

---

# WDM시스템에서 OOK와 FSK 전송을 위한 수신기의 동작 특성에 관한 연구

김선엽\* · 나유찬\*

A Study on the Operational Characteristic of Receiver for the OOK and FSK transmission  
In a WDM System

Sun-youb Kim\* · Yoo-Chan Ra\*

---

이 논문은 2005년도 남서울대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

---

## 요 약

WDM 시스템에서 일반적인 디지털 전송기법인 OOK와 FSK 전송신호를 수신하는 수신기를 해석하였다. 성능평가 방법으로는 다양한 에러확률을 대역폭과 비트수의 함수인  $m$ 으로 표현하여 수신기의 성능평가를 수행하였다. 시뮬레이션 결과,  $10^{-4}$ 의 에러확률인  $m=10$ 인 경우 OOK 신호에 대한 수신감도는  $1.7 \times 10^2$ , FSK의 경우는  $2.2 \times 10^2$ , 그리고  $10^{-9}$ 의 에러확률인  $m=25$ 의 경우, OOK와 FSK의 경우 각각  $2.15 \times 10^2$ ,  $3.07 \times 10^2$ 의 성능을 갖는 것으로 확인되었다. 이를 통해, 광통신 시스템의 기준에러확률인  $10^{-9}$ 을 기준으로 할 때, 23Gb/S의 전송이 가능함을 보였고, 코딩이득이  $10^8$ 이고, 코드율이 0.8인 경우에는 75Gb/s의 전송용량이 가능함을 확인하였다.

## ABSTRACT

We analyzed of the receiver which received OOK and the FSK transmission signal that were a general digital transmission technique in a WDM system. We expressed various error probability with the  $m$  which was bandwidth and a bit numerical function and carried out performance evaluation of a receiver in a performance evaluation way. When error probability was  $10^{-4}$  which is  $m=10$ , as for the receive sensitivity of OOK, the  $1.7 \times 10^2$ , FSK got  $2.2 \times 10^2$  through simulation. And the receive sensitivity of OOK and FSK was able to get each  $2.15 \times 10^2$  and  $3.07 \times 10^2$  when it was error probability of  $10^{-9}$  which is  $m=25$ . Transmission of 23Gb/S showed that it was possible when we does the  $10^{-9}$  that was basis error probability of a light communication system with a basis through this, and a coding profit was with  $10^8$  and transmission capacity of 75Gb/s confirmed that it was possible if a code rate was with 0.8.

## 키워드

WDM, receiver, error probability

I. 서 론

WDM시스템의 성능을 결정하는 요소 중 가장 중요한 요소는 수신기의 동작 성능이다. 이러한 수신기의 동작 성능을 해석하기 위한 방법 중의 하나는 수신된 신호비트에 대한 에러한계, 즉 비트에러율(BER : Bit Error Rate)을 유지하기 위해 필요한 평균 광전력을 비트당 포함되는 광자의 수로 나타내는 방법을 통해 이루어진다.

이러한 WDM시스템에서 OOK신호와 FSK를 전송한 후에 수신기가 동작하는데 필요한 비트당의 광자수를 계산하면 수신기의 동작특성을 이해하는데 많은 도움이 된다. 이러한 OOK와 FSK 신호들을 수신하는 수신기를 해석하는 방법에는 여러 방법들이 있으나 주로 사용되는 방법이 가우시안 해석법과  $\kappa$ -자승 해석법이다. 그 중에서도  $\kappa$ -자승 해석법을 주로 이용하게 되는데, 그 이유는 현재 광통신시스템의 일반적인 신호전송방법인 OOK 전송법을 이용하는 경우 신호의 분포는 가우시안 분포로 가정하지만, 전송채널에는 열잡음과 산탄잡음이 나타나므로 이러한 잡음들도 정의할 수 있는 신호 분포가 필요한데, 열잡음은 가우시안 분포를 띄게되고, 산탄잡음은  $\kappa$ -자승분포로 나타나기 때문이다. 또한 FSK전송의 경우에는 채널에 신호가 존재하지 않는 경우에는 열잡음만 존재하지만, 채널에 신호가 존재하는 경우에는 출력신호의 분포가 가우시안 분포와  $\kappa$ -자승 분포의 컨벌루션 형태를 갖기 때문이다.<sup>[1][6]</sup>

