

# 전체 잉여 분산이 영인 WDM 전송 링크에서 광 중계 거리 당 잉여 분산 제어를 통한 성능 향상

## Performance Improvements through Controlling Residual Dispersion Per Span in WDM Transmission Links with Zero Net Residual Dispersion

이성렬\*

Seong-Real Lee\*

### 요 약

전체 잉여 분산 (NRD; net residual dispersion)이 영인 inline 분산 제어 (DM; dispersion management)가 적용된 광전송 링크에서 precompensation, postcompensation과 광 중계 거리 당 잉여 분산 (RDPS; residual dispersion per span)의 제어를 통해  $24 \times 40$  Gbps WDM 신호의 고품질 전송을 연구하였다. 시스템 성능을 양호하게 하는 RDPS 값은 WDM 채널 입사 전력에 의존하지만, 비교적 넓은 입사 전력 범위를 갖는 WDM 신호들의 시스템 성능을 동시에 효율적으로 개선할 수 있는 최적 RDPS는 210~230 ps/nm인 것을 확인하였다. 또한 RDPS가 증가할수록 최악 채널의 눈 열림 패널티 (EOP; eye opening penalty)를 1 dB 이하로 만드는 유효 입사 전력 범위가 증가되는 것을 확인하였다.

### Abstract

High-quality transmission of  $24 \times 40$  Gbps WDM signals obtained through controlling residual dispersion per span (RDPS) in optical transmission links with zero net residual dispersion (NRD) of inline dispersion management (DM) of optical transmission links is researched. It is confirmed that RDPS values, which is improving system performance, depends on launch power of WDM channels, but optimal RDPS, which can simultaneously improve WDM signals with relative wide launch power ranges, becomes to be 210~230 ps/nm. Also, it is shown that effective launch power range that making eye opening penalty (EOP) of worst channel to below 1 dB is more increased as RDPS is more increased.

Key words : Inline Dispersion management, Net residual dispersion, Residual dispersion per span, WDM, pre(post)compensation, OPC.

### I. 서 론

여러 개의 파장을 하나의 광섬유로 전송하는 파장

분할 다중 (WDM; wavelength division multiple- xing) 시스템의 과제는 전송 용량을 수 Tbps까지 올리는 것이다. 이러한 대용량 전송을 위해서는 채널 간격

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

- 제1저자 (First Author) : 이성렬
- 투고일자 : 2009년 9월 4일
- 심사(수정)일자 : 2009년 9월 7일 (수정일자 : 2009년 10월 23일)
- 게재일자 : 2009년 10월 30일

을 좁혀서 채널수를 늘리거나, 채널 당 전송 속도를 높여야 한다. 채널 간격은 고밀도 WDM (DWDM; dense WDM) 시스템에서의 100 GHz (즉 0.8 nm)로부터 50 GHz (0.4 nm)로 좁아지고 있으며, 채널 당 전송 속도는 10 Gbps에서 40 Gbps로 높아지고 있는 추세이다. 그러나 전송 속도가 높아지면 수신단에서 요구되는 광 신호 대 잡음비 (OSNR; optical signal power to noise power)가 높아지고 광섬유가 갖는 색 분산 (chromatic dispersion)에 더욱 민감해진다[1]. 또한 채널 간격이 좁아지게 되면 광섬유에서의 Kerr 효과에 의한 비선형 현상의 영향을 더 많이 받게 된다 [2]. 따라서 광전송 링크 기술은 다양한 기술들을 접목하여 이런 문제점들을 동시에 해결할 수 있어야 한다.

