

WDM (24×40 Gbps) 전송에서 광 위상 공액기와 분산 제어를 이용한 시스템 성능 개선

정회원 이 성 렬*, 종신회원 임 황 빈**

System Performance Improvements in WDM (24×40 Gbps) Transmission using Optical Phase Conjugator and Dispersion Management

Seong-Real Lee* *Regular Member*, Hwang-Bin Yim** *Lifelong Member*

요 약

대용량 장거리 WDM (24×40 Gbps) 전송 시스템의 구현을 위해 단일 모드 광섬유에서 발생하여 WDM 채널 신호에 왜곡을 발생시키는 색 분산과 비선형 효과를 보상하는 광 링크 기술을 전산 시뮬을 통해 살펴보고 그 설계 기준을 제안하였다. 링크 전송 기술은 전체 전송로에서 축적된 분산을 분산 보상 광섬유를 통해 보상하는 분산 제어 (DM; dispersion management)와 전체 전송로 중간에서 왜곡된 신호의 주파수를 반전시켜 보상하는 광 위상 공액 기술로 구성된다. 본 연구에서 살펴본 DM은 집중형과 inline의 2 가지 구조이다. 전송 링크에 OPC (optical phase conjugator)만 적용된 WDM 전송 시스템에서의 경우에 비해 DM이 추가적으로 적용되면 모든 WDM 채널들의 눈 열림 페널티가 크게 개선되는 것을 확인하였다. 그리고 두 DM 구조 모두에서 유효 잉여 분산 범위를 이용하여 전송 링크의 설계 기준을 제시하였다. WDM 전체 채널들의 EOP 개선과 유효 잉여 분산 범위 모두 inline DM 구조가 집중형 DM 구조보다 더욱 양호한 결과를 나타냄을 확인하였다.

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

ABSTRACT

Optical link techniques compensating chromatic dispersion and nonlinear effects, which affect distortion of optical signals, generated in single mode fiber are investigated through computer simulation and design rule of these link techniques is proposed for implementation of wideband and long-haul WDM (24×40 Gbps) transmission system. The optical link consist of dispersion management (DM) compensating the cumulated dispersion through total transmission line and optical phase conjugation in middle of total transmission line for compensating distorted signals by frequency inversion. DM schemes considered in this research are lumped DM and inline DM. It is confirmed that eye opening penalty (EOP) of overall WDM channels are more improved than those in WDM transmission systems with only optical phase conjugator (OPC), if DM is additionally applied to these systems. And, design rule in both DM schemes are proposed by using effective residual dispersion range. It is confirmed that inline DM is better than lumped DM in the improving EOP of total WDM channels and in effective residual dispersion range.

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

** Dept. of Information & Comm., Gangwon Provincial College

논문번호 : KICS2008-05-198, 접수일자 : 2008년 5월 1일, 최종논문접수일자 : 2008년 9월 26일

I. 서 론

현재 광 전송로로 많이 설치되어 있는 표준형 단일 모드 광섬유 (SMF; single mode fiber)는 1,550 nm 파장에서 매우 큰 색 분산 (chromatic dispersion)을 갖기 때문에 색 분산의 영향을 제거하지 않으면 40 Gbps 전송에서 유효 전송 거리는 수 킬로미터 이내로 제한된다^{[1][2]}. 더욱이 SMF를 통해 파장 분할 다중 (WDM; wavelength division multiplexing) 전송을 하는 경우 파장에 따른 색 분산의 효과가 크게 차이 나기 때문에 채널 용량이 증가할수록 전송 품질이 크게 저하된다. 즉 파장이 큰 채널일수록 색 분산에 의한 영향이 증가됨에 따라 광 펄스의 폭이 급격하게 감소되어 채널 상호간의 왜곡이 증가된다. 이러한 파장에 따른 색 분산에 의한 영향을 줄일 수 있는 효과적인 방법으로 분산 제어 (DM; dispersion management)가 가장 대표적이다^{[3][4][5]}. 원칙적으로 Kerr 비선형성이 존재하지 않고 신호 입력 전력이 증폭된 자연 방출 (ASE; amplified spontaneous emission) 잡음을 극복할 정도로 큰 경우 DM 기술을 채택하면 비트율과 전송 거리에 관계없이 신호를 전송할 수 있다. 그러나 광섬유에 실제적으로 존재하는 Kerr 비선형 현상은 전송 링크의 길이, 신호 비트율과 신호 전력의 크기에 비례하여 증가되어 전송 신호에 왜곡을 발생시킨다. 즉 DM에 의해 시스템 전체의 분산량이 감소하면 각 채널들의 펄스 강도가 상대적으로 증가하기 때문에 비선형 효과가 더욱 증가할 수 있다. 따라서 실제 전송 링크에서 신호를 고품질로 전송하기 위해서는 DM 기술 외에 비선형의 효과를 저하시킬 수 있는 다른 기술이 적용되어야 한다.

WDM 전송 시스템에서 비선형 현상을 억제시키기 위한 기술로서 광 위상 공액 (optical phase conjugation) 기술이 있다. 광 위상 공액 기술은 시스템의 전체 전송로 중간에 광 위상 공액기 (OPC; optical phase conjugator)를 두어 송신단부터 OPC까지 전파되면서 색 분산과 비선형 현상에 의한 신호 왜곡을 OPC에서 공액 변환하여 나머지 전송 구간, 즉 OPC부터 수신단까지 전송시켜서 보상하는 방법이다^{[6][7][8]}.

