

---

# 비선형 광통신 시스템에서 최대 전송거리 및 최적 광신호 세기 도출에 관한 연구

김성만\*

Analysis of the optimum optical signal power and the longest transmission length in nonlinear optical transmission systems

Sung-Man Kim\*

요 약

장거리 광통신 시스템을 설계하기 위해서는 광섬유의 종류, 광증폭기의 종류, 광증폭기 사이의 거리, 색분산 및 편광모드분산 보상의 방법, 광신호의 세기 등에 대한 결정을 해주어야 한다. 이러한 결정을 하기 위해서는 이러한 시스템의 조건들을 바꾸었을 때에 그 광통신 시스템의 성능을 예측할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 광통신 시스템을 설계하였을 때에 그 광통신 시스템의 최대 전송거리를 도출하는 방법에 대해 연구하였다. 또한, 최대 전송거리를 얻기 위한 최적의 광신호 세기를 도출하는 방법에 대해서도 연구하였다.

ABSTRACT

To design the long-haul optical communication system, we need to decide the type of optical fiber and optical amplifier, span length of optical amplifier, dispersion compensation method, optical signal power, etc. Therefore, we need to predict the performance of optical communication system when we change one of the system parameters. In this paper, we investigate the method of predicting the maximum transmission length of the designed optical communication system and finding the optimum optical signal power to obtain the maximum transmission length.

키워드

optical communication, optimum optical signal power, maximum transmission length, nonlinear simulation, eye-opening penalty  
광통신, 최적 광신호세기, 최대 전송거리, 비선형 시뮬레이션, 아이페널티

## 1. 서론

초고속 장거리 광통신 시스템을 설계하기 위해서는 광섬유의 종류, 광증폭기의 종류, 광증폭기 사이의 거리, 색분산(chromatic dispersion) 및 편광모드 분산(polarization mode dispersion, PMD) 보상의 방법, 광신호의 세기 등 수많은 시스템 계수를 결정하여야 한

다[1-3]. 이러한 시스템 계수를 결정하기 위해서는 이러한 시스템 계수들을 변화하였을 때에 전체 시스템의 성능을 측정해야 하는 것이 필수적이다. 이러한 시스템의 성능을 판단할 수 있는 요소로 장거리 광통신 시스템에서는 전송 가능한 최대 전송거리가 그 시스템의 핵심적인 성능지수라고 할 수 있겠다. 즉, 광통신의 시스템 계수를 변화시켰을 때에 얻을 수 있는

---

\* 경성대학교 공학기술연구소 겸임연구원 / 경성대학교 전자공학과(sungman@ks.ac.kr).

접수일자 : 2012. 04. 25

심사(수정)일자 : 2012. 05. 10

게재확정일자 : 2012. 06. 07

최대 전송거리가 그 시스템의 성능이라고 말할 수 있을 것이다.

하지만, 이러한 광통신 시스템의 최대전송거리를 분석하는 방법에 대해서는 정형화된 방법이 존재하지 않았던 것이 사실이다. 따라서, 본 논문에서는 설계된 광통신 시스템의 최대 전송거리를 분석하는 방법에 대해 제시하고자 한다. 또한, 부수적으로 이러한 최대 전송거리를 얻기 위한 최적의 광신호 세기를 결정하는 방법에 대해서도 함께 제시하고자 한다.

## II. 광섬유의 비선형 효과로 인한 신호의 왜곡

광신호가 왜곡(distortion)되어 더 이상 전송할 수 없게 되는 요인은 크게 분산(dispersion)으로 인한 신호의 왜곡과 광섬유의 비선형 효과(nonlinear effect)로 인한 신호의 왜곡이 있다. 하지만, 분산은 선형적인 특성의 신호왜곡이므로 분산보상을 통해 원래의 신호로 복원이 가능하다. 이러한 과정을 분산 보상이라고 하며, 장거리 광통신 시스템은 이러한 분산 보상을 갖추고 있다. 하지만, 자기위상변조 (self-phase modulation, SPM) 와 같은 비선형 효과는 선형적인 특성의 왜곡이 아니므로 보상을 하는 것이 불가능하다[4]. 따라서, 신호의 왜곡으로 인해 광신호를 더 이상 전송하지 못하는 상황은 광신호의 비선형 효과로 기인한다고 할 수 있다.

