기술

정희원 이 성 렬*

Mid-Span Spectral Inversion Technique in Lumped Dispersion Managed WDM Transmission Systems

Seong-Real Lee* *Regular Member*

요 약

본 논문에서는 광섬유에서 발생하는 그룹 속도 분산과 비선형 효과에 의한 왜곡을 보상하기 위해 적용하는 MSSI(Mid-Span Spectral Inversion)에서 광 위상 공액기(OPC; optical phase conjugator)를 중심으로 광 전력의 비대칭화 때문에 나타나는 기술적 한계를 부가적으로 집중형 분산 제어(DM; dispersion management) 기술을 결합시켜 극복할 수 있다는 것을 고찰하였다. 본 연구에서 고려한 집중형 DM은 송신단 바로 다음과 수신단 바로 앞에만 분산 보상 광섬유(DCF; dispersion compensating fiber)를 두는 구조(구조 A)와 전체 전송 링크 중간에 위치한 OPC의 바로 전후에 DCF를 두는 구조(구조 B)로 나누어 각 경우에 대해 전송 성능 개선 정도를 비교하였다. 분석 결과 MSSI에 구조 A의 집중형 DM이 결합된 경우가 구조 B가 결합된 경우에 비해 전송 성능을 크게 개선하는 것을 확인하였다. 본 논문에서 고려한 2가지 구조 모두 비선형 현상 중 자기 위상 변조(SPM; self phase modulation)에 의해 성능이 제한되는 WDM 시스템에서 총 전송 링크의 전체 잉여 분산량(NRD; net residual dispersion)이 양의 값으로 결정되어야 모든 채널에 대해 최상의 성능을 얻을 수 있다는 것을 확인하였다.

Key Words : Lumped dispersion management, MSSI, Optical Phase Conjugator, Dispersion compensating fiber, Net residual dispersion

ABSTRACT

In this paper, it is investigated that the limitation due to the asymmetry of optical power with respect to optical phase conjugator (OPC) in mid-span spectral inversion (MSSI) for compensating optical signal distortion due to group velocity dispersion (GVD) and nonlinearities generated in fiber by combining with lumped dispersion management (DM) technique into MSSI. Two kinds of lumped DM configuration (configuration A and configuration B) are considered and compared each other in this research. Configuration A consists of two dispersion compensating fiber (DCF) span positioned after transmitter and before receiver, respectively. Configuration B consists of two dispersion compensating fiber (DCF) span positioned before and after OPC placed at middle of total transmission link, respectively. It is confirmed that the transmission performances are more improved by the configuration A combined with MSSI than configuration B. Also, it is confirmed that the best performance of overall channels are obtained by making net residual dispersion (NRD) to have positive value in self phase modulation (SPM)-limited WDM transmission systems, irrelevant to the configuration of DM.

* Div. of Marine Electro. and Comm. Eng., Mokpo National Maritime University (reallee@mmu.ac.kr)

논문번호 : KICS2007-09-394, 접수일자 : 2007년 9월 4일, 최종논문접수일자 : 2008년 1월 8일

I. 서 론

장거리 광전송 시스템에서 전송로를 따라 축적되는 자연 방출 잡음(ASE; accumulated spontaneous noise)은 시스템 성능을 저하시킨다. 이러한 ASE 증가에 따른 수신단에서의 신호 대 잡음비 저하를 개선해주기 위해서는 송신단에 입사되는 입력 전력을 증가시켜야 한다. 그러나 광 신호 전력이 커질수록 광섬유에서의 비선형 효과(nonlinear effects)가 증가되고, 증가된 비선형 현상이 광섬유의 그룹 속도 분산(GVD; group velocity dispersion)과 결합되어 다른 형태의 시스템 성능 저하를 일으킨다. 광섬유의 이러한 성능 저하를 감소시키기 위한 효과적인 기술들 중 하나로 주 전송로인 광섬유의 분산 계수와 다른 부호의 분산 계수를 갖는 분산 보상 광섬유(DCF; dispersion compensating fiber)를 주 전송로의 광섬유에 추가로 삽입하여 시스템 전체의 분산량을 조절하는 분산 제어(DM; dispersion management)가 있다^{[1]-[3]}.

DM은 주 전송로인 단일 모드 광섬유(SSF; single mode fiber)나 비영 분산 천이 광섬유(NZ-DSF; non zero - dispersion shifted fiber)에 DCF를 결합시키는 구조에 따라 집중형(lumped) DM과 분포형(distributed) DM으로 나뉜다. 분포형 DM은 전체 광 전송 링크를 구성하는 광 증계기(optical repeater) 마다 DCF를 결합시키는 방식으로 in-line compensation 방식이라고도 한다. 집중형 DM은 송신기 바로 다음에 전체 링크의 총 분산량에 상응하는 크기의 반대 부호의 분산 계수를 갖는 DCF를 삽입하는 precompensation과 수신기 바로 앞에 DCF를 삽입하는 postcompensation의 두 가지로 나뉘는데 시스템의 목적에 따라 이 두 방식들이 결합되기도 하고 한 방식만 단독으로 사용되기도 한다. DM이 적용된 광전송 시스템에서 성능 향상을 결정하는 주요 파라미터들로 precompensation 량, 광 증계 거리 당 잉여 분산량(RDPS; residual dispersion per span), 전체 잉여 분산량(NRD net residual dispersion) 등이 있다. RDPS는 in-line compensation이 적용된 시스템에서 한 증계 거리마다 축적된 총 분산량으로 정의되고, NRD는 집중형과 분포형 DM 모두에서 전송 링크 최종단에서 축적된 분산량으로 정의된다. 특히, 이들 중 NRD는 시스템 성능 저하에 영향을 미치는 주요 원인을 어느 정도 크기로 보상할 것인가와 긴밀한 관계가 있는 것으로 보고되고 있다^{[3]-[6]}.