따라서 본 논문에서는 SMF의 전체 전송 링크 중간에 OPC를 두고 전송 링크의 총 분산량을 DM으로 제어하는 WDM 전송 시스템에서 DM의 구조에 따른 시스템 성능 향상 정도를 살펴본다. DM의 구조는 SMF의 광전송 링크를 구성하는 광 증계기 (optical repeater) 마다 SMF의 분산 계수와 반대 부호의 분산 보상 광섬유 (DCF; dispersion compensation fiber)

를 결합시키는 inline 구조와 OPC 전까지의 전체 전송 링크의 반구간의 총 분산량을 송신기 바로 다음에만 DCF를 두어 보상하고 OPC 후부터의 나머지 반구간의 총 분산량을 수신기 바로 앞에만 DCF를 두어 보상하는 집중형 (lumped) 구조이다. 즉 OPC를 채택한 WDM 전송 시스템에 inline DM이 적용된 경우와 집중형 DM이 적용된 경우에 따라 모든 채널의 최상의 보상을 위한 조건을 도출하고, 24개 WDM 채널들의 고품질 전송이 가능한 각 DM 구조의 설계 기준을 제시하도록 한다.

전산 시뮬을 통해 WDM 채널의 비트율은 40 Gbps 이고, 이들 채널 24개가 100 GHz의 간격의 다른 파장으로 동시에 전송되는 것으로 하였으며, 각 채널의 변조 파형 형식은 NRZ로 가정하였다.

II. WDM 전송 시스템의 구성과 DM 방식

그림 1(a)와 (b)는 OPC가 전체 전송 거리의 중간에 위치한 WDM 전송 시스템에서 각각 송신부 바로 다음과 수신부 바로 앞에만 DCF를 위치시켜 축적된 전체 분산량을 보상하는 집중형 DM과 모든 전송 구획(span)마다 DCF를 두어 축적된 전체 분산량을 보상하는 inline DM이 적용된 시스템 구조를 나타낸 것이다. 그리고 그림 2(a)와 (b)는 그림 1의 (a)와 (b)의 분산 맵 (dispersion map)을 각각 나타낸 것이다. 그림 1(a)와 (b)의 송신부에서의 24개 레이저 다이오드는 서로 독립적인 40 Gbps 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 NRZ 형식의 2차 가우시안 펄스로 모델링하였다. 광 변조기로부터 출력되는 각 채널의 광 펄스는 그림 1(a)와 (b)의 광 전송 링크를 통해 식 (1)의 비선형 슈뢰딩거 방정식 (NLSE; nonlinear Schrödinger equation)에 따라 손실과 비선형 효과의 영향을 겪으면서 수신단에 도착한다^[9].

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

여기서 $j, k = 1, 2, \dots, 24(j \neq k)$ 는 WDM 채널 번호, A_j 는 j -번째 채널의 포락선, z 는 광 펄스의 전파 방향, α 는 광섬유의 손실 계수, β_{2j} 는 j -번째 채널의 신호 파장, β_{2j} 는 색 분산 파라미터, β_{3j} 는 3차 색 분

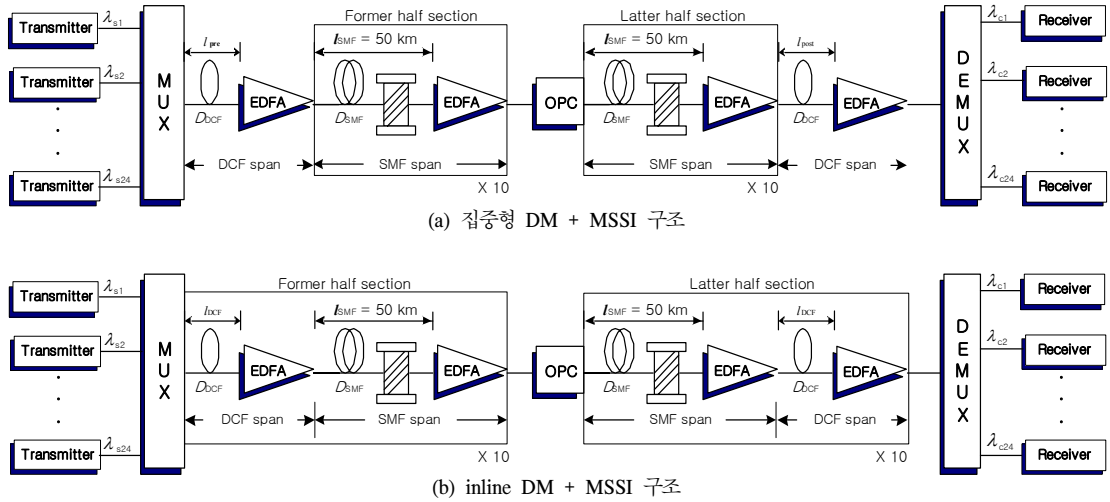


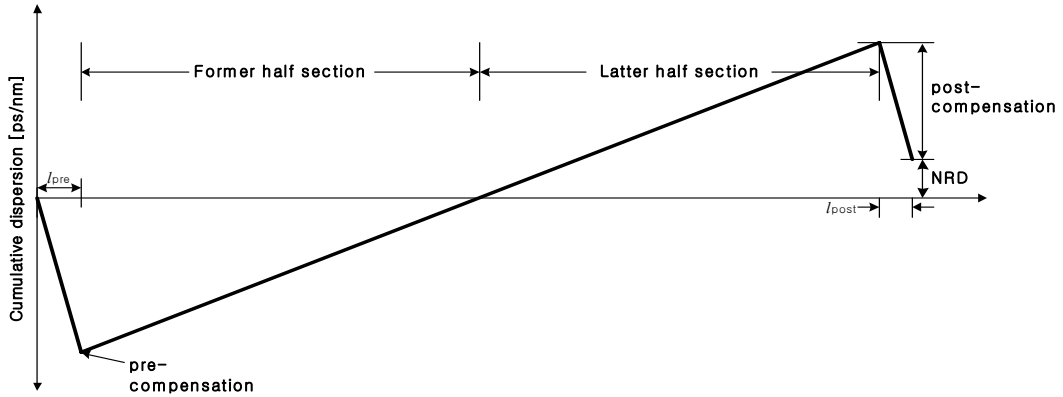
그림 1. 24×40 Gbps WDM 전송 시스템

산 파라미터, γ_j 는 비선형 계수, $T = t - z/v_j$ 이다. 식 (1)의 수치적 분석은 단계 분할 푸리에 (SSF; split-step Fourier) 기법을 이용하여 이루어졌다⁹⁾. 식 (1) 우편의 마지막 두 항은 각각 비선형 효과 중 자기위상 변조 (SPM; self phase modulation)와 상호 위상 변조 (XPM; cross phase modulation)를 유도한다. WDM 신호에 대한 XPM의 영향은 WDM 시스템의 광섬유 분산 계수가 클수록 감소한다. 여기에서 가정한 광섬유는 SMF로 하였고, 그 분산 계수 값은 XPM에 의한 왜곡이 미미하게 나타나는 16 ps/nm/km로 하였기 때문에 XPM의 영향은 무시하였다.

