

## SMF와 DCF의 길이와 분산 계수가 불규칙하게 분포하는 분산 제어 링크

# Dispersion-managed Links with the Irregular Distribution of the Lengths and Dispersion Coefficients of the SMFs and the DCFs

이성렬

목포해양대학교 항해정보시스템 학부

Seong-Real Lee

Division of Navigational Information System, Mokpo National Maritime University, Jeollanam-do, 58628, Korea

### [요 약]

전체 광 중계 구간 모두 불규칙한 분산 계수를 갖는 단일 모드 광섬유와 분산 보상 광섬유 (DCF; dispersion compensating fiber)를 이용한 융통적인 분산 제어 링크 구조를 제안하였다. 링크의 융통적 구성은 각 전송 반 구획에서 DCF의 분산 계수를 기준으로 이들을 인위적으로 분포시켜서 가능하게 하였다. 광 위상 공액기 전의 전송 반 구획에서는 DCF의 분산 계수를 점진적으로 증가시키고, 광 위상 공액기 다음의 전송 반 구획에서는 DCF의 분산 계수를 점진적으로 감소시키는 'AD' 분포에서 왜곡된 파장 분할 다중 (WDM; wavelength division multiplexed) 신호가 최상으로 보상되는 것을 확인하였다. 따라서 왜곡된 WDM 채널의 보상 효과를 더욱 증가시키기 위해서는 광섬유의 길이, 중계 구간 당 잉여 분산뿐만 아니라 광섬유의 분산 계수에 상관없이 'AD' 분포를 선택할 필요가 있다는 것을 확인하였다.

### [Abstract]

A flexible dispersion-managed link configuration is proposed by using single-mode fibers (SMFs) and dispersion-compensating fibers (DCFs) with irregular dispersion coefficients and lengths over all fiber spans for compensating of WDM channels distortion due to the group velocity dispersion and nonlinear effects of optical fibers. The flexibility of link is enabled by artificially distributing of these fibers based on the dispersion coefficients of DCFs in each half transmission section. The simultaneous ascending and descending (AD) distribution of the DCF's coefficients before and after the optical phase conjugator, respectively, best compensates the distorted wavelength division multiplexed signals in the optical link. Therefore, to improve the compensation effect of the distorted WDM channels, AD distribution is needed to choice regardless of fiber lengths and the residual dispersion per span and fiber's dispersion coefficients.

**Key word** : Dispersion management, Optical phase conjugation, Residual dispersion per span, Irregular distribution of the length and dispersion coefficient, Net residual dispersion.

<https://doi.org/10.12673/jant.2018.22.3.240>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 3 June 2018; Revised 4 June 2018

Accepted (Publication) 19 June 2018 (30 June 2018)

\*Corresponding Author; Seong-Real Lee

Tel: +82-61-240-7264

E-mail: reallee@mmu.ac.kr

## I. 서론

전통적인 광통신 시스템에서 단일 모드 광섬유 (SMF; single mode fiber)의 그룹 속도 분산 (GVD; group velocity dispersion)은 광 펄스의 시간적 왜곡 (temporal distortion)을 일으킨다 [1]. 또한 SMF가 갖는 또 다른 본성인 비선형 특성도 광 펄스의 성능을 저하시킨다. 특히 장거리 전송을 위해 에르븀 첨가 광섬유 증폭기 (EDFA; erbium-doped fiber amplifier)와 같은 선로 증폭기를 채택한 전송 시스템에서는 이들 비선형 특성이 광 신호의 강도에 의존하기 때문에 왜곡을 더욱 심하게 한다 [2]. 그러나 분산 제어 (DM; dispersion management)와 MSSI (mid-span spectral inversion) 기술들을 광 전송 링크에 적용함으로써 광섬유의 GVD와 비선형 특성에 의해 왜곡되는 광 신호를 더욱 효과적으로 보상할 수 있다 [3]-[5].