광섬유의 비선형 현상과 색 분산의 결합에 의한 시스템 성능 저하를 효과적으로 줄여주기 위한 또 다른 방법으로 전체 전송로의 중간에 광 위상 공액기(OPC; optical phase conjugator)를 두어 전송되는 광 신호의 스펙트럼을 반전시켜 신호 왜곡을 보상하고자 하는 MSSI(mid-span spectral inversion) 기술이 있다^{[7]-[9]}. 이 MSSI 기술은 OPC에 대하여 GVD와 광 전력이 대칭을 이루어야 효과적인 보상을 얻을 수 있는데 광섬유에 존재하는 손실 때문에 대칭을 만들기가 매우 어렵다는 한계를 가지고 있다. 광대역 WDM 시스템 구현을 위해 이 문제를 특정한 한 파장이 아닌 모든 WDM 채널 파장들에 적용할 수 있도록 해결해야 하는 것은 더욱 큰 난제이다. 본 저자는 광대역 WDM 전송 시스템의 구현을 위해 MSSI 기술에서의 이러한 한계를 극복하기 위한 기술을 제안하였다^{[10],[11]}. 이 기술은 고려하는 WDM 채널들 중 파장이 가장 작은 채널과 가장 큰 채널을 동시에 최상으로 보상할 수 있는 최적의 OPC의 위치와 광섬유 구간의 분산 계수 값을 찾고 그 값들로 설계된 MSSI 기술을 WDM 전송 시스템에 적용하는 것으로 이루어졌다. 이 기술은 주 전송로로 분산 계수가 2 ps/nm/km인 NZ-DSF를 갖는 경우 40 Gbps의 채널 전송률을 갖는 16 채널 이하의 WDM 전송 시스템(즉 WDM 총 전송 속도 \leq 640 Gbps)에서는 1 dB의 눈 열림 패널티(EOP; eye opening penalty)를 기준으로 한 채널 간 전력 패널티를 최적 값들이 적용되지 않은 전통적 MSSI 기술을 채택한 경우에서의 4 dB로부터 1 dB 이내로 개선시킬 수 있었지만 WDM 채널의 수가 24 개 이상으로 증가한 경우(즉 WDM 총 전송 속도 \geq 960 Gbps)에 대해서는 최적 값들이 적용되더라도 채널 간 전력 패널티를 3 dB 정도까지만 감소시키는 것을 보이고 있다. 즉 이 기술을 WDM 총 전송률이 1 Tbps 급 이상의 초고속 전송 시스템에 적용하게 되면 채널 간 큰 파장 차이와 그로 인한 각 채널의 광 펄스에 미치는 GVD의 각기 다른 영향을 탄력적으로 보상할 수 없다는 기술적 한계가 있다. 이러한 결과는 MSSI를 대용량 WDM 시스템에 적용하고자 할 때 전체 분산량에 대한 제어 등 부가적 기술이 필요하다는 것을 의미한다.

따라서 본 논문에서는 MSSI 기술을 채택한 960 Gbps(= 24×40 Gbps)의 WDM 전송 시스템에 집중형 DM 기술이 부가된 경우의 성능 개선 효과를 앞선 연구에서의 최적 파라미터 값들을 갖는 MSSI 기술의 결과와 비교하여 고찰해보도록 한다. 집중형

DM 기술의 구현 방법을 우선 WDM 시스템의 송신기 바로 다음과 수신기 바로 앞에만 DCF를 적용한 구조와 전체 전송 링크 중간에 위치한 OPC의 앞과 뒤에만 DCF를 적용한 구조의 2 가지로 나누어 각 구조에 따른 WDM 채널들의 전송 성능을 비교해 보고자 한다. 아울러 24개의 모든 WDM 채널들을 효과적으로 보상할 수 있는 최적의 NRD를 2 가지 각기 다른 DM 구조별로 검토해보고자 한다.

본 논문에서 고려한 WDM 채널 신호의 변조 파형 형식은 NRZ로 하였고, WDM 링크 구성의 주 전송로는 분산 계수가 4 ps/nm/km인 NZ-DSF로 가정하였다. 그 외의 WDM 시스템 구성에 필요한 각 장치의 파라미터 값들은 앞선 연구 결과와의 비교를 위하여 선행 연구들에서와 같은 값을 선택하였다.

II. WDM 전송 시스템의 구성

광섬유의 z 방향으로 진행되는 WDM의 j-번째 채널의 포락선 A_j 는 식 (1)의 비선형 슈뢰딩거 방정식에 따라 표현되고, 식 (1)의 수치적 분석은 단계 분할 푸리에 (SSF ; split-step Fourier) 기법을 이용하여 이루어진다^[12].

$$\frac{\partial A_j}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2} A_j - \frac{i}{2} \beta_{2j} \frac{\partial^2 A_j}{\partial T^2} + \frac{1}{6} \beta_{3j} \frac{\partial^3 A_j}{\partial T^3} + i\gamma_j |A_j|^2 A_j + 2i\gamma_{jk} |A_k|^2 A_j \quad (1)$$

여기서 $j, k = 1, 2, \dots, 24(j \neq k)$, α 는 광섬유의 손실 계수, λ_j 는 j-번째 채널의 신호 파장, β_j 는 색 분산 파라미터, β_3 는 3차 색 분산 파라미터, γ_j 는 비선

형 계수, $T=t-z/v_g$ 이다. 식 (1) 우변의 마지막 두 항은 각각 비선형 효과 중 자기 위상 변조 (SPM ; self phase modulation)와 상호 위상 변조 (XPM ; cross phase modulation)를 유도한다. WDM 신호에 대한 XPM과 FWM의 영향은 WDM 시스템의 광섬유 분산 계수가 클수록 감소한다^[13]. 본 논문에서 가정한 광섬유는 NZ-DSF로 하였고, 그 분산 계수 값은 XPM에 의한 왜곡이 미미하게 나타나는 4 ps/nm/km로 하였고, 때문에 XPM의 영향은 무시하였다.