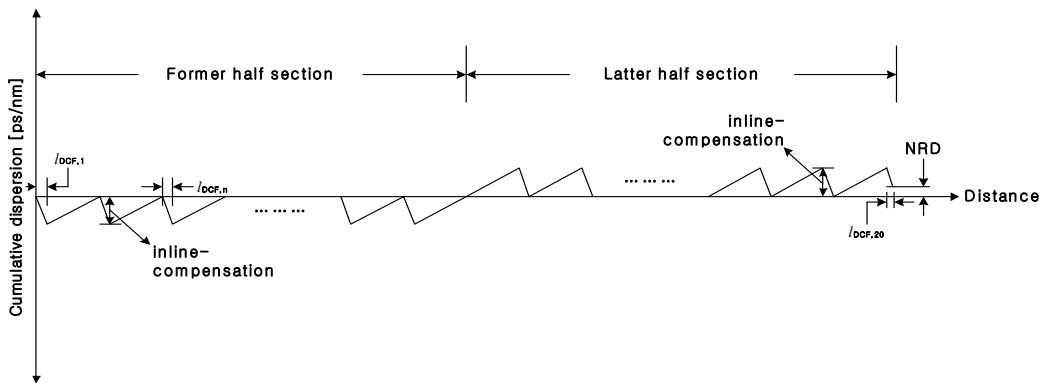
그림 1(a)와 (b)에서 수신부는 5 dB의 잡음 지수를 갖는 전치 증폭기, 1 nm 대역폭의 광 필터, PIN 다이오드, 버터워스 형태의 펄스 정형 필터와 판별 회로로 구성된 직접 검파 (direct detection) 방식의 수신기로 가정하였다¹⁰⁾. 수신 대역폭은 0.65×비트율로 가정하였다. 그리고 전체 전송 링크 중간에 위치한 OPC는 참고 문헌 [11]에서와 동일한 파라미터를 갖는 HNL-DSF (highly nonlinearity—dispersion shifted fiber)를 비선형 매질로 갖는 구조로 모델링 하였다. 24 채널 중 첫 번째 채널의 중심 파장은 1550.0 nm로 가정하였고, 각 WDM 채널들의 중심 주파수들은 ITU-T 권고에 따라 100 GHz (즉 0.8 nm)의 동일한 간격으로 분할하여 할당하였다¹²⁾. 따라서 24개의 신호 파장들(1550.0~1568.4 nm)과 이들의 공액파 파장들(1531.1~1549.5 nm)은 모두 참고 문헌 [11]에서와 동일하게 얻어지는 OPC 변환 효율의 3-dB 대역폭 안에 포함된다.

그림 1(a)와 (b)의 두 구조 모두 OPC를 중심으로 송신단부터 OPC까지의 전송 구간을 전반 구간 (former half section), OPC부터 수신단까지의 전송구간을 후반 구간 (latter half section)이라고 한다면, 집중형 DM은 우선 전반 구간에서 겪게 될 분산은 송신단 바로 다음에 있는 DCF를 통해 미리 보상시키고 (그림 2(a)에서 precompensation), 후반 구간에서 겪게 되는 분산은 수신기 바로 전에 있는 DCF를 통해 보상시키는 (그림 2(a)에서 postcompensation) 구조로 되어 있다. 이 구조에서 precompensation 량과 postcompensation 량의 결정은 각각 송신기 다음의 DCF의 길이 l_{pre} 와 수신기 앞의 DCF의 길이 l_{post} 를 통해 이루어진다. 반면 inline DM은 매 구획(span)에서 발생하는 분산을 각 구획에서 DCF를 통해 보상하는 (그림 2(b)에서 inline compensation) 구조로, 전반 구간에서의 각 구획마다의 DCF, l_{DCF} 를 두는 방식으로 구성하였고, 후반 구간에서의 각 구획들은 그 반대의 구조로 구성하였다.

그림 1(a)와 (b) 모두 SMF에서 발생하는 손실을 보상하기 위해 에르븀 첨가 광섬유 증폭기 (EDFA erbium-doped fiber amplifier)로 연결된 각 전송 구획의 길이는 50 km로 하였고, 이 전송 구획이 송신단부터 OPC까지 10개, OPC부터 수신단까지 10개, 즉 SMF에 의해 연결된 총 전송 거리는 1,000 km로 하였다. 집중형 DM과 inline DM 구조 모두 SMF의 손실 계수 α_{SMF} 는 0.2 dB/km, 분산 계수 D_{SMF} 는 16 ps/nm/km(@1,550 nm), 비선형 계수 γ_{SMF} 는 1.41 W⁻¹km⁻¹(@1,550 nm)로 가정하였다. 그리고 그



(a) 집중형 DM + MSSI 구조



(b) inline DM + MSSI 구조

그림 2. 분산 맵

그림 1(a)의 집중형 DM 구조에서 DCF의 분산 계수 D_{SMF} 는 $-100 \text{ ps/nm/km} (@1,550 \text{ nm})$ 로, 그림 1(b)의 inline DM 구조에서 DCF의 분산 계수 D_{SMF} 는 $-80 \text{ ps/nm/km} (@1,550 \text{ nm})$ 로 가정하였다. 또한 두 구조 모두 DCF의 손실 계수 α_{DCF} 는 0.4 dB/km , 비선형 계수 γ_{DCF} 는 $4.83 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1} (@1,550 \text{ nm})$ 로 가정하였다.