DM은 광 전송 링크를 구성하는 광 중계 구간 (fiber span)마다 정상적인 분산 계수 (dispersion coefficient)를 갖는 SMF에 이상적인(anomalous) 분산 계수를 갖는 분산 보상 광섬유 (DCF; dispersion compensating fiber)를 삽입시켜 경로 평균 (path-averaged) GVD를 감소시키는 방법이다 [6]. 반면 MSSI는 전체 전송 링크 중간에 위치한 광 위상 공액기 (OPC; optical phase conjugator)가 송신기부터 OPC까지 전송되면서 왜곡된 광 신호를 위상 공액시킨 후 나머지 구획을 전송시켜서 원 신호와 매우 흡사한 수신 신호를 얻는 방법이다 [7].

그러나 DM은 광 신호가 비선형 현상에 의한 왜곡된 신호의 보상에는 한계가 있고 더욱이 파장 분할 다중 (WDM; wavelength division multiplexing) 시스템의 경우 각 채널의 파장이 모두 다르고 결과적으로 채널별 파장에 따라 다르게 축적되는 분산량을 하나의 구조로 보상하는 것이 쉽지 않다는 문제점을 지니고 있다[8]. 또한 MSSI는 이론적으로 광 신호의 전력 과 분산 분포가 OPC를 중심으로 대칭이 되어야 하는데 광섬유가 갖는 손실 때문에 이를 구현하기 어렵다는 단점이 있다[9].

그러나 저자는 그간의 연구를 통해 WDM 전송 시스템의 DM 링크에 OPC를 결합시켜 각각이 갖는 한계를 극복할 수 있다는 것을 보였다 [10]. 더욱이 DM과 MSSI가 결합된 링크에서 OPC의 위치가 전체 전송 링크 중간에만 올 수 밖에 없고, 전통적인 DM에서 SMF의 길이와 DCF의 길이가 고정되어야 하기 때문에 갖게 되는 제한된 형태의 광 네트워크 구조를 극복하기 위한 다양한 링크 구성법을 제안하였다 [11],[12].

그러나 DM 링크 구조를 융통적으로 구성하기 위해 저자가 제안한 구조는 SMF 길이와 중계 구간 당 잉여 분산 (RDPS; residual dispersion per span)을 인위적으로, 또는 랜덤하게 분포시키는 방안이 국한되어 있었다. 하지만 실제적으로 광 링크를 구성시키는데 있어 다양한 특성의 광섬유도 고려하여야 한다. 즉 DM을 구성하는 SMF와 DCF의 분산 계수를 고정된 하나의 값으로 가정하여 설계하지 않고 다양한 값을 고려하여 설계할 수 있어야 한다. 만일 SMF와 DCF의 분산 계수를 각각 하나 이상으로 고려하여 DM 링크를 설계하게 되면 고정된 RDPS를 얻

기 위한 SMF와 DCF의 길이들이 달라질 수밖에 없고 그로 인해 중계 구간의 길이도 달라져서 결국 융통적 형태의 DM 구조를 얻을 수 있다.

저자의 그간 연구들에서는 SMF의 분산 계수 값으로 가장 일반적인 17 ps/nm/km만을 고정적으로 채택하였고, DCF의 분산 계수 값은 -100 ps/nm/km를 채택하여 DM 링크를 제안하였다. 본 연구에서는 하나의 중계 구간을 구성하는 SMF의 길이와 분산 계수가 각각 56 km부터 100 km까지와 16.87 ps/nm/km로부터 17.10 ps/nm/km로 랜덤한 간격으로 변동되고, 동시에 DCF의 길이와 분산 계수가 각각 10.5 km부터 20.5 km까지와 -70 ps/nm/km로부터 -100 ps/nm/km로 랜덤한 간격으로 변동시켜 구성하였을 경우 24 채널 × 40 Gbps WDM 신호의 보상 효과를 분석해 본다. 또한 이들로 구성된 링크의 융통적 구조를 위해 한 중계 구간을 이루는 SMF와 DCF의 배열을 DCF의 분산 계수 값을 기준으로 중계 구간이 늘어날수록 점차 증가시키거나 감소시키는 구조를 만들고, 이들을 OPC를 중심으로 반 구획 (half transmission section) 씩 조합하여 만들 수 있는 4가지 형태의 링크에 대해 WDM 신호의 성능 평가를 수행하고자 한다.