광섬유에서 축적되어 광 신호에 왜곡을 일으키는 색 분산의 영향을 제거하거나 줄여주기 위한 대표적인 링크 기술로 주 전송로로 쓰이는 단일 모드 광섬유 (SMF; single mode fiber)나 비 영 분산 천이 광섬유 (NZ-DSF; non zero - dispersion shifted fiber)와 반대 특성을 갖는 분산 보상 광섬유 (DCF; dispersion compensating fiber)나 분산 보상 모듈 (DCM; dispersion compensating module)을 주 전송로에 부가적으로 삽입 또는 추가하는 분산 제어 (DM; dispersion management)가 있다. DM을 적용하여 색 분산 효과를 최소화하기 위한 전송 링크의 설계는 전송로 가장 앞단에서 미리 DCF나 DCM을 통해 제어하는 precompensation, 전송로 가장 끝단에서 제어하는 postcompensation, 전송 링크를 구성하는 광 중계 거리 당 잉여 분산량 (RDPS; residual dispersion per span), 전송 링크 최종단에서 축적된 전체 분산량으로 정의되는 전체 잉여 분산량 (NRD; net residual dispersion) 등을 광 신호의 전송 방식, 중계 거리, 전송 속도, 채널수 등에 따라 최적화하여야 한다[3]. 그러나 시스템의 구조가 복잡할수록, 특히 대용량 WDM 전송인 경우에 이들의 최적화가 쉽지 않다.

광전송 링크에서의 색 분산뿐만 아니라 비선형 효과를 보상하기 위한 기술로는 광 위상 공액 (optical phase conjugation)이 있다[4]. 그러나 광 위상 공액 기술에서 비선형 효과를 보상하기 위해서는 광 신호의 전력 분포가 광 위상 공액기 (OPC; optical phase

conjugator)를 중심으로 대칭이 되어야 하는 한계를 안고 있다[5]. 본 논문의 저자는 그동안의 연구를 통해 OPC가 DM 기술과 결합하면 광 전력 대칭의 문제가 완화되어 성능 저하에 대한 한계가 개선되는 것을 보였다[6],[7]. 하지만 전송 링크에 OPC와 DM을 단순히 결합하는 것으로 OPC를 중심으로 하는 전력 대칭의 문제가 완벽하게 해결되지 않기 때문에 광 신호들의 최선의 성능 개선을 위해서는 이의 보완이 이루어져야 한다. 이것은 시스템의 구조에 따르는 최적의 precompensation, postcompensation, NRD 등의 도출을 통해 이루어지는 것을 확인하였다. 즉 DM을 OPC와 결합하면 단순한 전송 링크에서의 성능보다 개선된 성능이 얻어지지만 보다 나은 성능 개선을 위해서는 DM 링크의 구체적인 구조가 복잡해져야 한다.

따라서 본 논문에서는 광 중계 간격마다 축적된 분산을 DCF를 통해 제어하는 inline DM 기술을 OPC와 결합시키는 전송 링크 구조에서 보다 간단한 DM 구조로 성능을 개선시킬 수 있는 설계 방법을 고찰하고자 한다. 이는 우선 OPC가 전체 전송로 중간에 위치하고, NRD가 0 ps/nm가 되도록 precompensation, postcompensation와 RDPS를 고정시킨 링크 구조에서 WDM 채널 입사 전력 (launch power)에 관계하는 최적의 RDPS를 도출하여 이루어진다. 본 논문에서 제안하는 전송 링크는 전송 속도가 40 Gbps인 NRZ 형식의 24 채널 WDM 전송을 대상으로 한다. 광 중계 구간의 광섬유는 SMF이고, 수신 신호의 성능 평가는 눈 열림 패널티 (EOP; eye opening penalty)를 통해 이루어진다.

## II. WDM 전송 시스템의 구성

그림 1은 전송 링크에 inline DM이 적용되고 전체 전송 거리 중간에 OPC를 위치시킨 24 채널 WDM 전송 시스템의 전체 구조를 나타낸 것이다. 그림 1의 WDM 전송 시스템의 24개 송신기(Tx)는 분포 제환 레이저 다이오드 (DFB-LD; distributed feedback laser diode)로 가정하였고, 채널 1과 24의 DFB-LD의 중심 파장은 각각 1,550 nm와 1,568.4 nm로 하고 각 채널