III. 시스템 성능 해석 방법

본 논문에서는 OPC가 채택된 WDM 전송 시스템에서 주 전송 링크인 SMF의 길이와 분산 계수가 고정되었을 때 DM 방식에 따른 성능 개선 효과를 살펴본다. 이를 위해 우선 모든 채널들을 최상으로 보상할 수 있는 집중형 DM의 경우 precompensation과 postcompensation, inline DM의 경우 inline compensation을 구한다.

이는 먼저 집중형 DM 방식에서는 송신단 바로 다음에 있는 DCF의 길이, l_{pre} 와 수신단 바로 전에 있는 DCF의 길이, l_{post} 를 같은 정도로 동시에 변화

시키면서 이들 변동에 따른 WDM 채널들의 성능 변화 정도를 분석하여 모든 채널들을 동시에 최상으로 보상할 수 있는 DCF의 길이를 찾아서 구한다. 집중형 DM 방식의 각 반구간에서 축적된 분산량은 $8,000 \text{ ps/nm} (= 16 \text{ ps/nm/km} \times 500 \text{ km})$ 이지만 이를 0으로 만드는 DCF의 길이는 $8,000/D_{DCF} = 80 \text{ km}$ 이다^[13]. 따라서 집중형 DM 방식에서 precompensation과 postcompensation 도출을 위한 DCF의 길이는 각각 1~80 km까지 고려하였다.

반면 inline DM 방식에서는 전반 구간에서 첫 번째 전송 구획의 DCF 길이, $l_{DCF,1}$ 과 후반 구간에서 마지막 전송 구획의 DCF 길이, $l_{DCF,20}$ 만을 같은 정도로 동시에 변화시키면서 (나머지 18개 구획의 DCF 길이는 고정) 이들 변동에 따른 WDM 채널들의 성능 변화 정도를 분석하여 모든 채널들을 동시에 최상으로 보상할 수 있는 DCF의 길이를 찾아서 구한다. Inline DM 방식의 한 구획에서 축적된 분산량은 $800 \text{ ps/nm} (= 16 \text{ ps/nm/km} \times 50 \text{ km})$ 이고 이를 0으로 만드는 DCF의 길이는 $800/D_{DCF} = 10$

km이다^[13]. 따라서 inline DM 방식에서 최적의 첫 번째와 마지막 구획의 inline compensation 도출을 위한 이 두 구획의 DCF의 길이, 즉 $l_{DCF,1}$ 과 $l_{DCF,20}$ 모두 1~10 km까지 고려하고, 나머지 18개 구획의 DCF 길이는 모두 10 km로 고정시켰다.

집중형 DM 방식과 inline DM 방식에서 모든 WDM 채널들을 최상으로 보상할 수 있는 DCF 길이가 각각 80 km와 10 km가 아니면 그림 2에서 전송 링크 최종단 (수신단)에 축적된 분산량인 전체 잉여 분산량 (NRD; net residual dispersion)은 0 ps/nm가 아닌 값을 갖게 된다. 본 논문에서는 각 DM 방식에 따라 구한 최적 DCF 길이에 의해 결정되는 NRD에 관련하여 WDM 채널들의 성능 해석도 함께 수행한다.

그리고 DM에 의해 분산 보상이 이루어지는 전체 전송 링크중간에 OPC를 갖는 WDM 전송 시스템 구현을 위한 설계 기준을 제공하고자 모든 WDM 채널들을 특정 전송품질 이내로 전송할 수 있는 각 전송 구간의 잉여 분산 범위를 구해보고자 한다. 이것은 두 DM 방식이 각각 적용된 시스템에서 OPC를 기준으로 모든 채널의 눈 열림 페널티 (EOP; eye opening penalty)를 1 dB 이하로 만드는 한 쪽 반구간의 잉여 분산에 대한 나머지 반구간의 잉여 분산의 범위를 구해서 얻을 수 있다. 즉 한 쪽 반구간의 DCF 길이를 특정한 값으로 고정한 상태에서 24개 채널의 EOP를 1 dB 이하로 만드는 나머지 반구간의 DCF 길이의 범위를 찾아서 이루어진다.

시스템들의 전송 채널 성능 평가 파라미터인 EOP는

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

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 아래와 같이 정의된다.