그림 1은 OPC가 전체 전송 거리의 중간에 위치한 MSSI 기술에 송신단부터 OPC까지의 광 전송 링크 전반 구간과 OPC부터 수신단까지의 광 전송 링크 후반 구간에 각각 한 span의 DCF로 전체 전송 링크의 각 구간(half section)에서 축적된 분산량을 보상하는 집중형 DM 기술이 적용된 강도 변조 / 직접 검파 (IM/DD; intensity modulation / direct detection) 방식의 WDM 전송 시스템의 전체 구성을 나타낸 것으로, 각 구간에서의 DCF 위치에 따라 구조 A와 구조 B로 구별하여 각 DM 구조가 전송 성능에 미치는 영향을 고찰해 보도록 한다. 전송 링크 전반 구간과 후반 구간을 구성하는 주 전송로는 모두 동일하게 50 km 간격의 NZ-DSF

표 1. 광섬유 파라미터 (@ 1,500 nm)

파라미터	NZ-DSF	DCF
분산 계수	$D_{NZDSF} = 4\text{ps/nm/km}$	$D_{DCF} = -70, -85, -100\text{ps/nm/km}$
손실 계수	$\alpha_{NZDSF} = 0.2\text{dB/km}$	$\alpha_{DCF} = 0.4\text{dB/km}$
비선형 계수	$\gamma_{NZDSF} = 1.41\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$	$\gamma_{DCF} = 4.83\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$
span 길이	$l = 50\text{km}$	$l_{DCF} = \text{variable}$

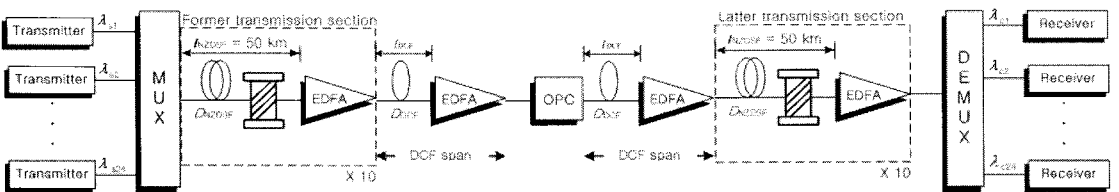
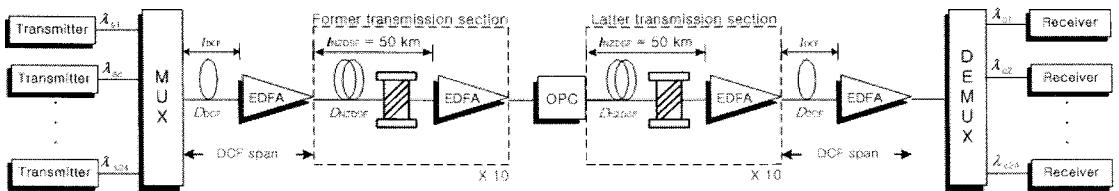


그림 1. 24×40 Gbps WDM 전송 시스템의 구조

span마다 에르븀 첨가 광섬유 증폭기 (EDFA erbium-doped fiber amplifier) 20개에 의해 연결된 것으로 하였다. NZ-DSF의 1,550 nm에 대한 분산 계수는 표 1과 같이 4 ps/nm/km로 하였기 때문에 각 구간에서 축적된 총 분산량은 2,000 ps/nm이다. 본 논문에서는 주 전송로를 구성하는 20개 span의 간격, 길이, 분산 계수가 고정되었을 때, 즉 축적된 총 분산량이 4,000 ps/nm로 고정되었을 때 각 구간에 있는 DCF에 의한 보상 분산량에 따른 WDM 채널들의 성능 변화 정도를 살펴보기 위하여 DCF의 분산 계수가 표 1과 같이 설정된 경우 각 구간에 위치한 DCF의 길이, 즉 l_{DCF} 에 변화를 주어 총 축적 분산량을 조절하도록 하였다. 이론적으로 $D_{DCF} = -70$ ps/nm/km (@ 1,550 nm)로 선택된 경우 각 구간에 축적된 2,000 ps/nm의 분산량 보상을 위한 최대 l_{DCF} 는 전체 전송 링크의 총 분산량이 0이 되는 경우에서 구할 수 있으므로 아래의 (2)에 의해^[14]

$$l_{DCF} = \frac{N_{fiber,span} (l_{NZDSF} \cdot D_{NZDSF})}{|2D_{DCF}|} \quad (2)$$

28.6 km이다. 여기서 $N_{fiber,span}$ 는 주 전송로를 구성하는 span의 개수로 본 논문에서는 20이다. 따라서 $D_{DCF} = -70$ ps/nm/km로 선택된 경우 l_{DCF} 를 1 km부터 28.6 km까지 변화를 주면서 WDM 채널의 신호 파장 차이가 가장 큰 두 채널인 1번 채널과 24번 채널의 전송 성능을 비교하여 전송 성능 변동을 가장 적게 만드는 l_{DCF} 를 찾아 MSSI 기술이 채택된 WDM 전송 시스템에서 분산 맵 (dispersion map)을 최적화하고자 한다. 이와 마찬가지로 $D_{DCF} = -85$ ps/nm/km로 선택된 경우 l_{DCF} 를 1 km부터 23.5 km까지, $D_{DCF} = -100$ ps/nm/km로 선택된 경우 l_{DCF} 를 1 km부터 20 km까지 변화를 주면서 각 경우에 대한 분산 맵을 최적화하고자 한다. 아울러 DCF 분산 계수에 따른 위의 3가지 경우에 대한 각각의 최적 분산 맵에서 NRD에 대해서도 고찰하고자 한다.