그림 1은 분산 보상 시스템이 갖추어진 광통신 시스템에서 분산 보상 비율에 따른 신호의 왜곡을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 분석한 결과이다. 그림에서 실선은 광섬유의 비선형 효과를 고려하지 않은 시뮬레이션 결과이고, 점선은 동일한 조건에서 광섬유의 비선형 효과를 고려한 결과이다. 여기에서 가정된 광통신 시스템은 40 Gb/s 의 전송속도, NZDSF(non-zero dispersion shifted fiber,  $D = 4 \text{ ps/nm/km}$ )의 사용, 80 km 의 라만 (Raman) 광증폭기 간격으로 총 720 km 를 전송했을 때의 광신호의 왜곡지수인 아이페널티(eye-opening penalty, EOP)를 나타낸 그림이다. 본 시뮬레이션에서는 각 광증폭기 span 마다 DCF (dispersion-shifted fiber)를 이용하여 분산보상을 수행하는 것을 가정하였다.

그림에서 비선형효과를 고려하지 않았을 때에는

100 % 의 분산보상을 통해 원래 신호로 복원이 되어 0 dB 의 아이페널티가 가능하지만, 비선형 효과를 고려하였을 때에는 원래 신호로 복원이 완벽하게 되지 않아 0 dB의 아이페널티가 불가능함을 알 수 있다[5]. 이 때, 분산 보상을 통해 얻을 수 있는 최저의 아이페널티가 우리가 얻을 수 있는 최소의 신호의 왜곡이며, 이 값을 본 논문에서는 [최저 EOP] 로 명칭하고자 한다.

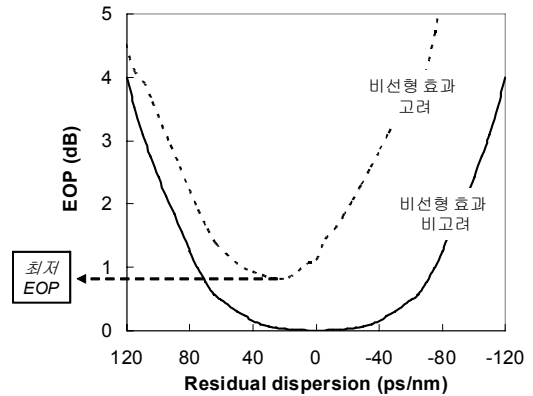


그림 1. 분산 보상값에 따른 광신호의 아이페널티  
Fig. 1 Eye-opening penalty (EOP) as a function of residual dispersion after dispersion compensation

따라서, 각 지점에서 신호의 왜곡이 최소가 되도록 최적으로 색분산 보상을 하더라도 [최저 EOP] 만큼의 신호의 왜곡은 피할 수 없게 된다. 이러한 최저 EOP 를 입력 광신호의 세기와 전송거리에 따라 도출할 수 있으며, 이를 그림 2에 나타내었다. 그림 2의 시뮬레이션 조건은 그림 1과 동일하다.

그림 2에서 하얀색으로 표시된 영역은 광신호가 심하게 왜곡되어 최저 EOP 가 1 dB 이상의 값을 보이는 부분으로, 이러한 영역에서는 신호의 왜곡이 심해 광신호가 정상적으로 수신될 수 없다. 예를 들어 설명하면, 그림에서 별표로 표시된 지점은 -8 dBm 의 광신호로 1500 km 의 전송을 수행한 지점으로 최저 EOP 가 1 dB 이하이어서 광신호의 전송이 가능한 지점이고, 그림에서 오각형으로 표시된 부분은 -1 dBm 의 광신호로 1000 km 의 전송을 수행한 지점으로 최적 EOP가 1 dB 이상이어서 광신호의 왜곡이 심해 전송이 불가능함을 알 수 있다[6].

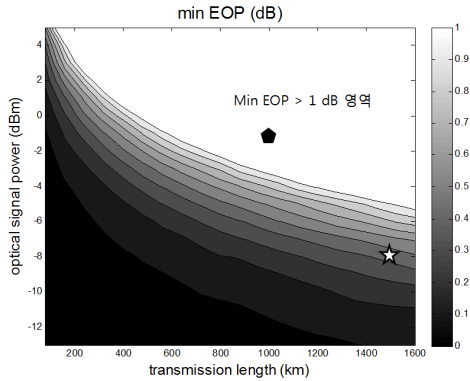


그림 2. 전송거리와 광신호의 세기에 따른 최저 EOP  
 Fig. 2 The minimum EOP as a function of optical signal power and transmission length

### III. 광신호대 잡음비로 인한 광신호의 에러율 증가

광신호가 더 이상 전송되지 못하는 요인으로 광신호의 왜곡이외에 잡음(noise)이 있다. 이러한 광신호의 잡음은 신호의 감쇄를 증폭해주기 위해서 사용되는 광증폭기를 거쳐갈 때마다 누적된다. 즉, 아무리 신호의 왜곡이 없더라도, 광증폭기를 거쳐갈 때마다 광신호의 광신호대 잡음비(OSNR, optical signal to noise ratio)가 나빠져서 더 이상 전송할 수 없는 신호의 품질에 다다르게 된다.