## II. 시뮬레이션 모델링과 성능 분석

그림 1은 24 채널 × 40 Gbps의 WDM 송신기(Tx), 수신기(Rx), midway OPC와 DM 전송 링크의 전체 구조를 나타낸 것이다. DM 전송 링크는 midway OPC를 중심으로 각각 10개의 광 중계 구간 (fiber span)으로 구성된다. 각 중계 구간을 구성하는 광섬유의 배열은 Tx부터 midway OPC까지 (이를 ‘첫 번째 전송 반 구획’이라 함)는 DCF 다음에 SMF가 오도록 한 반면 midway OPC부터 Rx까지 (이를 ‘두 번째 전송 반 구획’이라 함)는 그 반대의 배열, 즉 SMF가 DCF 앞에 오도록 하였다. 이는 전체적으로 보았을 때 midway OPC를 중심으로 각 광섬유의 배열이 대칭이 되어 MSSI의 전체 조건을 만족시키기 위해서이다.

본 논문의 목적인 각 전송 반 구획에서 SMF와 DCF의 불규칙한 분포는 각각의 분산 계수와 길이가 중계 구간별로 불규칙하다는 의미이다. 반면 이들 광섬유들은 DCF의 분산 계수 ( $D_{DCF}$ )를 기준으로 인위적으로 분포하도록 (artificial distribution) 하였다. 즉 표 1과 같이 각 전송 반 구획의 모든 중계 구간마다 삽입되어 있는 DCF의 분산 계수가 적은 순서대로 (즉 중계 구간 수가 증가할수록 DCF의 분산 계수가 점점 더 증가됨, 이를 ascending 분포라 함) 배열되도록 하던가, DCF의 분산 계수가 큰 순서대로 (즉 중계 구간 수가 증가할수록 DCF의 분산 계수가 점점 더 감소됨, 이를 descending 분포라 함) 배열되도록 하였다. 또한 각 전송 반 구획의 ascending 분포와 descending 분포를 조합하여 4가지 형태로 링크를 구성하였다. 즉 첫 번째 전송 반 구획의 분포와 두 번째 전송 반 구획 분포 모두 ascending인 경우 (이를 ‘AA’ 구조라고 함), 첫 번째 전송

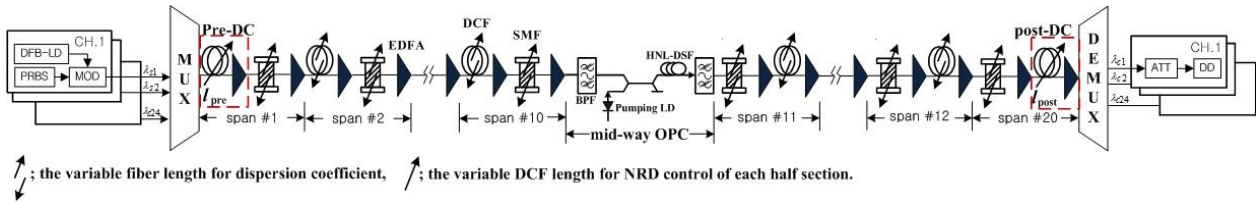


그림 1. 24x40 Gbps WDM 전송 시스템 구조  
 Fig. 1. Configuration of 24x40 Gbps WDM transmission system.

표 1. 광 중계 구간에서 SMF와 DCF의 인위적 분포 패턴

Table 1. Patterns of the artificial distributed SMF and DCF in fiber spans.

Distribution	Symbol	Fiber span number									
		1, 11	2, 12	3, 13	4, 14	5, 15	6, 16	7, 17	8, 18	9, 19	10, 20
ascending	$D_{DCF}$	-100	-98	-95	-90	-85	-80	-78	-76	-73	-70
	$l_{DCF}$	13.6	10.5	12	19	17	16	20.5	20	13	17
	$l_{SMF}$	80	61	67	100	85	75	94	90	56	70
	$D_{SMF}$	17.00	16.87	17.01	17.10	17.00	17.07	17.01	16.89	16.95	17.00
descending	$D_{DCF}$	-70	-73	-76	-78	-80	-85	-90	-95	-98	-100
	$l_{DCF}$	17	13	20	20.5	16	17	19	12	10.5	13.6
	$l_{SMF}$	70	56	90	94	75	85	100	67	61	80
	$D_{SMF}$	17.00	16.95	16.89	17.01	17.07	17.00	17.10	17.01	16.87	17.00

반 구획의 분포와 두 번째 전송 반 구획 분포 모두 descending인 경우 (이를 ‘DD’ 구조라고 함), 첫 번째 전송 반 구획의 분포는 ascending이지만 두 번째 전송 반 구획 분포는 descending인 경우 (이를 ‘AD’ 구조라고 함), 마지막으로 첫 번째 전송 반 구획의 분포는 descending이지만 두 번째 전송 반 구획 분포는 ascending인 경우 (이를 ‘DA’ 구조라고 함)의 4가지 구조 각각을 통해 수신된 WDM 신호의 보상 특성을 분석해 보고자 한다.