III. 선행 연구 결과 검토

본 절에서는 본 논문에서 제안하는 MSSI 기술과 최적화된 분산 맵을 갖는 집중형 DM 기술이 동시에 적용된 WDM 전송 시스템에서의 성능 개선 정

도를 비교 분석하기 위하여 우선 동일한 파라미터들로 구성된 24×40 Gbps WDM 전송 시스템에 전통적인 MSSI 기술이 적용된 경우의 24개 채널의 EOP와 참고 문헌 [10]과 [11]에서 제안된 방법에 의해 도출된 최적 OPC 위치와 각 구간의 분산 계수 값들을 갖는 MSSI 기술이 적용된 경우의 EOP를 살펴보고자 한다. EOP는

$$EOP[dB] = 10 \log_{10} (EO_{rec} / EO_{btb}) \quad (3)$$

으로 정의되고, 여기서 EO_{rec} 는 수신 신호의 눈 열림 (EO; eye opening) 정도이고 EO_{btb} 은 광섬유 전송 링크에 입사되기 전 송신 신호의 눈 열림 정도로 EO는 $2P_{av} / (P_{1,min} - P_{0,max})$ 로 정의된다. 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.

그림 2는 그림 1에서 DCF span들이 제외되고

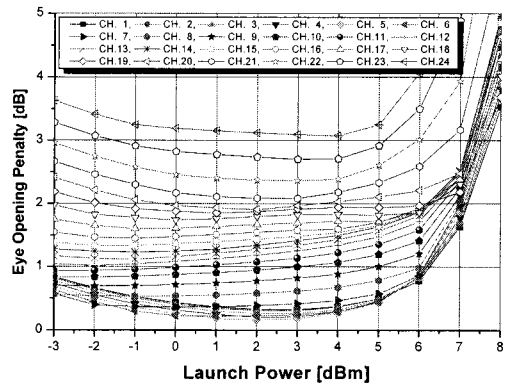


그림 2. 전통적 MSSI 기술이 적용된 24×40 Gbps WDM 전송 시스템에서 입사 전력에 따른 EOP

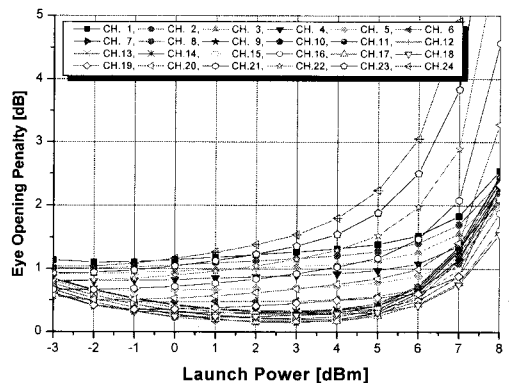


그림 3. 최적 파라미터를 갖는 수정된 MSSI 기술이 적용된 24×40 Gbps WDM 전송 시스템에서 입사 전력에 따른 EOP

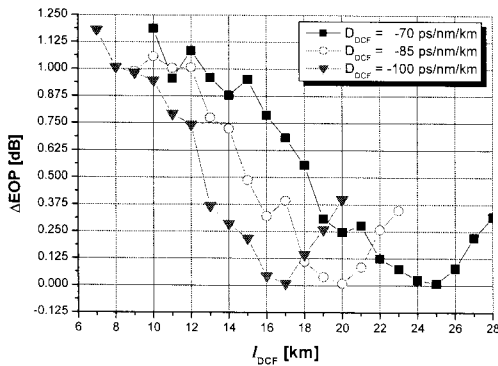
참고 문헌 [10]과 [11]에서 제안된 방법에 의해 도출되는 최적 파라미터를 갖지 않는 전통적 MSSI 기술만 적용된 WDM 전송 시스템에서의 각 채널의 입사 전력에 따른 EOP를 나타낸 것으로 신호 파장이 큰 채널일수록 EOP 특성이 더욱 나빠져 1 dB EOP를 수신 성능의 기준으로 했을 때 채널 간 전력 패널티를 규정할 수 없을 만큼 모든 채널의 양호한 보상이 불가능한 것을 알 수 있다. 이는 앞서 언급했듯 OPC를 중심으로 한 GVD와 광 전력 분포의 불완전한 대칭이 채널 파장과 공역파 파장에 관계하여 나타나기 때문이다.

전통적 MSSI 기술만 적용된 WDM 전송 시스템에서의 심각한 전송 성능 저하를 개선하기 위하여 참고 문헌 [10]과 [11]에서 제안된 방법에 따라 채널 1과 24의 EOP 차이를 최소화 하는 최적 OPC 위치와 각 구간의 최적 분산 계수로 수정한 MSSI 기술을 적용한 WDM 전송 시스템에서 각 채널의 입사 전력에 따른 EOP를 그림 3에 나타냈다. 1,000 km의 NZ-DSF로 구성된 24×40 Gbps WDM 전송