이에 본 논문에서는  $\kappa$ -자승 해석법을 이용하여 OOK 전송과 FSK 전송에 대해 시스템에서 요구하는 여러 가지의 에러확률에 대해 수신기의 동작특성을 확인하였다. 또한 계산된 값을 이용하여 다양한 에러확률에 대해 수신기의 동작특성에 의한 광통신 시스템의 전송속도를 계산하였고 그리고 다양한 코드율과 코딩이득을 통해 시스템의 전송속도를 보다 증가 시킬 수 있음에 대해 연구를 수행하였다.

II. 광수신기의 해석

1973년 AT&T Bell Labs의 Personick에 의하면 신호와 잡음항에 대해 가우시안 통계를 적용하는 경우 일

반적인 확률은 식(1)과 (2)와 같이 됨이 보고 되었다.<sup>[7]</sup>

$$P(1|0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0^2}} \int_{S_h}^{\infty} \exp\left(-\frac{(\mu_0 - x)^2}{2\sigma_0^2}\right) dx \quad (1)$$

$$P(0|1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1^2}} \int_{-\infty}^{S_h} \exp\left(-\frac{(\mu_1 - x)^2}{2\sigma_1^2}\right) dx \quad (2)$$

여기서,

$\mu_{1(0)}$  : 1(0)이 수신되었을 때, 광전류의 평균값

$\sigma_{1(0)}^2$  : 1(0)이 수신되었을 때, 잡음 변동치

식(1)과 (2)의 변수들을 변화시키면 다음 식들과 같이 쓸 수 있다.

$$Pr(1|0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{Q_0}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad (3)$$

$$Pr(0|1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{Q_1}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad (4)$$

에러확률에 대한 최소화된 표현에 대한 최적의  $S_h$ 를 계산하기 위하여 미분이 0이 되도록 설정해야 하지만 이것은 수치적으로 처리하기 어렵다는 단점을 지니고 있어서 그림1과 같은 가우시안 확률분포를 이용한다. 에러확률이 그림 1에서 보이는 빗금친영역과 같을 때, 에러확률이 최소화된다고 가정한다.

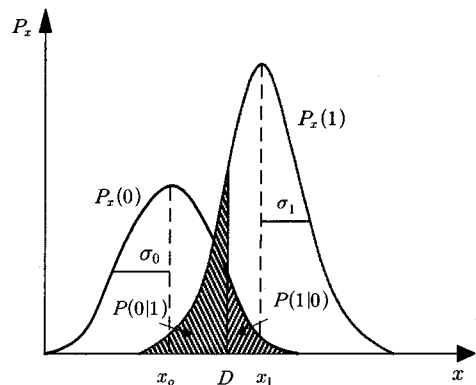


그림 1. 디지털 기호들의 광 검출에 대응하는 가우시안 확률 분포

Fig. 1 Gaussian probability distributions corresponding to the photodetection of digital symbols

식(3)과 (4)에서 퍼스닉의 인수라 알려진 파라미터  $Q$ 는 식 (5)와 같이 주어진다.

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (5)$$

이러한 과정을 통해, 비트 에러율은 다음식과 같이 주어진다.<sup>[8]</sup>

$$P_e = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\infty}^0 \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad (6)$$

$Q$ 의 함수에 대한 비트 에러율이 그림 2에 보이고 있다. 예를 들어  $10^{-9}$ 의 에러확률은  $Q$ 로 나타내면 대략 6이 된다.

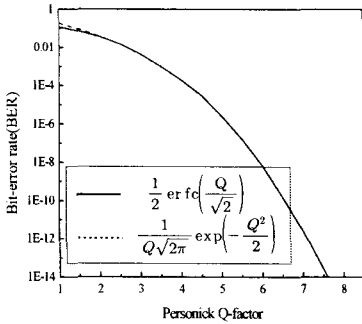


그림 2.  $Q$ 에 따른 비트 에러율  
Fig. 2 Bit error rate(BER) as a function of the  $Q$ -factor.