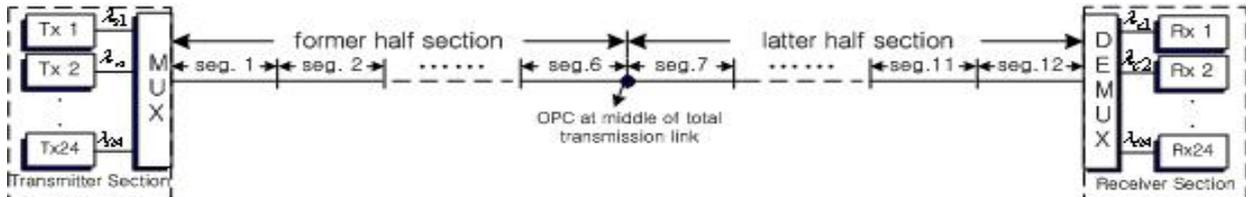


그림 1. WDM 전송 시스템의 구조  
Fig. 1. Configuration of WDM transmission system.

의 파장 간격은 ITU-T G.694.1의 권고에 따라 100 GHz (즉 0.8 nm)로 모델링하였다. 각 DFB-LB는 서로 독립적인 128(=27) 의사 랜덤 비트열 (PRBS; pseudo random bit sequence)에 의해 외부적으로 변조되는 것으로 모델링하였다. 이 때 외부 변조기로부터 발생하는 변조 파형 형식은 2차 가우시안 펄스의 NRZ로 모델링하였다.

24개의 WDM 채널 신호들은 다중화기 (MUX; multiplexer)에서 다중화된 후 광 링크로 전송된다. 전체 광전송 링크는 MUX부터 OPC까지의 전반 구간 (former half section)과 OPC부터 역다중화기 (DEMUX)까지의 후반 구간 (latter half section)으로 나누어진다. 다중화되어 전송되는 24개 채널 신호들은 전체 전송로 중간에 위치한 OPC에서 공액 변환되어 나머지 전송 구간을 전파한 후 DEMUX에서 각 채널별로 분리된 후 수신기(Rx)로 보내진다. OPC는 참고 문헌 [8]에서와 동일한 파라미터를 갖는 HNL-DSF (highly nonlinearity - dispersion shifted fiber)를 비선형 매질로 갖는 구조로 모델링하였다. 그리고 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.

광전송 링크를 통해 손실과 비선형 효과의 영향을 겪으면서 전파하는 각 채널들은 비선형 슈뢰딩거 방정식 (NLSE; nonlinear Schrödinger equation)에 의해 표현된다[9]. NLSE를 단계 분할 푸리에 (SSF; split-step Fourier) 기법에 따라 시뮬레이션 하였다.

III. inline 분산 제어 전송 링크

그림 1의 전송 링크의 구조는 우선 전반 구간과

후반 구간 모두 전송 세그먼트 (segment)를 기본 단위로 하여 구성하였고, 각 전송 구간에서 세그먼트의 수는 각각 6개로 하였다. 분산 분포가 OPC를 중심으로 대칭이 되면서 inline 분산 보상이 되도록 전반 전송 구간에서는 그림 2(a)와 (b)에 나타난 것처럼 SMF 전송 구획(span) 전에 DCF 전송 구획을 두고, 반면 후반 전송 구간에서는 그림 2(c)와 (d)에 나타난 것처럼 SMF 전송 구획 다음에 DCF 전송 구획을 두는 구조로 설계하였다.

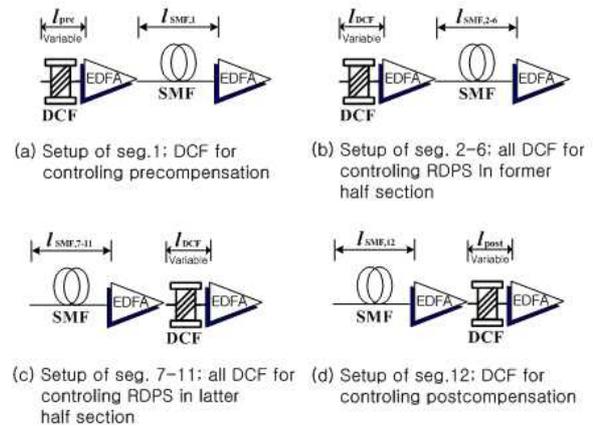


그림 2. 각 전송 세그먼트의 구성  
Fig. 2. Setup of each transmission segments.