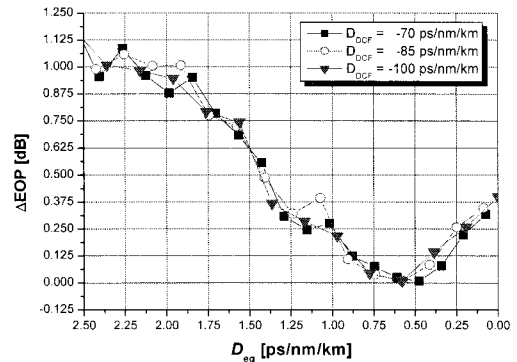
시스템인 경우 OPC의 최적 위치는 494 km이고 이 위치에서 OPC 다음 구간의 분산 계수 값은 OPC 전 구간의 분산 계수 값에 비해 0.005 ps/nm/km만큼 크게 설정되어야 한다. 그림 3은 OPC가 494 km에 위치하고 앞 구간의 분산 계수 값이 4 ps/nm/km로 고정된 경우 뒷 구간의 분산 계수 값이 4.005 ps/nm/km로 수정된 MSSI 기술이 적용된 경우의 EOP 특성으로 그림 2에 비해 파장이 큰 채널들의 EOP 특성이 개선되어 채널 간 전력 패널티도 어느 정도 개선되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 최적 파라미터 값들에 의해 MSSI 기술이 수정되어 적용되더라도 채널 간 EOP 특성의 차이가 입사 전력에 따라 크게 나타나게 되어 모든 채널들을 양호한 성능으로 보상하여 전송하는 데는 여전히 한계가 있는 것을 알 수 있다.

IV. 시뮬레이션 결과 및 검토

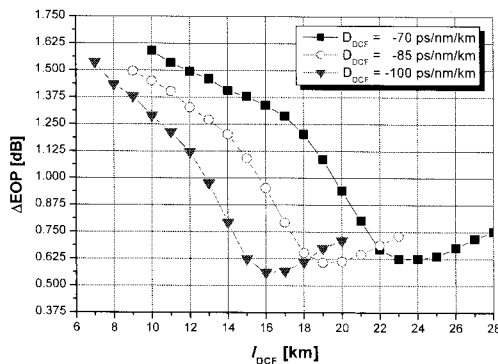
그림 4는 그림 1에서 OPC를 중심으로 앞 구간



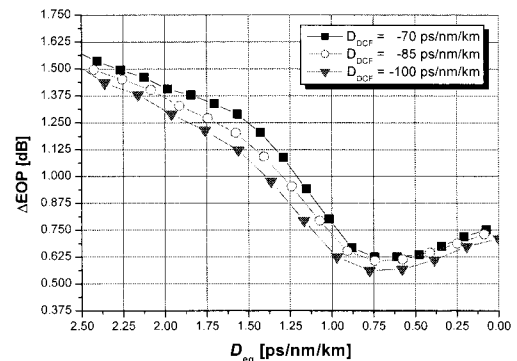
(a) 구조 A에서 ΔEOP v.s. l_{DCF}



(b) 구조 A에서 ΔEOP v.s. D_{eq}



(c) 구조 B에서 ΔEOP v.s. l_{DCF}



(d) 구조 B에서 ΔEOP v.s. D_{eq}

그림 4. MSSI 기술과 집중형 DM 기술이 적용된 24×40 Gbps WDM 전송 시스템에서 ΔEOP

과 뒷 구간에 있는 두 DCF의 분산 계수를 -70, -85, -100 ps/nm/km로 고정하고 DCF의 길이, l_{DCF} 에만 변화를 주어 시스템 전체의 분산량을 제어하는 경우 l_{DCF} 와 D_{eq} 에 따른 채널 1과 24의 ΔEOP 를 나타낸 것이다. ΔEOP 는 각 경우에서의 (5)와 같이 주어지는 채널 1과 24의 EOP 차이로 정의되고, 채널 1과 24 사이의 ΔEOP 를 고찰하는 이유는 전통적 MSSJ 기술이 채택된 시스템의 경우 그림 2에서 보는 바와 같이 두 채널의 파장 차이가 가장 커서 입사 전력에 따른 EOP 특성이 서로 현격하게 다르기 때문이다. 이러한 이유로 ΔEOP 가 가장 적게 나타나는 l_{DCF} 와 D_{eq} 가 시스템 전체의 성능을 개선할 수 있는 유효한 값들이라는 것을 판단할 수 있다.

$$\Delta EOP = |EOP_{ch1} - EOP_{ch24}| \quad (5)$$

D_{eq} 는 (6)으로 표현되는 등가 분산 계수로 정의되고, 이것은 주 전송로인 NZ-DSF뿐만 아니라 DCF의 전체 span을 포함하는 총 전송 링크 거리에서의 평균 분산 계수 값을 의미한다. (6)에서 L_{NZDSF} 는 NZ-DSF span들의 총 전송 거리로 본 논문에서 1,000 km이고, L_{DCF} 는 DCF span들의 총 전송 거리이다.

$$D_{eq} = \frac{(N_{fiber,span} l_{NZDSF} D_{NZDSF}) + (2l_{DCF} D_{DCF})}{L_{NZDSF} + L_{DCF}} \quad (6)$$

24 채널 WDM 시스템의 전체 분산량을 제어하기 위하여 송신기 바로 다음과 수신기 바로 앞에 DCF를 두고 있는 그림 1의 구조 A의 경우 DCF의 분산 계수가 -70, -85, -100 ps/nm/km인 경우 ΔEOP 가 최소로 나타나는 l_{DCF} 는 각각 25, 20, 17 km로 나타났는데 (그림 4(a)) 이 값들에 상응하는 D_{eq} 는 각각 0.476, 0.577, 0.580 ps/nm/km으로 (그림 4(b)) 24개 채널의 효과적 보상을 위해서는 DCF의 분산 계수와 길이에 상관없이 총 전송 링크의 평균 분산 계수가 대략 0.48~0.58 ps/nm/km로 설정되어야 한다는 것을 의미한다. 반면 OPC의 전후에 DCF가 설치된 구조 B의 경우에는 총 전송 링크의 평균 분산 계수가 대략 0.74~0.78 ps/nm/km로 설정되어야 하는 것을 알 수 있다. 그림 4의 결과들이 의미하는 것은 MSSJ 기술에 좀 더 효과적인 성능 보상을 위해 집중형 DM을 추가하고자 하는 경우 DCF의 분산 계수보다 시스템에 실제적으로 적용되어야 하는 등가 분산 계수 D_{eq} 가 시스템 구조에 따라 결정되어야 하고 D_{eq} 값이 나타나도록, 즉 D_{DCF} 와 l_{DCF} 를 결정하여 시스템을 설계해야 한다는 것이다.