각 중계 구간에서 DCF는 SMF에서 축적된 분산을 제거하거나 줄여주기 위하여 삽입된다. 본 연구에서는 RDPS를 0 ps/nm로 하였다. 즉 모든 중계 구간에서 SMF에 축적된 분산량을 DCF를 통해 모두 제거하는 구조로 모델링하였다. 이를 위해 DCF의 길이 ( $l_{DCF}$ )와 SMF 길이 ( $l_{SMF}$ )를 특별한 원칙 없이 (이에 의해 불규칙 분포라고 정의함) 선택하였고, 이 둘과 DCF의 분산 계수에 종속되어 SMF의 분산 계수 ( $l_{SMF}$ )가 결정되도록 하였다.

SMF의 손실 계수는 0.2 dB/km로, 비선형 계수는 1.35  $W^{-1}km^{-1}$ 로 모든 중계 구간에서 동일하게 가정하였다. 또한 DCF의 손실 계수는 0.6 dB/km로, 비선형 계수는 5.06  $W^{-1}km^{-1}$ 로 모든 중계 구간에서 동일하게 가정하였다.

의사 선형 전송 (pseudo-linear transmission) 시스템에서 최적의 보상을 얻을 수 있는 전체 전송 링크에서 축적된 분산량 (NRD; net residual dispersion)은 0 ps/nm이 아닌 그 근처의 값이라고 보고되었다 [13]. 본 연구에서 각 중계 구간의 RDPS가 0 ps/nm이기 때문에 자연스럽게 NRD도 0 ps/nm가 될 수 밖에 없다. 하지만 참고 문헌 [13]의 결과를 검토하기 위해서 NRD에 변화를 주면서 24개 WDM 채널들을 최적으로 보상할 수 있는

NRD 값을 찾아야 한다. 즉 24개 WDM 채널 모두를 최선으로 보상할 수 있는 값이 되도록 NRD를 조절하는 역할을 특정 중계 구간이 수행하여야 한다. 본 연구에서는 그림 1에서 보여지듯이 두 가지의 NRD 조절 방법을 사용하였다. 즉 첫 번째 중계 구간의 DCF를 통한 pre-DC (dispersion calibrator)와 마지막 중계 구간의 DCF를 통한 post-DC를 사용하였다.

좀 더 구체적으로 설명하면, AA, AD, DA, DD 분포 모두 pre-DC만을 사용하여 NRD를 조절하거나 post-DC만을 사용하여 NRD를 조절하는 구조로 링크를 설계하였다. 즉 pre-DC만을 사용하여 NRD를 조절한다는 것은 표 1에서 나머지 모든 파라미터는 그대로 두고 첫 번째 중계 구간의 DCF의 길이를 0.1 km 간격으로 늘리거나 줄여서 최적의 NRD를 찾는 것을 의미한다. 반면 post-DC만을 사용하여 NRD를 조절한다는 것은 표 1에서 나머지 모든 파라미터는 그대로 두고 마지막 20번째 중계 구간의 DCF의 길이를 0.1 km 간격으로 늘리거나 줄여서 최적의 NRD를 찾는 것을 의미한다.

본 연구에서 제안하는 SMF와 DCF의 길이와 분산 계수가 불규칙하고, 이들이 인위적으로 분포하는 링크를 전파하는 WDM 채널의 왜곡 보상 정도를 객관적으로 분석하기 위해서는 기준, 즉 비교 대상이 필요하다. 이를 위해서 저자는 전통적인 DM 링크를 비교 대상으로 삼았다. 즉 표 1에 정리된 반 전송 구획의 SMF 길이와 분산 계수의 평균은 각각 78 km와 17.00 ps/nm이고, DCF 길이와 분산 계수의 평균은 각각 15.6 km와 -85 ps/nm이기 때문에 모든 중계 구간에서 이들 값들이 균일하게 분포 (uniform distribution)하는 링크를 비교 대상으로 하였다. 각 경우 WDM 채널의 수신 성능 평가는 눈 열림 페널티 (EOP; eye opening penalty)를 통해 수행하였다.