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

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. OPC 기술을 통한 WDM 채널 전송

그림 3은 그림 1에서 분산 보상을 위해 DM이 제외된, 즉 전체 전송로 중간에 OPC만 채택한 WDM

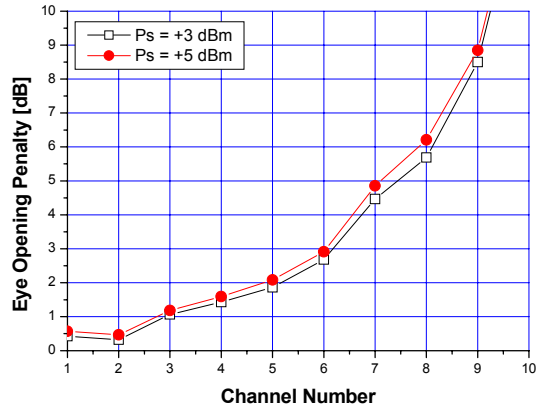


그림 3. WDM 전송 링크에 OPC만 적용한 경우의 채널에 따른 눈 열림 페널티

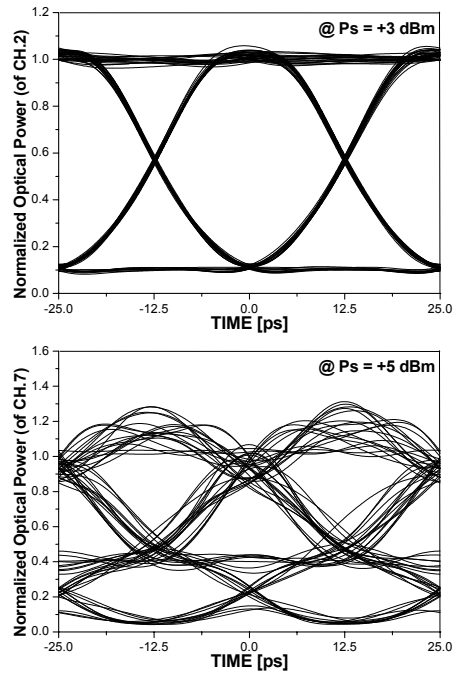


그림 4. 채널 2와 채널 7의 아이 다이어그램

전송 시스템에 앞서 언급한 파장을 각기 갖는 24개의 채널들이 +3 dBm과 +5 dBm의 입사 전력 (launch power) P_s 으로 전송된 경우 수신 EOP를 나타낸 것이다. 그림 4는 그림 3에서 얻은 결과들 중 전송 성능이 가장 좋은 $P_s = +3$ dBm의 채널 2의 아이 다이어그램과 약 5 dB의 EOP를 나타내는 $P_s = +5$ dBm의 채널 7의 아이 다이어그램을 나타낸 것이다.

그림 3을 통해 채널의 파장이 증가할수록 수신 성능이 매우 크게 저하되는 것을 알 수 있다. 이는 앞서 언급했던 동일한 송신 전력의 채널들이라도 채널의 파장에 따라 분산의 영향이 각기 다르게 나타

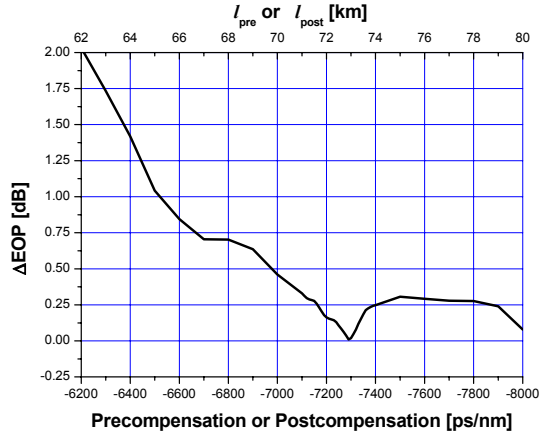
나기 때문이고, 더욱이 각 채널들이 분산 계수가 큰 SMF를 1,000 km의 긴 거리를 전파하였기 때문에 채널에 따른 분산의 영향이 더욱 크게 나타난 결과로 볼 수 있다. 이러한 사실은 그림 4에 나타난 두 아이 다이어그램의 비교를 통해서도 확인할 수 있다. 즉 전송 성능이 가장 좋은 $P_s = +3$ dBm의 채널 2의 아이 다이어그램을 살펴보면 채널 2의 중심 파장이 SMF의 영 분산 파장 (ZDW; zero dispersion wavelength)인 1,550 nm에 가깝기 때문에 분산의 영향을 거의 받지 않아 약간의 진폭 변동만 나타날 뿐 깨끗한 모양의 수신 신호를 얻을 수 있었던 반면 약 5 dB의 EOP를 나타내는 $P_s = +5$ dBm의 채널 7은 그 중심 파장과 ZDW와의 차이가 4.8 nm로 매우 크다고 볼 수 없지만 채널 2의 경우와 비교해 중심 파장과 ZDW와의 차이가 늘어난 만큼 분산의 영향을 더욱 크게 받아 수신 파형에 진폭 변동뿐만 아니라 위상의 변동과 타이밍 지터 (timing jitter)가 매우 심하게 나타나는 것을 알 수 있다.

시스템 성능 기준을 엄격하게 1 dB EOP라고 정의한다면 1,000 km의 SMF로 연결되고 전송로 중간에 OPC를 채택한 WDM 전송 시스템을 통해 1 dB EOP의 수신 성능을 얻을 수 있는 채널들은 1번부터 3번 채널까지임을 그림 3을 통해 확인할 수 있다. 이러한 결과는 1,000 km의 SMF로 구성된 WDM 전송 링크에 OPC 외에 총 분산을 제어할 수 있는 부가적인 기술이 필요하다는 것을 의미한다.

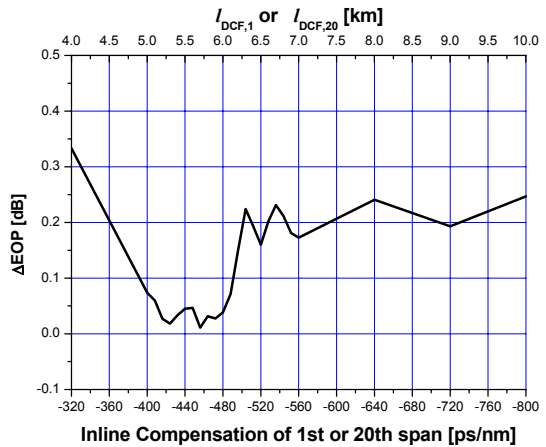
V. 전산 시뮬 결과 및 검토

그림 5(a)는 그림 1(a)의 집중형 DM이 추가적으로 적용된 WDM 전송 시스템에서 최적의 precompensation과 postcompensation 도출을 위해 두 DCF의 분산 계수를 -100 ps/nm/km로 고정시킨 상태에서 l_{pre} 와 l_{post} 를 같은 값으로 동시에 변화를 준 경우 채널 1과 24의 ΔEOP 를 나타낸 것이다. ΔEOP 는 채널 1과 24의 EOP 차이로 정의된다. 그리고 그림 5(b)는 그림 1(b)의 inline DM이 추가적으로 적용된 WDM 전송 시스템에서 첫 번째와 마지막 구획의 최적의 inline compensation 도출을 위해 모든 DCF의 분산 계수를 -80 ps/nm/km로 고정시킨 상태에서 $l_{DCF,1}$ 와 $l_{DCF,20}$ 를 같은 값으로 동시에 변화를 준 경우 이들에 채널 1과 24의 ΔEOP 를 나타낸 것이다.