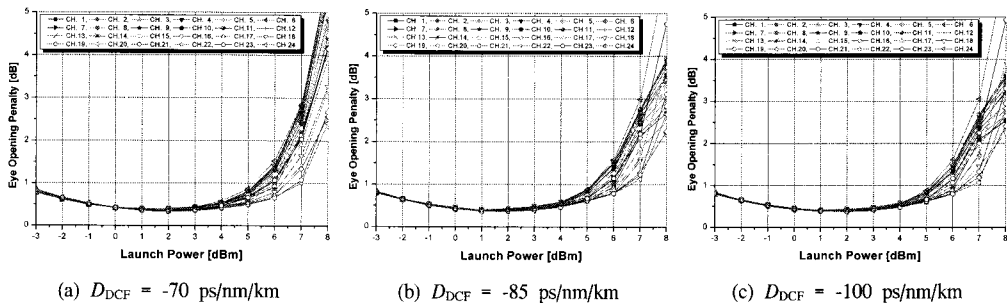


그림 5. 최적 D_{eq} 를 갖는 구조 A의 WDM 전송 시스템에서 입사 전력에 따른 EOP.

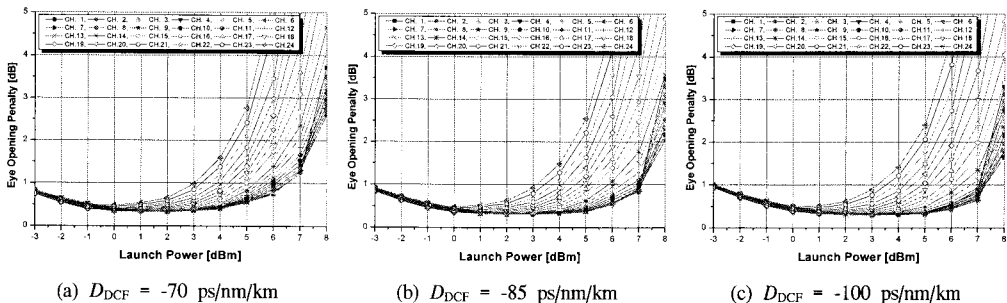


그림 6. 최적 D_{eq} 를 갖는 구조 B의 WDM 전송 시스템에서 입사 전력에 따른 EOP

그림 4로부터 얻은 최적 l_{DCF} (즉 D_{eq})들이 실제 WDM 전송 시스템에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 시스템의 l_{DCF} 가 그림 4로부터 얻은 결과 값들로 선택된 경우의 입사 전력에 따른 EOP를 그림 5와 6에 나타냈다. 최적 l_{DCF} 를 갖는 구조 A와 B 모두에서 얻어진 EOP 특성이 DM없이 최적 파라미터 값들로 설계된 MSSI 기술이 적용된 경우의 EOP 특성인 그림 3에 비해 시스템 전체적으로 매우 개선되는 것을 알 수 있다. 즉 그림 3에서 1 dB EOP 기준 채널 간 전력 페널티가 9.5 dB 이상이었지만 그림 5에서는 D_{DCF} 에 상관없이 약 2 dB, 그림 6에서는 D_{DCF} 에 상관없이 약 3.5 dB로 채널 간 전송 품질의 차이가 집중형 DM 구조에 의존하여 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 즉 모든 채널들의 효율적인 성능 보상 측면에서 보면 구조 B보다 구조 A로 설계된 집중형 DM 방식이 더욱 유리하다는 것을 확인할 수 있다.

특히, 구조 A로 설계된 시스템에서는 입사 전력이 +4 dBm 이하까지에 대해 모든 채널들의 전송 품질이 거의 동일하게 나타나고, 구조 B로 설계된 시스템에서는 입사 전력이 0 dBm 이하까지에 대해 모든 채널들의 전송 품질이 거의 동일하게 나타나는 것을 알 수 있다. 구조 A는 주 전송로인 NZ-DSF에서 겪게 되는 총 분산의 보상을 전체 전송 링크의 시작과 끝에서만 수행한다. 즉 이 구조에서는 D_{DCF} 에 따라 총 전송 거리의 최초 17~25 km와 최종 17~25 km에서 WDM 펄스들의 정상 분산(normal dispersion)이 일어나고 그 외의 구간에서는 이상 분산(anomalous dispersion)이 일어난다. 펄스들이 큰 값의 정상 분산을 겪게 되면 폭이 급속도로 퍼지게 되어 입사 전력보다 실제 피크치가 감소된다. 따라서 상대적으로 감소된 전력에 의

해 이 구간에서의 비선형 현상에 의한 왜곡은 감소되는 효과가 나타난다. 이렇게 비선형성에 의한 왜곡이 줄어든 상태에서 이상 분산 영역의 나머지 구간을 전파하면서 퍼져있던 펄스폭을 압축하면서 회복하고, OPC와 나머지 후반부 구간의 전파를 통해 신호 왜곡이 보상되게 되고 수신단 바로 앞에 있는 DCF span을 거치면서 긴 거리의 NZ-DSF를 거치면서 기대 이상으로 압축된 펄스폭을 복구하게 된다. 여기서 눈여겨보아야 할 것은 신호 전력이 초기 전송 구간에서 약해졌기 때문에, 그리고 비선형 효과가 신호 전력에 비례하기 때문에 어느 정도의 입사 전력 범위까지는 모든 채널들에 미치는 비선형 효과에 의한 신호 왜곡이 미미하다는 것이다. 이 미미한 효과가 그림 5에서 입사 전력 +4 dBm까지 모든 채널의 EOP가 거의 동일하게 얻어지는 것으로 나타났다.