그림 1의 24 채널 WDM 전송을 위한 송신기(Tx)들의 중심 파장은 100 GHz (즉 0.8 nm) 간격으로 1,550 nm부터 1,568.4 nm로 가정하였고, 그 광원은 분포 제환 레이저 다이오드 (DFB-LD; distributed feedback laser diode)로 가정하였다. 각 DFB-LD는 서로 독립적인 128(=2<sup>7</sup>) 의사 랜덤 비트열 (PRBS; pseudo random bit sequence)에 의해 소광비 (ER; extinction ratio)가 10 dB인 2차 가우시안 펄스의 RZ (return-to-zero)를 발생시키는 것으로 모델링하였다.

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. 수신 대역폭은 0.65 x 비트율로 가정하였다. 전체 전송로 중간에 위치한 OPC는 HNL-DSF (highly nonlinearity – dispersion shifted fiber)를 비선형 매질로 갖는 구조로 모델링하였고, 그 세부 구성과 파라미터 값은 저자의 DM 관련 논문과 동일하게 모델링하였다 [10]-[12].

광전송 링크를 통해 손실과 비선형 효과의 영향을 겪으면서 전파하는 각 채널들은 비선형 슈뢰딩거 방정식 (NLSE; nonlinear Schrödinger equation)에 의해 표현된다[14]. 본 논문에서 40 Gbps의 24 채널 WDM 전송을 위한 NLSE의 수치적 분석은 단계 분할 푸리에 (SSF; split-step Fourier) 기법[14]에 따라 Matlab으로 구현하여 이루어졌다.

### III. 시뮬레이션 결과 및 검토

그림 2는 표 1의 4가지 분포에 따라 구성된 전송 링크 각각에 입사 전력이 5 dBm인 24개 채널들을 전송한 경우 수신 성능이 가장 안 좋은 채널 (최악 채널)의 EOP를 NRD 변화에 따라 나타낸 것이다. NRD 외에 DCF 분산 계수의 인위적 분포에 따라라도 수신 성능이 달라지는 것을 알 수 있다. 결과적으로 그림 2를 통해 AA 분포에서는 6-10 ps/nm, AD 분포에서도 6-10 ps/nm, DA 분포에서는 4.2-10.5 ps/nm, DD 분포에서도 4.9-10.5 ps/nm에서 최악 채널의 EOP가 가장 낮게 얻어져서 최적의 NRD가 되는 것을 알 수 있다.

그림 3은 그림 2로부터 얻어진 최적 NRD들 중 하나의 NRD, 즉 AA 분포에서는 10 ps/nm, AD 분포에서도 8 ps/nm, DA 분포에서는 9.8 ps/nm, DD 분포에서도 10.5 ps/nm로 설정된 링크 각각에 WDM 채널들을 전송하는 경우 입사 전력에 따른 최악 채널의 EOP를 나타낸 것이다. 보상 성능의 비교 분석을 위해 NRDrk 8.5 ps/nm로 설정된 균일 분포 링크에서의 최악 채널의 EOPeh 동시에 나타냈다.

광통신 시스템에서 수신 성능 기준은 주로 1 dB EOP를 사용한다. 이는 10<sup>-12</sup> 비트 에러율 (BER ; bit error rate)에 상응하는 값이다 [15]. 그림 3의 결과를 1 dB EOP를 기준으로 비교 분석해 보면, 균일 분포 링크에서 1 dB EOP가 되는 최대 입사 전력