$Q$ 의 자승은 수신기의 등가 신호 대 잡음비를 나타낸다. 신호 0과 1에 대한 정확한 확률분포는 산탄잡음이 어떠한 크기를 갖는 경우에는 가우시안 분포를 갖지 않는다.

OOK 전송시에 수신기에 수신된 광전류는 증폭기의 이득이 충분히 클 경우에는 열잡음을 무시할 수 있으므로 수신기에 '1'이 수신되는 경우와 '0'이 수신되는 경우에는 식(7)과 (8)과 같이 열 잡음항을 정의할 수 있다.

$$\sigma^2 = \sigma_s^2 + \sigma_n^2 \quad (7)$$

$$\sigma^2 = \sigma_n^2 \quad (8)$$

식(7)과 (8)에서  $\sigma_s$ 와  $\sigma_n$ 은 각각 신호와 잡음에 대한 열잡음항으로 식(9)와 식(10)과 같이 표현된다.

$$\sigma_s^2 = \overline{N_p} \eta q R_b G \quad (9)$$

$$\sigma_n^2 = n_{sp} \eta q (G-1) B_o \quad (10)$$

여기서,  $n_{sp}$ 는 자연방출 factor이고,  $G$ 는 증폭기의 이득이다.  $G \gg 1$ 이라면 식(9), (10)을 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\sigma_s^2}{\sigma_m^2} = \frac{\overline{N_p} R_b}{n_{sp} B_o} = \frac{\overline{N_p}}{m n_{sp}} \quad (11)$$

그리고 광전류의 평균치와 분산치는 식 (12)와 (13)과 같이 쓸 수 있다.

$$\mu_1 = 2(\sigma_s^2 + \sigma_n^2), \quad \mu_0 = 2\sigma_n^2 \quad (12)$$

$$\sigma_1^2 = \frac{2}{m}(\sigma_s^2 + \sigma_m^2)^2, \quad \sigma_0^2 = \frac{2}{m}(\sigma_n^2)^2 \quad (13)$$

이상을 통해 다음과 같은 식을 도출 할 수 있다.

$$\overline{N_p} = \frac{2n_{sp}m}{\left(\frac{\sqrt{2m}}{Q} - 1\right)} \quad (14)$$

이 식은 OOK 전송시의 수신기의 평균 수신감도를 나타낸다. 가우시안 근사의 경우에는  $m$ 의 최소치가  $Q^2/2$ 로 의해 주어지므로  $Q$ 가 6 경우에는  $m_{\min}$ 이 18로 된다. 이상과 같이 증폭기의 ASE 잡음이 열잡음보다 훨씬 큰 경우, 1 상태와 0 상태 모두의 광전류는  $\kappa$ -자승 분포로 수정할 수 있다. 에러확률이 1비트를 전송하는 경우와 0비트를 전송하는 경우에 동등한 값을 갖는다고 가정하면, 식 (15)와 같이 쓸 수 있다.<sup>[9]</sup>

$$P_e = 0.5[\text{Pr}x > x_{th}|0 + \text{Pr}x < x_{th}|1] \quad (15)$$

그리고 FSK 전송시에 수신기에서의 광전류의 실효

치와 분산은 식 (16)과 (17)과 같이 주어진다.

$$\mu_1 = 2\sigma_s^2, \mu_0 = -\mu_1 \quad (16)$$

$$\sqrt{var_1} = \sqrt{\frac{2}{m}(\sigma_s^2 + \sigma_n^2)^2 + \frac{2}{m}(\sigma_n^2)^2} \quad (17)$$

그리고, FSK 시스템의 경우에는  $Q$ 는 식 (18)과 같이 쓸 수 있다.

$$Q = \frac{2(2\sigma_s^2)}{2\sqrt{\frac{2}{m}(\sigma_s^2 + \sigma_n^2)^2 + \frac{2}{m}(\sigma_n^2)^2}} \quad (18)$$