반면 구조 B는 주 전송로인 NZ-DSF에서 겪게 되는 총 분산의 보상을 전체 전송로의 중간 부분인 OPC의 바로 앞과 뒤에서만 수행한다. 즉 이 구조에서는 500 km의 이상 분산 영역을 먼저 지나면서 압축된 광 펄스들의 폭이 상승하여 비선형 효과가 상대적으로 크게 나타나고, 또한 이러한 왜곡이 장 거리에 걸쳐 나타난 후 DCF에 의해 보상되기 때문에 결과적으로 MSSI와 집중형 DM으로 모든 채널에 대해 동일한 정도로 보상될 수 있는 신호 전력의 범위가 구조 A보다 작아질 수밖에 없다고 할 수 있다. 그리고 이러한 이유는 또한, 그림 6에서 알 수 있듯이, 모든 채널들의 신호 전력이 0 dBm 이상으로 증가하면 구조 A에 대한 결과인 그림 5에 비해 채널별 보상 정도에 큰 차이를 제공하게 한다. 또한 구조 B는 DCF에 의한 분산 보상이 구조 A에 비해 더욱 집중적으로 일어나므로 동일한 D_{DCF} 에 대해

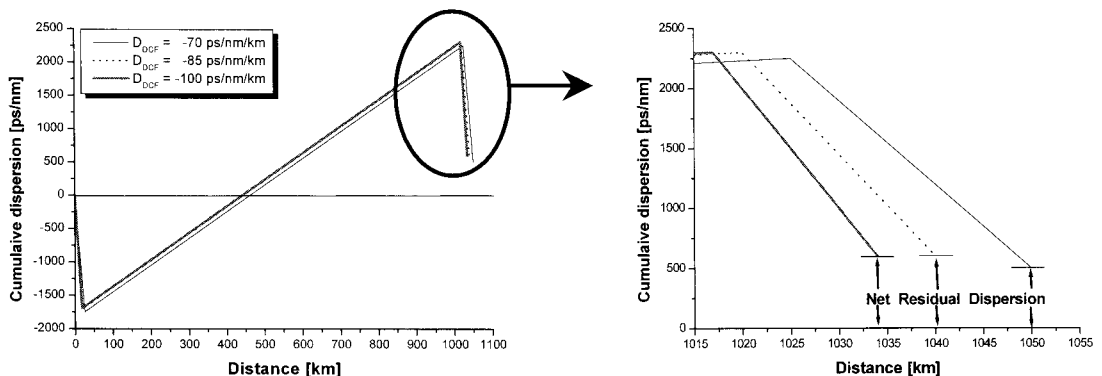


그림 7. 구조 A의 WDM 전송 시스템에서 최적 분산 맵과 NRD.

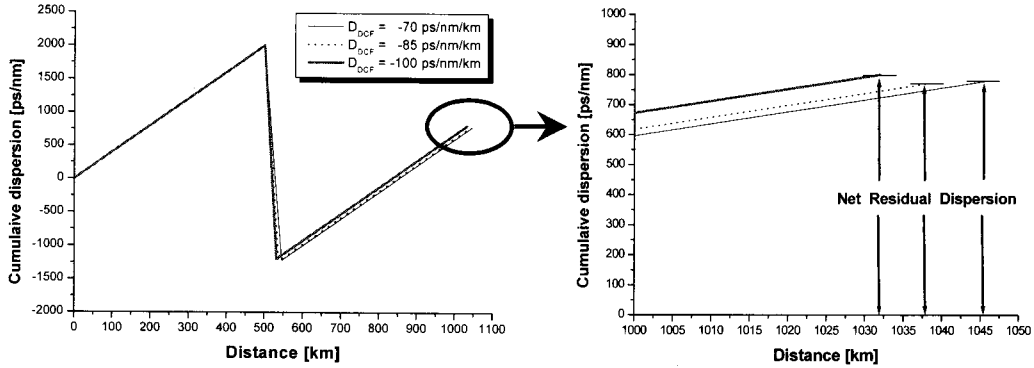


그림 8. 구조 B의 WDM 전송 시스템에서 최적 분산 맵과 NRD.

구조 A의 경우보다 짧은 최적 l_{DCF} 를 갖게 하고, 결국 D_{eq} 를 구조 A보다 커지게 하는 원인이 된다.