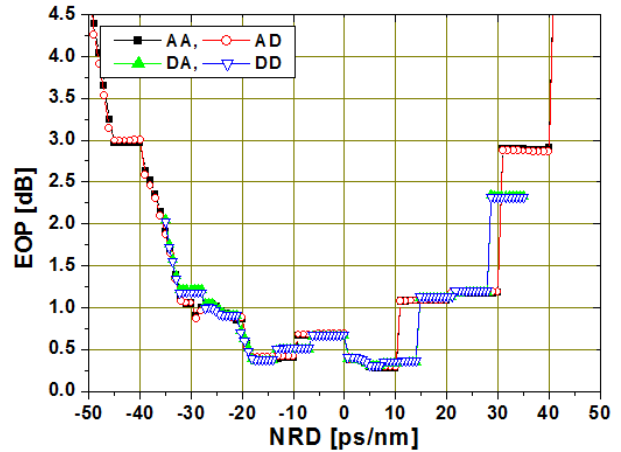


그림 2. NRD에 따른 최악 채널의 EOP  
Fig. 2. The EOP of the worst channel as a function of NRD.

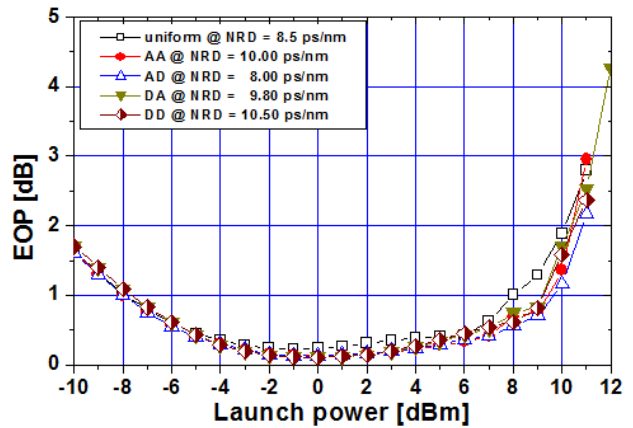


그림 3. 최적 NRD에서 입사 전력 대 최악 채널의 EOP  
Fig. 3. The EOP of the worst channel versus the launch power at the optimal NRD.

의 크기는 약 8 dBm인 반면, AD 분포에서는 최대 입사 전력이 이보다 1.5 dB 이상 높아지는 것을 알 수 있다.

그림 4 (a), (b), (c) 각각은 균일 분포와 AD, DA의 2가지 인위적인 분포를 갖는 링크에 9 dBm의 입사 전력으로 WDM 채널들을 전송한 경우 최악 채널의 아이 다이어그램들을 나타낸 것이다. 수신된 채널 신호들의 모양이 분포 패턴에 따라 조금 차이는 나지만 전반적으로 본 논문에서 제안하고 있는 링크 구조, 그 중에서도 DCF 분산 계수 기준으로 한 AD와 DA 구조에서의 왜곡된 WDM 채널들의 보상 효과가 우수하다는 것을 확인할 수 있다. 더욱이 그림 4에서 보여지듯이 9 dBm이라는 고전력 전송에서도 매우 탁월한 DM 링크 구조라는 것을 확인하였다.

그림 2의 결과를 다시 한번 다른 관점에서 살펴보면, 입사 전력이 상관없이 각 링크 구조에서 EOP를 1 dB 이하로 만들 수 있는 NRD가 최적 NRD 외에도 있다는 것을 알 수 있다. 최적 NRD를 포함하여 1 dB 이하의 EOP를 얻을 수 있는 NRD 범위

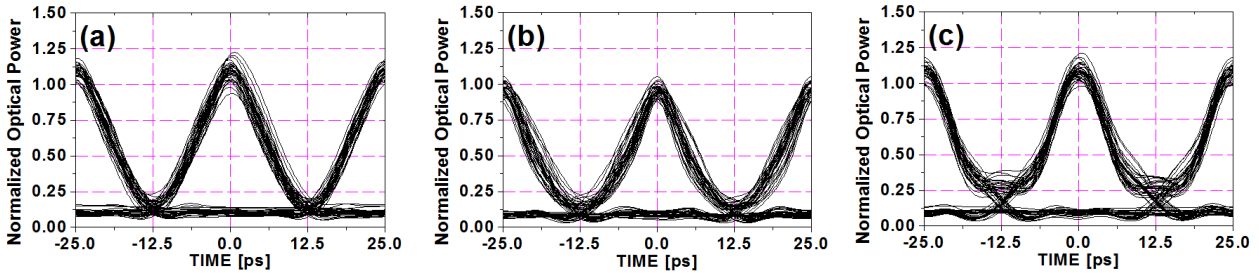


그림 4. 입사 전력이 9 dBm인 WDM 채널 중 최악 채널의 아이 다이어그램: (a) NRD = 8.5 ps/nm로 설정된 균일 분포, (b) NRD = 8.0 ps/nm로 설정된 'AD' 분포, (c) NRD = 9.8 ps/nm로 설정된 'DA' 분포