그러므로 위 식들과 수신기의 파라메터인  $n_{sp} = 2$  와  $P_e = 10^{-9}$ 을 대입하면 평균수신기의 감도를  $m$ 의 함수를 식 (19)와 같이 쓸 수 있다.

$$\bar{N}_p = \frac{72m}{m-18} \left[ 1 + \frac{1}{3} \sqrt{2m-18} \right] \quad (19)$$

### III. Simulation

WDM환경에서 예상전력, 필요한 침투 전력등으로 표현되는 전송품질에 대한 비교를 통해서 수신기의 성능을 해석하기위해 그림 3의 OOK 시스템과 그림 4의 FSK 시스템의 수신기에 대해서 simulation을 수행하였다.

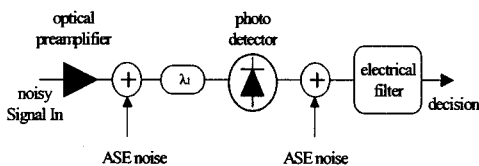


그림 3. OOK 시스템의 수신기의 개략도  
Fig. 3 Schematic diagram of the receiver of a OOK systems.

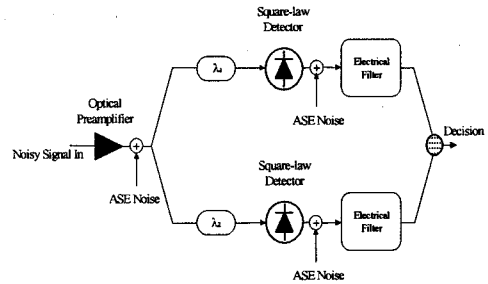


그림 4. FSK 시스템의 수신기의 개략도  
Fig. 4 Schematic diagram of the receiver of a FSK systems.

전송효율을 계산하기 위해 사용한 파라메터는 표 1에 나타내었다.

표 1. 사용된 파라메터

항 목	값
잡음 정전용량( $C_T$ )	0.1pF
비트율에 대한 전기적인 대역폭의 비	0.5
광전치 증폭기의 이득( $G$ )	$G \gg 1$
자연방출 잡음 지수( $n_{sp}$ )	2
증폭기 뒤의 편광필터	없음

표 1에 주어진 파라메터를 다양한 에러확률에 대해 OOK와 FSK 시스템의  $m$ 값을 계산한 결과가 그림 5에 보이고 있다.

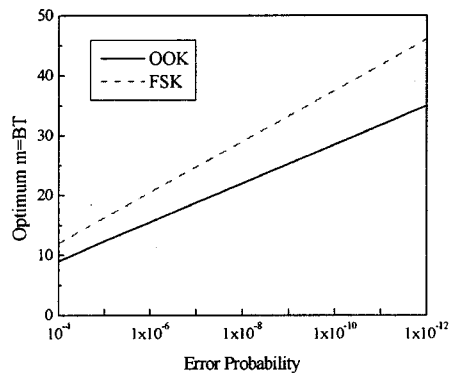


그림 5. 다양한 에러확률에 대한 최적의  $m$   
Fig. 5 Optimum  $m$  as a function of various error probability

그림 5에 대한 내용이 표 2에 정리되어 있다.

표 2. 다양한 에러확률에 대한  $m$

에러확률	OOK( $m$ )	FSK( $m$ )
$10^{-4}$	9.8	12.5
$10^{-6}$	14.21	20.34
$10^{-8}$	21.02	28.2
$10^{-9}$	25.24	31.2
$10^{-10}$	27.32	35.4

표 2에 나타난 바와 같이 동일한 에러확률에 대해 FSK가 OOK에 비해서 더 큰  $m$ 을 갖게 되므로 FSK는 WDM 채널당 대역폭이 OOK에 비해서 훨씬 큼을 알 수 있는데, 이것은 식 (20)과 같이 쓸 수 있다.

$$(m_{FSK-WDM} = 2m_{opt,FSK}) > (m_{OOK-WDM} = m_{opt,OOK}) \quad (20)$$

여기서,  $m_{FSK/OOK-WDM}$ 은 필요한 WDM 채널을 위한  $m$ 의 값을 나타낸다. 식 (20)의 의미는 FSK가 '1' 또는 '0'을 전송하는데, 더 큰  $m$ 값을 필요로 하면서, 전체 채널 대역폭은 OOK보다 훨씬 더 큼을 의미한다.