모든 세그먼트에서 SMF 구획의 길이  $l_{SMF}$ 는 80 km로 고정하였고, SMF의 분산 계수  $D_{SMF}$ 는 17 ps/nm/km, 손실 계수  $\alpha_{SMF}$ 는 0.2 dB/km, 비선형 계수  $\gamma_{SMF}$ 는 1.41 W<sup>-1</sup>km<sup>-1</sup>(@1,550 nm)로 가정하였다. 따라서 각 SMF 구획에서 축적된 총 분산량은 1,360 ps/nm (= 17 ps/nm/km × 80 km)이다. 그리고 모든 세그먼트들의 DCF의 분산 계수  $D_{DCF}$ 는 -100 ps/nm/km로,  $\alpha_{DCF}$ 는 0.4 dB/km, 비선형 계수  $\gamma_{DCF}$ 는 4.83 W<sup>-1</sup>km<sup>-1</sup>(@1,550 nm)로 가정하였다.

그림 2에 표현하였듯, 그림 1의 전송 링크 최종단

에서의 NRD가 0 ps/nm가 되도록 전반 구간의 2~6 번째 DCF와 후반 구간의 7~11 번째 DCF들은 RDPS를 결정한다. 이는 식 (1)에 따라 DCF의 길이  $l_{DCF}$ 를 동시에 같은 값으로 변화시켜 얻는다. 또한 RDPS가 결정되면 NRD가 0 ps/nm가 되도록 식 (2)에 따라 첫 번째 세그먼트의 DCF의 길이  $l_{pre}$ 를 조절하여 precompensation을, 마지막 세그먼트의 DCF의 길이  $l_{post}$ 를 조절하여 postcompensation을 결정한다.

$$l_{DCF} = (D_{SMF}l_{DCF} - RDPS) / |D_{DCF}| \quad (1)$$

$$pre (post) compensation \quad (2)$$

$$= -(D_{DCF}l_{DCF} + [RDPS \cdot (n-1)])$$

여기서,  $l_{pre}$ 와  $l_{post}$ 은 식 (2)로부터 얻어진 pre(post)- compensation을  $D_{DCF}$ 로 나누면 구할 수 있다.  $n$ 은 각 전송 구간의 세그먼트 수이다.

예를 들어, RDPS를 50 ps/nm로 하고자 한다면 전반 구간의 2~6 번째 DCF와 후반 구간의 7~11 번째 DCF들의  $l_{DCF}$ 은  $(17 \text{ ps/nm/km} \times 80 \text{ km} - 50 \text{ ps/nm}) / |-100 \text{ ps/nm/km}|$ 로부터 13.1 km가 된다. 또한 이 경우 pre(post)compensation은  $-(17 \text{ ps/nm/km} \times 80 \text{ km} + (50 \text{ ps/nm} \times 5)) = -1,610 \text{ ps/nm}$ 이고,  $l_{pre}$ 와  $l_{post}$ 은 16.1 km이다.

본 논문에서 RDPS를 0 ps/nm부터 300 ps/nm까지 10 ps/nm 간격으로 변화시키면서 WDM 채널의 입사 전력에 대한 최적의 RDPS를 연구한다.

#### IV. 시뮬레이션 결과 및 검토

그림 3은 24 개 WDM 채널들의 입사 전력이 1 dBm인 경우와 2 dBm인 경우 RDPS 변화에 따른 전송 성능이 가장 좋은 최상 채널과 가장 나쁜 최악 채널의 EOP와 이 두 채널의 EOP 차이 (difference of EOP)를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 두 경우 모두 RDPS가 증가할수록 전체 채널의 성능이 좋아지는 것을 알 수 있다. 그러나 1 dBm의 입사 전력에서 최상 채널과 최악 채널의 EOP를 1 dB 이하로 만들면서 두 채널의 EOP 차를 최소로 하는 RDPS는 240 ps/nm인 반면, 2 dBm의 입사 전력에서는 200

ps/nm인 것에서 알 수 있듯이 최적의 RDPS는 채널의 입사 전력 크기에 의존하는 것을 확인할 수 있다.