그림 1(a)를 통해 집중형 DM 기술이 적용된 경우 최적의 precompensation과 postcompensation은 -7,290 ps/nm인 것을 알 수 있다. 즉 l_{pre} 와 l_{post} 가



(a) 집중형 DM

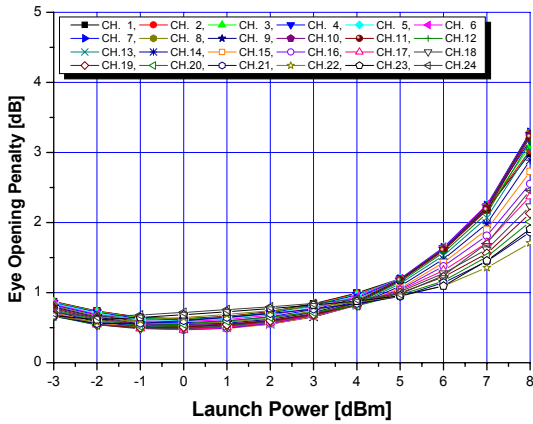


(b) inline DM

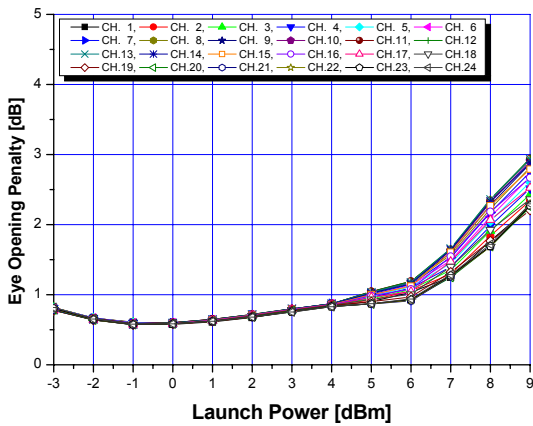
그림 5. MSSl 기술과 DM 기술이 적용된 24×40 Gbps WDM 전송 시스템에서 ΔEOP

72.9 km로 설정되어야 하는 것을 알 수 있다. 그리고 inline DM 기술이 적용된 경우 첫 번째와 마지막 구획의 최적의 inline compensation은 -456 ps/nm인 것을 알 수 있다. 즉 $l_{DCF,1}$ 와 $l_{DCF,20}$ 가 5.7 km로 설정되어야 하는 것을 알 수 있다.

그림 6(a)와 (b)는 각각 집중형 DM 기술이 적용된 WDM 전송 시스템에서 precompensation과 postcompensation이 그림 5(a)의 결과대로 설정된 경우와 inline DM 기술이 적용된 WDM 전송 시스템에서 첫 번째와 마지막 inline compensation이 그림 5(b)의 결과대로 설정된 경우 입사 전력에 따른 24개 채널의 EOP를 나타낸 것이다. 그림 6의 결과를 DM이 적용되지 않은 WDM 전송 시스템에서의 EOP 특성을 나타낸 그림 3과 비교해 보면 1 dB EOP를 기준으로 그림 3에서는 입사 전력이 +3



(a) 집중형 DM



(b) inline DM

그림 6. 최적의 DM이 적용된 WDM 전송 시스템에서 입사 전력에 따른 EOP

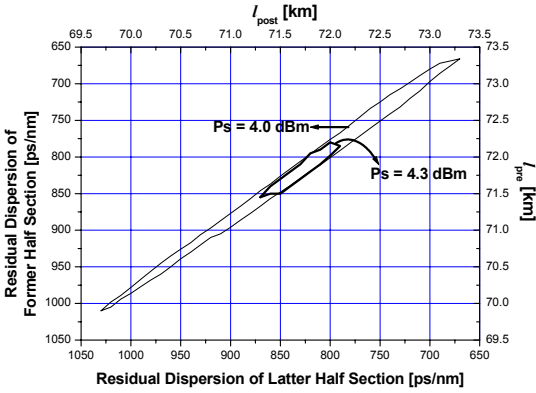
dBm과 +5 dBm 모두 채널 1부터 3까지의 3개의 채널들만 이 성능 기준 이내로 수신되지만 집중형 DM이 추가적으로 결합된 WDM 전송 시스템에서는 모든 채널들의 입사 전력이 +4 dBm 이내로 제한되지만 하면 24개 채널 모두 EOP가 1 dB 이하로 수신되는 것을 알 수 있다. 그리고 inline DM이 추가적으로 적용된 WDM 전송 시스템에서는 전송 품질이 더욱 개선되어 모든 채널들의 입사 전력이 +5 dBm 이내로 제한되지만 하면 24개 채널 모두 EOP가 1 dB 이하로 수신되는 것을 알 수 있다. 그리고 모든 채널들의 수신 성능 개선도 비슷하게 이루어져 1 dB EOP 기준 채널 간 전력 패널티 (power penalty)도 약 1.5~2.0 dB 이내로 얻어진다. 더욱이 1 dB EOP 이내로 수신될 수 있는 채널의 입사 전력 범위 내에서 inline DM이 추가적으로 적용된 경우가 집중형 DM에 비해 모든 채널들에 대한 보상이 거의

동일하게 이루어져 이들의 EOP 특성이 매우 일치하는 것을 확인할 수 있다.

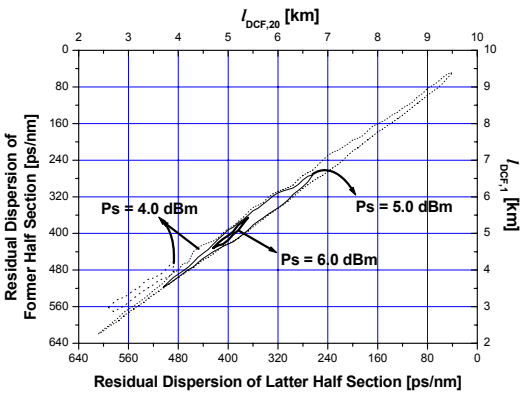
그림 5로부터 얻은 DM을 통한 최적의 분산 보상량으로부터 수신단에서의 최상의 NRD를 구할 수 있다. 집중형 DM이 적용된 경우 1,000 km의 SMF에서 축적된 총 분산량은 +16,000 ps/nm이고 precompensation과 postcompensation이 각각 -7,290 ps/nm이므로 최상의 NRD는 +1,420 ps/nm이다. 그리고 inline DM이 적용된 경우 SMF에서 축적된 총 분산량은 집중형 DM에서와 동일하고, 첫 번째와 마지막 구획의 DCF에서의 분산량은 각각 -456 ps/nm, 나머지 18개의 DCF에서의 총 분산량은 -14,400 ps/nm이므로 최상의 NRD는 +688 ps/nm이다. 결과적으로 inline DM이 적용된 WDM 전송 시스템에서의 최상의 NRD가 집중형 DM에서보다 적게 결정되었기 때문에 입사 전력 +5 dB 이하의 모든 채널에 대한 보상이 더욱 양호하게 나타났다고 볼 수 있다. 그러나 inline DM 방식은 집중형 DM 방식보다 시스템의 전체 구조를 복잡하게 만드는 단점을 가지고 있다.