Fig. 4. Configuration of 24x40 Gbps WDM transmission system. Eye diagram of the worst channel among the WDM channels with the launch power of 9 dBm in the uniform distribution with NRD = 8.5 ps/nm (a), in 'AD' distribution with NRD = 8.0 ps/nm (b), and in 'DA' distribution with NRD = 9.8 ps/nm ©.

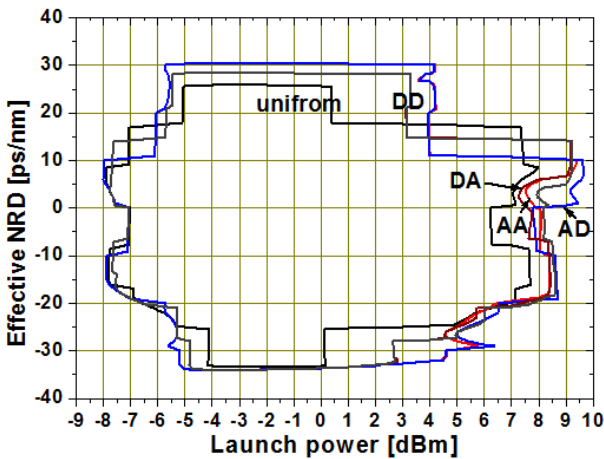


그림 5. 유효 NRD 등고선  
Fig. 5. The effective NRD contours.

를 유효 NRD 등고선 (contour)이라고 정의하였다. 그림 5는 균일 분포를 비롯하여 본 연구에서 제안하고 분석하고 있는 4가지 인위적 분포의 링크에서 얻어진 입사 전력에 따른 유효 NRD 등고선을 나타낸 것이다. 그림 5의 결과를 살펴보면, 제안한 4가지 인위적 분포 링크에서의 유효 NRD 등고선의 크기가 전반적으로 균일 분포의 링크보다 커서 제안한 인위적 분포 링크가 균일 분포 링크보다 왜곡된 WDM 채널의 보상에 유리하고, 특히 입사 전력 9 dBm 이상의 고전력 전송 시스템에서는 링크의 구조를 AD, 즉 첫 번째 반 구획에서는 중계 구간이 증가할수록 분산 계수의 크기가 큰 순서대로 DCF를 분포시키고, 두 번째 반 구획에서는 그 반대의 순서로 DCF를 분포시키는 구조의 링크가 가장 유리하다는 것을 확인할 수 있다.

#### IV. 결 론

SMF와 DCF의 길이와 분산 계수가 불규칙하고, DCF의 분산 계수를 기준으로 중계 구간이 증가할수록 그 분산 계수 값을 점점 증가시키거나 감소시키는 분포들을 조합한 인위적 분포 구조가 왜곡된 24 채널 x 40 Gbps의 WDM 신호의 보상에

미치는 영향을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 살펴보았다. 제안한 4개의 인위적 분포 구조 중 AD, 즉 첫 번째 반 구획에서는 중계 구간이 증가할수록 분산 계수의 크기가 큰 순서대로 DCF를 분포시키고, 두 번째 반 구획에서는 그 반대의 순서로 DCF를 분포시키는 구조가 왜곡된 WDM 채널을 보상하는데 가장 우수한 구조라는 것을 확인하였다.

본 연구에서 얻어진 이같은 결과는 SMF의 분산 계수가 17 ps/nm로, DCF의 분산 계수가 -100 ps/nm로 고정되었지만 한 중계 구간을 구성하는 각각 중 하나의 길이가 인위적으로 분포시킨 경우에서의 결과와 어느 정도 일치한다. 결론적으로 SMF 길이와(또는) RDPS뿐만 아니라 광섬유의 분산 계수를 인위적으로 분포시키는 구조의 DM 링크에서도 (특히 AD와 DA 분포) 균일 분포의 DM 링크에서보다 WDM 채널의 왜곡 보상 효과를 더욱 늘릴 수 있다고 판단된다.