그림 6은 수신기에서 광전류의 평균치와 첨두치에 대한 결과를 보이고 있다.

그림에서 보는 바와 같이 FSK 시스템이 OOK 시스템에 비해서 더 높은 광전력을 요구하지만 피크치의 경우에는 OOK에 비해 낮은 것을 확인 할 수 있는데, 이러한 것은 실제의 광대역 잡음원을 통해 WDM 시스템을 구현할 때 중요하게 사용할 수 있다. 그러한 이유는 광대역 잡음원으로 이용되는 반도체 소자나 EDFA는 높은 ASE 전력을 만들기 어렵다는 문제점을 가지고 있기 때문이다.

이러한 결과를 통해 다양한  $m$ 값에 대하여 OOK와 FSK 시스템의 수신기의 감도를 계산한 것이 그림 7에 보이고 있다. 그림 7에 대한 내용이 표 3에 정리되어 있다.

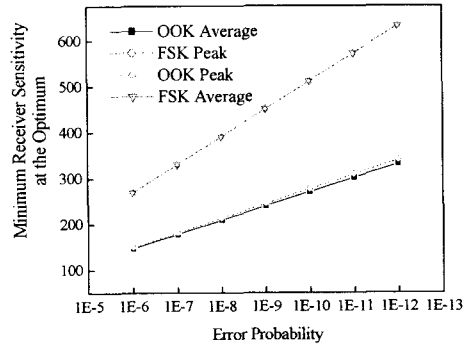


그림 6. 다양한 에러확률에 대한 수신기의 감도  
Fig. 6 A Sensitivity of receiver for a various error probability

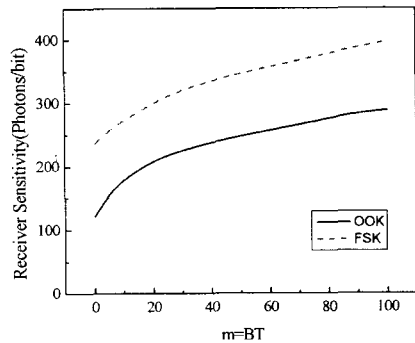


그림 7. OOK와 FSK 시스템의 수신기의 수신감도  
Fig 7. A sensitivity of receiver of the OOK and FSK system

표 3의 결과로부터 다양한  $m$ 의 값에 따른 OOK와 FSK 시스템의 성능을 평가할 수 있는데, FSK 시스템이 OOK 시스템에 비해서 1.5dB 정도 더 큰 페널티를 갖음을 확인 할 수 있다.

그리고 스펙트럼이 분할된 WDM 시스템의 전송용량  $T_{OSP}$ 는 식 (21)과 같이 정의 할 수 있다.<sup>[10]</sup>

$$T_{OSP} = \frac{B_{ss}}{mM} \quad (21)$$

여기서,  $B_{ss}$ 는 스펙트럼분할소스의 가용 이득대역폭이다.

표 3.  $m$  값에 대한 OOK와 FSK의 수신 감도

에러확률	OOK( $m$ )	FSK( $m$ )
$m = 10$	$1.7 \times 10^2$	$2.2 \times 10^2$
$m = 15$	$1.9 \times 10^2$	$2.3 \times 10^2$
$m = 20$	$2.1 \times 10^2$	$3.0 \times 10^2$
$m = 25$	$2.15 \times 10^2$	$3.07 \times 10^2$

그리고  $M$ 은 광신호의 대역폭  $B_0$ 에 대한 채널 간격의 비이다. 최적의  $m$  값을 이용하고  $B_{ss}$ 가 25nm이고  $M$ 이 3이라 가정하면 식 (21)은 에러확률을 위한 평가식으로 이용할 수 있으므로 그림 8에 이러한 결과를 보였다.