(a) @ 1 dBm



(b) @ 2 dBm

그림 3. RDPS에 따른 최상과 최악 채널의 EOP  
Fig. 3. EOPs of best and worst channels as a function of RDPS in 2 dBm launch power of WDM channel.

따라서 본 논문에서 제안하는 링크 구조가 실제 WDM 전송 시스템에 효과적으로 적용되기 위해서는 WDM 채널의 보다 넓은 입사 전력 범위에서 효과적이면서 공통적인 RDPS를 찾아야 한다.

그림 4는 최악 채널의 EOP가 1 dB 이하가 되는 경우에서 RDPS에 따른 WDM 채널의 입사 전력별 최상 채널과 최악 채널의 EOP 차 ( $\Delta EOP$ )를 나타낸 것이다. 반면 그림 5는, 그림 4와 반대로, 입사 전력에 따른  $\Delta EOP$ 를 몇몇의 RDPS별로 나타낸 것이다. 우선 그림 4를 통해 -2 dBm부터 2 dBm까지의 입사 전력 범위에 대해  $\Delta EOP$  편차를 적게 만드는 RDPS

는 210 ps/nm부터 230 ps/nm인 것을 알 수 있다. 또한 RDPS가 220 ps/nm인 경우에서  $\Delta EOP$  편차가 최소가 되는 것을 확인할 수 있다.

그림 4. RDPS에 따른 각 입사 전력별 EOP 차  
Fig. 4. Difference of EOP of each launch power as a function of RDPS.

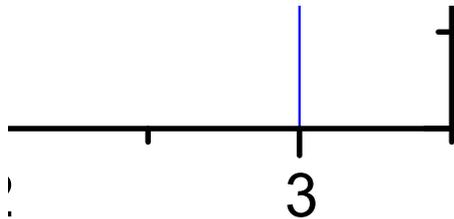


그림 5. 입사 전력에 따른 RDPS별 EOP 차  
Fig. 5. Difference of EOP of several RDPS as a function of launch power.

관점을 달리해 그림 5의 결과를 살펴보면, RDPS를 임의의 값으로 고정하고 WDM 채널의 입사 전력에 변화를 주게 되면 RDPS가 180 ps/nm인 경우 고려한 입사 전력 범위의 대부분에서  $\Delta EOP$ 가 최소로 얻어지지만 각 입사 전력별  $\Delta EOP$ 의 변화가 큰 것을 알 수 있다. 반면, 그림 4로부터 얻은 결과와 동일하게 RDPS가 220 ps/nm인 경우에서 고려한 입사 전력 범위 전체에 대해  $\Delta EOP$  변화가 가장 적은 것을 확인할 수 있다. 따라서 그림 4와 5로부터 -2 dBm부터

2 dBm의 채널 입사 전력 범위에서의 최적 RDPS는 220 ps/nm라고 할 수 있다.

전체 전송로 중간에 OPC를 두고 NRD가 0 ps/nm로 고정된 inline DM 전송 링크에서 시스템 성능은 RDPS와 pre(post)compensation에 따라 결정되고, 더욱이 이들 값은 채널의 입사 전력에 크게 의존하는 것을 지금까지 얻은 결과를 통해 알 수 있었다. 본 연구에서 제안하는 링크 구조를 실제 WDM 전송 시스템에 적용하는 경우 RDPS와 pre(post)compensation은 시스템과 여러 환경에 따라 다양하게 선택되어야 한다. 따라서 본 연구에서 제안하는 NRD = 0 ps/nm인 inline DM 링크에서 RDPS별 유효 입사 전력 범위를 도출하여 제시할 필요가 있다.