그림 5로부터 얻은 DM 방식별 최적 분산량은 집중형 DM에서는 precompensation과 postcompensation을, 그리고 inline DM에서는 첫 번째와 마지막 구획의 DCF를 통한 분산량을 동일한 값으로 동시에 변화시키면서 얻은 ‘대칭 구조의 DM’을 전제로 한 것이다. 그러나 본 논문에서 제안하는 OPC와 DM을 결합하여 시스템 성능을 개선하고자 하는 기술이 실제 시스템에도 유효하려면 집중형 DM 방식에서는 임의의 precompensation (또는 postcompensation)에 대한 최적의 postcompensation (또는 precompensation)이 결정되어야 하고, inline DM 방식에서는 첫 번째 구획(또는 마지막 구획)의 inline compensation에 대한 최적의 마지막 구획(또는 첫 번째 구획)의 inline compensation이 결정되어야 한다. 즉 집중형 DM에서는 원하는 수신 성능을 얻을 수 있는 precompensation과 postcompensation의 범위를, inline DM에서는 첫 번째 구획과 마지막 구획의 inline compensation의 범위를 구하여 실제 시스템 설계에 적용하여야 한다.

그림 7(a)는 집중형 DM 방식에서 각 채널의 입사 전력이 +4.0 dBm과 +4.3 dBm인 경우에서 전송 품질이 최악인 채널이 1 dB EOP를 얻을 수 있는 전반 구간과 후반 구간의 잉여 분산 범위를 나타낸 분산 등고선 (compensation contour)이다. 또한 그림 7(b)는 inline DM 방식에서 각 채널의 입사 전력이



(a) 집중형 DM



(b) inline DM

그림 7. 1 dB EOP를 얻을 수 있는 각 반구간의 잉여 분산 범위

+4.0 dBm, +5.0 dBm과 +6.0 dBm인 경우에서 전송 품질이 최악인 채널의 전반 구간과 후반 구간의 잉여 분산 범위를 나타낸 분산 등고선이다.

우선 그림 7(a)가 의미하는 것을 후반 구간의 잉여 분산을 기준으로 살펴보면, 집중형 DM 방식에서 +4 dBm의 입사 전력으로 모든 WDM 채널들을 1 dB EOP 이내로 전송하기 위한 후반 구간의 잉여 분산은 +670~+1,030 ps/nm (이 값은 l_{post} 가 69.7 km부터 73.3 km 사이로 결정되어야 하는 것을 의미)이고, 이 범위 내에서 결정해야 할 전반 구간의 잉여 분산은 그림 7(a)의 얇은 실선 내에서 선택하면 된다. 예를 들어, 후반 구간의 잉여 분산을 +800 ps/nm가 되게 OPC 이후부터 수신단까지 링크를 설계했다면 송신단부터 OPC까지의 전반 구간 링크는 잉여 분산이 +776 ps/nm부터 +800ps/nm의 사이의 값을 갖도록 설계하면 된다 (즉 그림 1(a)에서 수신기 바로 앞에 있는 DCF의 길이 l_{post} 를 72 km로 설계하고자 한다면 송신기 바로 다음에 있는 DCF의

길이 l_{pre} 는 72 km부터 72.25 km 사이에서 결정하면 된다). 그리고 이 경우 WDM 전송 시스템 전체의 유효 NRD 범위는 +1,576 ~ +1,800 ps/nm이다.

그림 7(a)의 위의 분석을 통해 임의의 입사 전력을 갖는 모든 채널들을 1 dB 이내의 EOP로 수신하기 위한 잉여 분산의 범위가 협소하다고 판단할 수 있으나 한 쪽 반구간의 잉여 분산 허용 범위가 넓기 때문에 WDM 전송 시스템 전체적인 관점에서는 DCF 길이 조절을 통한 분산량 제어 폭이 넓다고 할 수 있다. 물론 채널의 수신 전력을 높이고자 한다면 그림 7(a)에서 $P_s = +4.3$ dBm의 등고선과 같이 각 반구간에서 허용할 수 있는 잉여 분산 범위가 줄어들게 된다.

그리고 inline DM 방식에서 +4 dBm의 입사 전력으로 모든 WDM 채널들을 1 dB EOP 이내로 전송하기 위한 후반 구간의 잉여 분산은 +40~+608 ps/nm (이 값은 $l_{DCF,20}$ 가 2.4 km부터 9.5 km 사이로 결정되어야 하는 것을 의미)이고, 이 범위 내의 후반 구간의 잉여 분산 값에 관계한 전반 구간의 잉여 분산 범위는 그림 7(b)에서 얻은 결과에 따라 결정하면 된다. inline DM 방식은 앞서 살펴보았듯이 집중형 DM보다 전송 성능의 개선 효과가 좋기 때문에 집중형 DM의 경우 +4.3 dBm보다 큰 입사 전력인 +5 dBm과 +6 dBm에서도 전반 구간과 후반 구간의 유효 잉여 분산 범위를 얻을 수 있다 (반면 집중형 DM의 경우 각 채널의 입사 전력을 +4.3 dBm 이상으로 증가시키면 각 반구간의 유효 잉여 분산 범위를 얻을 수 없었다). 즉 inline DM 구조가 집중형 DM 구조보다 DCF 길이 조절을 통한 분산량의 제어 측면에서 보다 더 융통적인 시스템 설계가 가능하다는 것을 알 수 있다.