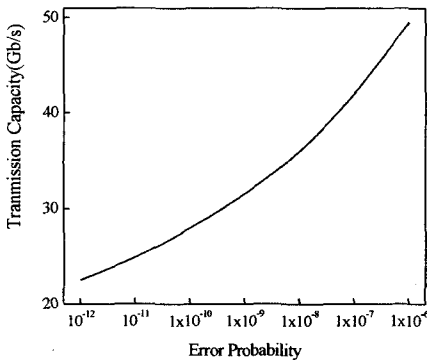


그림 8. 최적의 상태에서 동작하는 수신기의 전송용량의 예상치

Fig. 8. Predicted transmission capacity in Gb/s for an optical receiver, at optimum state.

그림 8에서 보이는 것처럼 광증폭기를 갖는 스펙트럼분할 시스템의 전송용량은 에러확률  $P_e$ 가  $10^{-9}$ 일 때 약 32Gb/s이 된다.  $M$ 이 3이라 임의적으로 가정한 것은 결정신호의 경우보다 더 낮은 SNR에서 동작하기 때문이다. 그러므로 스펙트럼분할시스템이 협대역광신호의 대역폭을 갖는 일반적인 시스템에 비해 상호 채널 간섭에 대해 더 낮은 감도를 갖음을 예상할 수 있다. 또한 시스템의 사용가능한 광전력이 전송전력과 필요한 수신기감도의 차에 의해 주어진다. 시스템의 설계시에 가장 중요한 점은 데이터 전송률을 선택한 후, 수신된 전력을 최소로 하기위한 수신기의 대역

폭을 조절해야만 한다. 그러므로 예상전력은 수신기 광신호의 대역폭의 향으로 정의할 수 있다. 또한 그림 8을 통하여 전체시스템의 전송용량은 채널에러율의 함수임을 알 수 있으므로 이를 통해 상대적으로 낮은 BER에서 동작시키거나 FEC을 이용하여 시스템의 용량을 증가시켜서 더 큰 필요 전력을 얻을 수 있음을 예상할 수 있다.

그림 9는 서로 다른 code rate에 대한 코딩이득의 함수에 대해 전송용량이 개선되는 것을 보이고 있다. 코딩이득은 코딩된 신호와 코딩이 안 된 신호의 에러확률의 비로 정의된다. 코딩 이득이 증가하면, 코딩이 안 된 신호의 에러확률이 감소하기 때문에  $m$ 의 최적의 값이 감소하는데 이것은 유효비트기간이 이진기호 지속기간보다 길기 때문에 부분적으로 무시할 수 있다.<sup>[11]</sup>

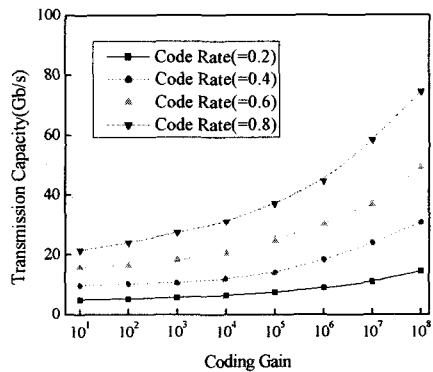


그림 9. 다른 코드율에 대한 코딩이득과 전송 용량의 관계

Fig. 9 Transmission capacity versus coding gain for different code rates.

그림 9에 여러 가지의 코드율에 대해, 코딩이득에 대한 전송용량을 보이고 있다. 그림 9에서 보는 바와 같이 75Gb/s 정도의 전송용량은 이러한 코딩기법을 통해 얻을 수 있다. 수신기감도 또한 FEC의 채용을 통해 변화됨을 확인 할 수 있다.