예를 들어, 40 Gb/s 전송속도의 경우에 수신기의 잡음, 마하-젠더 변조기의 광소광비(extinction ratio), 입력되는 신호의 아이페널티(EOP), 광수신기의 반응도(responsibility), 광필터의 대역폭 등을 고려하였을 때에 수신기에 입력되는 광신호의 광신호대 잡음비는 최소 29 dB (0.1 nm의 분해 대역폭 (resolution bandwidth) 기준)이 되어야 한다. 이러한 광신호대 잡음비를 만족하려면, 최대 전송거리에 따라 요구되는 입력 광신호의 세기가 정해지며, 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다 [7].

$$P_{input} = OSNR - 58 + Loss + NF + 10\log_{10} N - FEC \quad (1)$$

여기에서  $P_{input}$ 은 입력되어야 할 광신호의 세기, OSNR은 요구되는 광신호대 잡음비, 58은 광자의

최소 에너지 단위로 발생하는 잡음의 크기이며, Loss는 한 구간(span)당 손실, NF는 광증폭기의 잡음지수, N은 광증폭기의 개수, FEC는 에러정정 코드인 개선량을 dB로 표현한 값이다. 만약, 에러정정코드(forward error correction, FEC) [8]를 사용하여 요구되는 광신호대 잡음비를 5 dB 정도 줄일 수 있음 가정하였을 때에 요구되는 광신호의 세기에 대한 그래프를 그리면 그림 3과 같다. 본 그림은 그림 1 및 그림 2와 동일한 시스템 조건에서 계산한 결과이다.

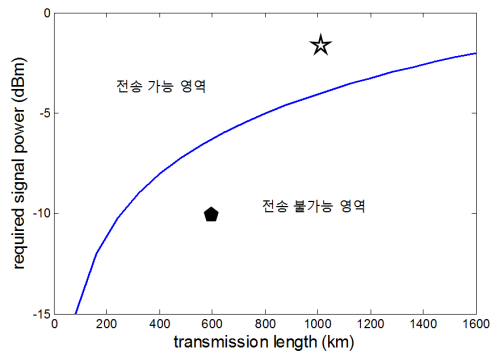


그림 3. 전송거리에 따라 요구되는 입력 광신호의 세기  
 Fig. 3 Required optical signal power as a function of transmission length

그림 3에서 나타낸 그래프의 위 영역은 광신호의 세기가 충분하여 요구되는 광신호대 잡음비를 만족할 수 있는 영역이고, 그래프의 아래 영역은 광신호의 세기가 불충분하여 요구되는 광신호대 잡음비를 만족하지 못하는 영역이다. 예를 들어 설명하면, 그림에서 오각형으로 나타낸 지점인 -10 dBm의 광신호로 600 km를 전송했을 때에는 광신호의 수신 불가능한 영역이고, 그림에서 별표로 나타낸 지점인 -2 dBm의 광신호로 1000 km를 전송했을 때에는 광신호의 수신 가능한 경우임을 알 수 있다.

### IV. 최대 전송거리 및 최적 광신호의 세기 도출

본 논문의 2 장 및 3 장에서 광신호의 왜곡과 잡음으로 인해 제한되는 전송거리에 대해 살펴보았다. 따

라서, 광신호가 전송이 가능하기 위해서는 광신호의 왜곡에 대한 기준과 잡음에 대한 기준을 모두 만족하여야 한다. 이렇게 두 가지 기준을 모두 만족하는 영역을 [전송 가능영역] 으로 정의할 수 있다. 앞의 그림 2 및 그림 3에서 광신호의 EOP 가 1 dB 미만이고, 전송거리에 따라 요구되는 광신호의 세기를 모두 만족하는 영역을 나타내면 그림 4와 같다.