그림 7과 8은 각각 그림 4로부터 얻은 최적 l_{DCF} 에 따라 구조 A와 B의 시스템 최적 분산 맵을 나타낸 것으로, D_{DCF} 값에 상관없이 분산 맵의 형태가 거의 동일한 것을 알 수 있다. 오른쪽 그림들은 각 경우의 NRD를 나타낸 것으로 구조 A에서 D_{DCF} 가 -70, -85, -100 ps/nm/km인 경우 NRD가 각각 500, 600, 600 ps/nm로 얻어졌고, 구조 B에서 D_{DCF} 가 -70, -85, -100 ps/nm/km인 경우 NRD가 각각 780, 770, 800 ps/nm로 얻어졌다. 이 결과들에서 눈여겨보아야 할 것은 모든 경우 NRD가 0 ps/nm가 아닌 양(positive)의 값을 가져야 한다는 것이다. 본 논문에서 고려하는 WDM 전송 시스템은 비선형 효과 중 XPM과 4-광파 혼합 (FWM ; Four-Wave Mixing) 현상을 무시한 SPM에 의해서만 성능이 제한되는 (SPM-limited) 시스템이다. 참고 문헌 [3]과 [6]에 의하면 SPM-limited DM 시스템에의 전송 성능 개선을 위해서는 NRD가 0이 아닌 양의 값을 가져야 한다고 보고되었다. 반면 데이터 전송률이 40 Gbps 이상의 RZ 전송의 경우는 NRD가 0 근처가 되는 의사 선형 (pseudolinear) 시스템이어야 최상의 보상을 얻을 수 있다^{[4],[5]}. 본 논문에서 얻은 각 경우의 NRD 값은 시스템의 구체적인 파라미터가 다르기 때문에 실제적 값에는 차이가 있지만 참고 문헌 [3]과 [6]의 결과에 부합되는 것이라고 할 수 있다.

V. 결 론

960 Gbps WDM 신호를 고품질로 전송하기 위한 MSSl 기술과 집중형 DM 기술에 대해 살펴보

았다. 집중형 DM은 적당한 위치에 놓인 DCF를 가지고 수행하는데, 본 논문에서는 DCF를 전체 전송 링크의 시작과 끝에만 위치시킨 구조와 전체 전송 링크 중간에 있는 OPC의 전후에만 위치시킨 2 가지 구조에 대해 비교하였다. 우선 전통적 MSSl, 또는 최적 파라미터 값으로 설계된 수정된 MSSl 기술만 적용된 경우에 비해 본 논문에서 살펴본 MSSl와 집중형 DM이 동시에 적용된 WDM 전송 시스템이 최적의 NRD (또는 D_{eq})를 갖도록 설계된다면 2 가지 구조 모두 전송 품질을 3배 이상 개선할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 그러나 모든 채널들의 효과적 전송을 위해서는 전체 전송 링크 중간에 있는 OPC의 전후에만 DCF를 위치시킨 구조보다 전체 전송 링크의 시작과 끝에만 DCF를 위치시킨 구조가 더 유리하다는 것을 알 수 있었다.

아울러 본 논문에서 고려한 SPM-limited DM 시스템에서 효과적 전송 성능 개선을 위한 NRD는 시스템의 구조에 따라 구체적인 값은 달라지지만 양의 값으로 결정되어야 한다는 것을 확인하였다. 본 논문에서 고찰한 WDM 전송 성능 보상 기술과 결과는 장거리 초고속 광전송 시스템 구현에 도움이 될 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] 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 dispersionshifted fiber,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, no. 8, pp. 1045~1047, Aug. 1999.
- [3] 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.
- [4] R. I. Killely, H. J. Thiele, V. Mikhailov, and P. Bayvel, “Reduction of intrachannel nonlinear distortion in 40-Gb/s-based WDM transmission over standard fiber,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, no. 12, pp. 1624~1626, Dec. 2000.
- [5] R.-J. Essiambre, G. Raybon, and B. Mikkelsen, “Pseudo-linear transmission of high-speed TDM signals: 40 and 160 Gb/s,” in *Optical Fiber Telecommunications IV B*, I. Kaminow and T. Li, Eds. San Diego, CA: Academic, 2002.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] D. M. Pepper and A. Yariv, “Compensation for phase distortions in nonlinear media by phase conjugation”, *Opt. Lett.*, vol. 5, pp 59~60, 1979.
- [9] S. Watanabe, S. Takeda, G. Ishikawa, H. Ooi, J. G. Nielsen and C. Sonne, “Simultaneous wave-length conversion and optical phase conjugation of 200 Gb/s (5×40 Gb/s) WDM Signal using a highly nonlinear fiber four-wave mixing”, in *ECOC 97 Conf.*, pp. 1~4, 1997.
- [10] Seong-Real Lee, “Compensation for the Distorted 16×40 Gbps NRZ Channels in 1,000 km NZ-DSF WDM System using MSSI with Optimal Parameters”. *한국통신학회논문지*, 제 31권 11A호, pp 1044~1052, 2006.
- [11] 이성렬, “WDM 채널수에 따른 최적의 OPC 위치 및 광섬유 분산 계수”, *한국항공학회논문지* 제 11권 2호, pp. 177~186, 2007.
- [12] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, 2001.
- [13] 이성렬, 김지웅, 손성찬, “320 Gbps 강도 변조 직접 검파 WDM 채널 보상에서 상호 위상 변조의 영향”, *한국해양정보통신학회논문지*, 제 8권 6호, pp. 1134~1140, 2004.
- [14] Lars Grüner-Nielsen, Marie Wandel, Poul Kristensen, Carsten Jørgensen, Lene Vilbrad Jørgensen, Bent Edvold, Bera Pálsdóttir, and Dan Jakobsen, “Dispersion-Compensating Fibers”, *J. Lightwave Technol.*, vol. 23, no. 11, pp. 3566~3579, 2005.
- [15] G. P. Agrawal, *Fiber-optic communication systems*, John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [16] ITU Recommendation “Spectral grids for WDM applications : DWDM frequency grid” *G.694.1*, 2006.

이 성 렬 (Seong-Real Lee)

정회원



1990년 2월 한국항공대학교 항공통신정보공학과 졸업
 1992년 8월 한국항공대학교 대학원 항공통신정보공학과 석사
 2002년 2월 한국항공대학교 대학원 통신정보공학과 박사
 2002년 6월~2004년 2월 (주)에

이티엔 부설연구소 연구소장

2004년~현재 국립목포해양대학교 해양전자통신공학부 조교수

<관심분야> WDM 전송 시스템, 광 솔리톤 전송