### V. 결론

WDM시스템의 성능을 결정하는 요소 중 가장 중요

한 요소는 수신기의 동작 성능을 해석하기 위해 수신된 신호비트에 대한 에러한계, 즉 비트에러율(BER : Bit Error Rate)을 유지하기 위해 필요한 평균 광전력을 비트당 포함되는 광자의 수로 나타내는 방법을 통하여 OOK 시스템과 FSK 시스템의 수신기의 성능을 평가하였다. 성능평가 방법으로는 다양한 에러확률을 대역폭과 비트수의 함수인  $m$ 으로 표현하여 수신기의 성능평가를 수행하였다. 시뮬레이션 결과,  $10^{-4}$ 의 에러확률인  $m=10$ 인 경우 OOK 신호에 대한 수신감도는  $1.7 \times 10^2$ , FSK의 경우는  $2.2 \times 10^2$ , 그리고  $10^{-9}$ 의 에러확률인  $m=25$ 의 경우, OOK와 FSK의 경우 각각  $2.15 \times 10^2$ ,  $3.07 \times 10^2$ 의 성능을 갖는 것으로 확인되었다. 이를 통해, 광통신 시스템의 기준에러확률인  $10^{-9}$ 을 기준으로 할 때, 23Gb/s의 전송이 가능함을 보였고, 코딩이득이  $10^8$ 이고, 코드율이 0.8인 경우에는 75Gb/s의 전송용량이 가능함을 확인하였다.

향후 연구되어야 할 과제는 본 논문에서는 WDM 채널간은 상호 간섭과 펄스의 분산효과가 없는 것으로 고려하였으나, 이 두 가지의 현상은 시스템의 성능에 커다란 영향을 미친다. 그러므로 이러한 현상이 시스템에 미치는 영향에 대해 고찰이 필요할 것으로 사료되고, 본 논문에서는 코딩기법을 NRZ로 가정하였으나 스펙트럼 특성과 클럭 복구 그리고 낮은 펄핑전력을 이용하는 RZ 코딩에 대한 고찰이 필요할 것으로 사료된다.

### 참고문헌

[1] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*. Wiley Inter-science : New York, 1992.  
 [2] W. B. Carter, President AT&T Submarine Systems Inc., "Global under- sea fiber optic network: trends and implications," *Plenary address at the Optical Fiber Communications Conference, San Jose (CA)*, Feb. 1996.  
 [3] 김선엽외 5인 "Taper형 결합계수 분포를 갖는 GACC 광필터의 해석", *한국통신학회 논문집*, vol. 26 no. 1B pp. 28~36 Jan. 2001

[4] K. C. Kao and G. A. Hockham, "Dielectric fiber surface waveguides for optical frequencies," *Proceedings of the IEEE*, vol. 133, pp. 1151-1158, July. 1966.  
 [5] F.P. Kapron, D.B. Keck and R.D. Maurer, "Radiation losses in glass optical waveguides," *Applied Physics Letters*, vol. 17, pp. 423-425, Nov. 1980.  
 [6] E. Desurvire, *Erbium-Doped Fiber Amplifiers*. Wiley Interscience: New York, 1994.  
 [7] B. E. Saleh and M.C. Teich, *Fundamentals of Photonics*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1991.  
 [8] P. D Kilkelly, P. J. Chidgey and G. Hill, "Experimental demonstration of a three channel WDM system over 110 km using superluminescent diodes," *Electronics Letters*, vol. 26, no. 20, pp. 1671-1673, 1990.  
 [9] *Brochure of the Broadband Information Technology Program*, Information Office, ARPA, US-DoD.  
 [10] J. S. Lee, Y. C. Chung and D.J. DiGiovanni, "Spectrum-sliced fiber amplifier light source for multichannel WDM applications," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 5, no. 12, pp 1458-1461, Dec. 1993.  
 [11] Vivek Arya and I. Jacobs, "Capacity and power budget of spectrally-sliced WDM networks," in *Optical Fiber Conference (OFC)*, OSA Technical Digest Series, 1997.

### 저자소개

김선엽(Sun-Youb Kim)

한국해양정보통신학회 논문지 제9권 5호 참조

나유찬(Yoo-Chan Ra)

한국해양정보통신학회 논문지 제9권 1호 참조