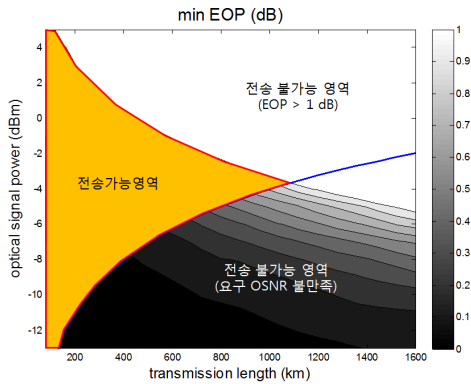


그림 4. 전송 가능영역  
Fig. 4 Transmittable Condition

따라서, 그림에서 [전송 가능영역]으로 표시한 광신호의 세기와 전송거리에서만 전송이 가능한 조건이

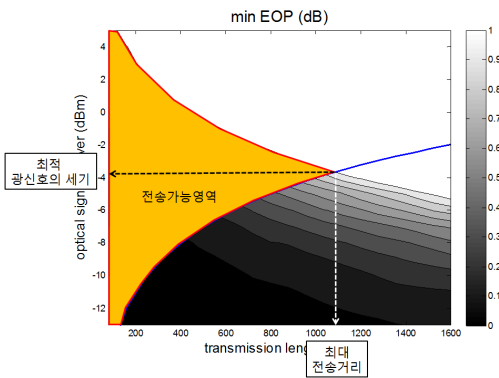


그림 5. 최대 전송거리 및 최적 광신호의 세기  
Fig. 5 The maximum transmission length and the optimum optical signal power

된다. 따라서, 이러한 분석을 통해 전송이 가능한 영역을 알 수 있으며, 또한, 이 광통신 시스템의 최대 전송거리 및 최적 광신호의 세기도 알 수 있다. 즉,

그림에서 최대 전송거리는 1100 km 가 되며, 최적 광신호의 세기는 약 -3.5 dBm 이 된다. 이를 그림 5에 나타내었다. 이러한 방법을 통하여 설계한 광통신 시스템의 최대 전송거리 및 최적 광신호의 세기를 구할 수 있다.

## V. 결론

본 논문에서는 초고속 장거리 광통신 시스템을 설계함에 있어서 광신호의 왜곡으로 인해 전송이 제약되는 영역을 살펴보고, 또한 광신호대 잡음비를 만족하기 위해 광신호의 세기가 제한되는 영역을 살펴 보았다. 이러한 두 가지 기준을 모두 고려하여 전송 가능영역이라는 개념을 제시하였으며, 이를 이용하면 설계된 광통신 시스템으로 도달가능한 최대 전송거리를 도출할 수 있음을 보였다. 또한, 이 최대 전송거리를 위한 최적의 광신호의 세기가 있음을 보였고, 이를 도출하는 방법을 제시하였다. 이러한 방법을 이용하면 초고속 장거리 광통신 시스템을 설계하는데 있어 최대 전송거리 및 최적 광신호의 세기를 도출할 수 있을 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 2011학년도 경성대학교 공학기술연구소 연구지원사업으로 이루어졌음.

## 참고 문헌

- [1] 유재덕, 박홍태, 신현식, 김천석, 신윤희, "장거리 해저 광전송망 분산보상 설계 및 구현", 한국전자통신학회논문지, 1권, 1호, pp. 56-62, 2006.
- [2] 정재진, 이영선, 신현식, "장거리 해저 광통신시스템의 순방향에러정정 기술 연구", 한국전자통신학회논문지, 3권, 3호, pp. 170-176, 2008.
- [3] 박홍태, 김천석, "장거리 해저 무중계 전송기술 연구", 한국전자통신학회논문지, 2권, 1호, pp. 40-45, 2007.
- [4] Govind P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, 4th edition, Chapter 4, 2007.
- [5] Ivan Kaminow and Tingye Li, *Optical Fiber Telecommunications IV B*, Academic Press,

Chapter 13, 2002.

- [6] Sung-Man Kim and Chang-Hee Lee, "The Efficient Clock-Extraction Methods of NRZ Signal for Chromatic Dispersion Monitoring", IEEE Photonics Technology Letters, Vol.17, No.5, pp. 1100-1102, May 2005.
- [7] Ivan P. Kaminow and Tomas L. Koch, *Optical Fiber Telecommunications III B*, Academic Press, Chapter 2, 1997.
- [8] J.L. Pamart, E. Lefranc, S. Morin, G. Balland, Y.C. Chen, T.M. Kissell, J.L. Miller, "Forward error correction in a 5Gb/s 6400km EDFA based system", Electronics Letters, Vol.34, No.4, pp. 342-343, Feb 1994.

### 저자 소개



#### 김성만(Sung-Man Kim)

1999년 KAIST 전기 및 전자공학과 공학사

2001년 KAIST 전기 및 전자공학과 공학석사

2006년 KAIST 전기및전자공학과 공학박사

2006년~2009년 삼성전자 정보통신총괄 책임연구원

2009년~현재 경성대학교 전자공학과 교수

※ 관심분야 : 광통신, 이동통신, LED 무선 광통신