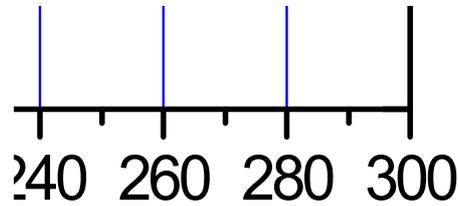


그림 6. RDPS 대 유효 입사 전력  
Fig. 6. RDPS versus effective launch power.

그림 6은 24 채널 × 40 Gbps WDM 전송 시스템에 NRD = 0 ps/nm인 inline DM을 적용하는 경우에서 실제적인 설계 기준을 제시하고자 최악 채널의 EOP가 1 dB 이하가 되는 유효 입사 전력 범위를 RDPS에 따라 도출한 것이다. 1 dB EOP가 되는 최대 전력과 최소 전력 차이를 전력 윈도우 (power window)라고 정의하면, RDPS를 증가시킬수록 전력 윈도우가 증가되는 것을 알 수 있다. RDPS를 적게 선택한다는 것은 precompensation과 postcompensation도 적은 값으로 선택해야 한다는 것이다. 따라서 OPC와 inline DM을 이용한 효과적인 전송을 위해서는 신호 전송 전과 후에 분산 보상을 가급적 크게 할 필요가 있다는 것을 그림 6의 결과를 통해 확인할 수 있다.

## V. 결 론

NRD를 0 ps/nm로 고정한 inline DM에서 RDPS 제어를 통해 WDM 광전송을 효율적으로 수행할 수 있다는 것을 살펴보았다. WDM 채널의 입사 전력에 따라 수신 성능을 양호하게 하는 RDPS가 변하기는 하지만 210~230 ps/nm의 RDPS에서 비교적 넓은 입사 전력 범위에 대해 비슷한 품질로 효율적인 전송이 이루어지는 것을 확인하였다.

또한 본 논문에서 제안한 링크 구조를 실제 WDM 전송 링크로써 적용하기 위한 설계 기준으로 RDPS 별 유효 입사 전력 범위를 도출하였다. NRD를 0 ps/nm로 고정한 inline DM에서 RDPS를 증가시킬수록 유효 입사 전력 범위를 신장시킬 수 있다는 것을 확인하였다.

본 논문에서 얻은 결과들은 inline DM의 적용뿐만 아니라 전체 전송로 중간에 위치한 OPC에 의해 전송로에서 겪게 된 비선형 왜곡을 보상하기 때문에 가능해진 것이라고 할 수 있다. 따라서 WDM 전송 링크로써 inline DM과 OPC를 함께 적용하면 광 전력 비대칭에 의한 OPC의 비선형성의 한계 극복과 좀 더 개선된 시스템 성능 결과를 얻을 수 있다고 하겠다.

## 참 고 문 헌

- [1] G. P. Agrawal, *Fiber-optic communication systems*, John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [2] J. Nagel, "Fiber issues for system deployment," in *Proc. Optical FiberCommunication'2001*, Anaheim, CA, 2001, Paper TuD1.
- [3] 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, pp. 2038-2044, 2006.
- [4] K. Kikuchi, and C. Lorattanasane, "Compensation for Pulase Waveform Distortion in Ultra-Long Distance Optical Communication Systems by using

Midway Optical Phase Conjugator", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 6, No. 1, pp. 1-4-105, 1994.

- [5] S. Watanabe and M. Shirasaki, "Exact compensation for both chromatic dispersion and Kerr effect in a transmission fiber using optical phase conjugation", *J. Lightwave Technol.*, Vol. 14, No. 3, pp. 243-248, 1996.
- [6] XXX, "집중형 분산 제어 WDM 전송 시스템에서 Mid-span spectral inversion 기술", *한국통신학회 논문지*, 제 33권 1호, pp. 7~15, 2008.
- [7] XXX, "Inline 분산 제어 광전송 링크에서 전체 잉여 분산", *한국항해학회논문지*, 제 12권 4호, pp. 311~316, 2008.
- [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.

## 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