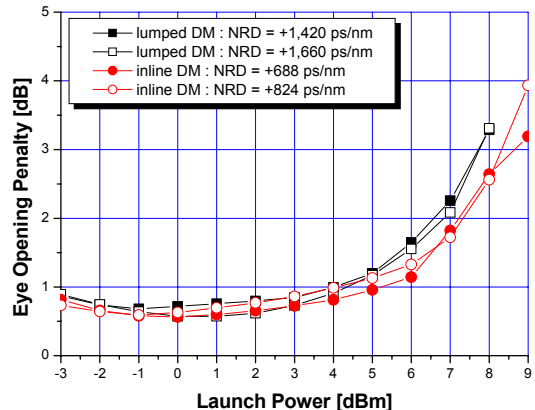


그림 8. 최악의 채널들의 EOP 비교

그림 8은 그림 7에서 얻은 각 DM 방식에서의 유효 잉여 분산 범위의 효용성을 살펴보기 위하여 집중형 DM의 경우 $l_{pre} = 71.8$ km와 $l_{post} = 71.6$ km, 즉 NRD가 +1,660 ps/nm에서, 그리고 inline DM의 경우 $l_{DCF,1} = 4.8$ km와 $l_{DCF,20} = 4.9$ km, 즉 NRD가 +824 ps/nm에서 최악의 성능을 나타내는 채널의 EOP를 그림 6로부터 얻은 각 DM 방식에서의 최악의 성능을 나타내는 EOP와 비교한 것이다. 그림 8을 통해 확인할 수 있듯이 집중형 DM 구조에서의 precompensation과 postcompensation 값을, 그리고 inline DM 구조에서 첫 번째와 마지막 inline compensation 값을 그림 5 (또는 그림 6)에서의 값과는 다르지만 그림 7로부터 구한 유효 잉여 분산 범위 내에서 선택하면 수신 성능을 최적의 경우와 거의 비슷하게 얻을 수 있는 것을 알 수 있다.

VI. 결 론

40 Gbps의 채널 전송률을 갖는 WDM 채널 24개를 하나의 SMF를 통해 동시에 전송하는 경우 색 분산과 비선형성에 의해 고품질 전송이 어려웠던 한계를 전체 전송 링크에 OPC를 위치시키고 동시에 전체 SMF에서 축적된 분산을 DCF를 통해 제어하는 집중형 DM 링크 구조와 inline DM 링크 구조로 극복하는 방법을 전산 시뮬을 통해 살펴보았다. 즉 24 채널 WDM 전송 시스템에 OPC만 둔 경우에서는 1 dB EOP를 얻을 수 있는 최대 채널의 수가 3개 정도였지만, 집중형 DM을 적용하거나 inline DM을 적용하게 되면 모든 채널을 거의 동일한 성능으로 전송할 수 있는 것을 확인하였다. 그렇게 하기 위해서는 DM의 구조에 따라 최적의 NRD 값이 결정되어야 하는데, 집중형 DM와 inline DM 모두 NRD가 0이 아닌 양의 값으로 결정되어야 하는 것을 확인하였다. 그리고 최적의 NRD를 갖게 설계된 WDM 전송 시스템에서 inline DM 구조가 집중형 DM 구조에 비해 전체 채널의 성능 면에서 다소 우수한 것을 알 수 있었다.

또한 OPC 외에 전송 링크에 DCF를 결합하여 분산을 제어하는 WDM 전송 시스템의 설계 기준을 제공하고자 OPC를 중심으로 전반 구간과 후반 구간의 입사 전력에 따른 유효 잉여 분산 범위를 각 DM 방식별로 제시하였다. 따라서 본 논문의 결과는 초고속의 채널 전송률을 갖는 장거리 WDM 전송 시스템 구현에 도움이 될 것이라고 판단된다.

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] A. R. Chraplyvy, "Limitations on lightwave communications imposed by optical-fiber nonlinearities," *J. Lightwave Technol.*, Vol.8, No.10, pp.1548-1557, 1990.
- [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] 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.
- [5] Y. Frignaca and S. Bigo, "Numerical optimization of residual dispersion in dispersion-managed systems at 40 Gb/s," in *Proc. OFC*, Baltimore, MD, pp.48-50, 2000.
- [6] 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.
- [7] D. M. Pepper and A. Yariv, "Compensation for phase distortions in nonlinear media by phase conjugation," *Opt. Lett.*, Vol.5, pp.59-60, 1979.
- [8] S. Watanabe, S. Takeda, G. Ishikawa, H. Ooi, J. G. Nielsen and C. Sonne, "Simultaneous wavelength 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.
- [9] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, 2001.
- [10] G. P. Agrawal, *Fiber-optic communication systems*, John Wiley & Sons, Inc., 2002.

- [11] Seong-Real Lee, "Compensation for the Distorted 16×40 Gbps NRZ Channels in 1,000 km NZ-DSF WDM System using MSI with Optimal Parameters," *한국통신학회논문지*, 제31권 11A호, pp.1044-1052, 2006.
- [12] ITU Recommendation "Spectral grids for WDM applications : DWDM frequency grid" *G.694.1*, 2006.
- [13] 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.

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)에이

티엔 부설연구소 연구소장

2004년~현재 국립목포해양대학교 해양전자통신공학부 조교수

<관심분야> WDM 전송 시스템, 광 솔리톤 전송

임 황 빈 (Hwang-Bin Yim)

종신회원



1983년 2월 명지대학교 전자공학과 졸업

1985년 2월 건국대학교 대학원 전자공학과 석사

2003년 2월 순천향대학교 대학원 전기전자공학과 박사

2003년 3월~현재 강원도립대학

정보통신과 교수

<관심분야> 정보 보호, 광통신