#### REFERENCES

- [1] M. D. Pelusi, "WDM signal all-optical precompensation of Kerr nonlinearity in dispersion-managed fibers," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 25, No. 1, pp. 71-74, 2013.
- [2] M. F. Uddin, A. B. M. N. Doulah, A. B. M. I. Hossain, M. Z. Alam, and M. N. Islam, "Reduction of four-wave mixing effect in an optical wavelength-division multiplexed system by utilizing different channel spacing and chromatic dispersion schemes," *Optical Engineering*, Vol. 42, No. 9, pp. 2761-2767, 2003.
- [3] X. Xiao, C. Yang, S. Gao, and Y. Tian, "Partial compensation of Kerr nonlinearities by optical phase conjugation in optical fiber transmission systems without power symmetry," *Optics Communications*, Vol. 265, No. 1, pp. 326-330, 2006.
- [4] A. Chowdhury and R. J. Essiambre, "Optical phase conjugation and pseudolinear transmission," *Optics Letters*,

- Vol. 29, No. 10, pp. 1105-1107, 2004.
- [5] P. Minzioni and A. Schiffrini, "Unifying theory of compensation techniques for intrachannel nonlinear effects," *Optics Express*, Vol. 13, No. 21, pp. 8460-8468, 2005.
- [6] P. M. Lushnikov, "Oscillating tails of a dispersion-managed soliton," *Journal of the Optical Society of America B*, Vol. 21, No. 11, pp. 1913-1917, 2004.
- [7] X. Tang and Z. Wu, "Reduction of intrachannel nonlinearity using optical phase conjugation," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 17, No. 9, pp. 1863-1865, 2005.
- [8] M. A. Talukder, and M. N. Islam, "Performance of bi-end compensation in a wavelength-division multiplexed system considering the effect of self phase modulation," *Optical Engineering*, Vol. 44, No. 11, pp. 115005-1-115055-6, 2005.
- [9] S. Watanabe and M. Shirasaki, "Exact compensation for both chromatic dispersion and Kerr effect in a transmission fiber using optical phase conjugation", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 14, No. 3, pp 243-248, 1996.
- [10] S. R. Lee, "Effects of residual dispersion in half transmission section on net residual dispersion in optical transmission links with dispersion management and mid-span spectral inversion compensation characteristics of distorted WDM signals depending on distribution patterns of SMF length and RDPS," *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 18, No. 5, pp. 455-460, 2014.
- [11] S. R. Lee, "Dispersion managed optical transmission links with an artificial distribution of the SMF length and residual dispersion per span," *Journal of Information and Communication Convergence Engineering (JICCE)*, Vol. 12, No. 2, pp. 75 ~ 82, June 2014.
- [12] S. R. Lee, "Compensation for the distorted WDM channels in the long-haul transmission link with the randomly distributed SMF lengths and RDPS," *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 19, No. 4, pp. 323-329, Aug. 2015.
- [13] 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 Photonics Technology Letters*, Vol. 12, No. 12, pp. 1624-1626, 2000.
- [14] G. P. Agrawal, *Nonlinear fiber optics*, 3rd ed. San Francisco:CA, Academic Press, 2001.
- [15] N. Kikuchi and S. Sasaki, "Analytical evaluation technique of self-phase modulation effect on the performance of cascaded optical amplifier systems," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 13, No. 5, pp. 868-878. 1995.



**이 성 렬 (Seong-Real Lee)**

1990년 2월 : 한국항공대학교 항공통신정보공학과 (공학사), 1992년 8월 : 한국항공대학교 대학원 통신정보공학과 (공학석사)  
 2002년 2월 : 한국항공대학교 대학원 통신정보공학과 (공학박사), 2002년 6월 ~ 2004년 2월 : (주)에이티엔 기술연구소장  
 2004년 3월 ~ 현재 : 국립목포해양대학교 항해정보시스템학부 교수  
 ※ 관심분야 : WDM 전송 시스템, 광의 비선형 현상 분석, 광 솔리톤 전송