

# 고정이득 C-band EDFA에서 simulation 알고리즘에 대한 고찰 및 잡음지수 특성

## Survey of Simulation Algorithms and Characteristics of Noise Figure in Gain Clamped C-Band EDFA

김익상, 김창봉\*, 이규량\*, 오왕열\*\*, 방준학\*\*

배재대학교 정보통신공학부, \*공주대학교 정보통신공학부, \*\*한국전자통신연구원 광통신연구부  
iskim@mail.paichai.ac.kr

WDM 전광통신망의 ADM 노드에서 WDM채널 분기결합시에 총입력광파워가 변화하면서 광증폭기의 출력단에 각 채널의 이득이 변하기 때문에 성능의 열화를 초래하게 되어 이를 최소화시키기 위해 자동이득조정(AGC) 광증폭기에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다. 본 논문에서는 단일펌핑을 가지는 C-band EDFA의 출력을 입력으로 귀환시켜 발진을 유도함으로써 손실이 고정된 귀환광경로의 특성을 이용해 입력신호광의 파워가 변하더라도 항상 이득을 일정하게 유지해 주는 고리형 고정이득 EDFA에서 발진광 및 신호광의 방향에 따른 잡음지수의 특성을 논하고자 한다.<sup>(1)</sup>

먼저 그림 1.과 같이 단일펌핑을 가지는 고리형 고정이득 광증폭기의 구조에서 잡음지수 특성의 관건이 되는 자연방출광을 고려하여 EDFA의 특성을 계산해 볼 필요가 있다. EDF 양단에서 증폭되는 메카니즘을 가지는 자연방출광의 경우, 양단에서 경계조건을 만족하는 방정식을 풀어야 하는데, 여기에는 relaxation, 광자보존성, 초기치 대입 등을 들 수 있다.<sup>(2)</sup> 먼저 가장 용이한 방법으로서 EDF 전체 길이를 미소구간으로 나누고 각 구간에서 입력되는 신호광, 펌프광, 자연방출광에 의한 정상상태에서의 밀도반전  $n_2$ 을 나타내는 식(1)에 근거해서 어븀원자의 기저 및 여기 밀도  $n_1, n_2$ 를 규격화 입력광파워를 가지고 계산한다. 이를 이용해 규격화 출력광파워를 전파방정식(2)에 근거하여 계산한다.

$$n_2 = \frac{r_p^a \hat{q}_{in}^{\pm} + r_s^a \hat{s}_{in}^{\pm} + \sum_j r_j^a \hat{p}_{in,j}^{\pm}}{\hat{q}_{in}^{\pm} + \hat{s}_{in}^{\pm} + \sum_j \hat{p}_{in,j}^{\pm} + 2 \cdot sp + u_{sp}}, \quad sp = \frac{4 \int_{guide} \sigma^e(\nu) d\nu}{A} \times \tau, \quad u_{sp} = \frac{4 \int_{un-guide} \sigma^e(\nu) d\nu}{A} \times \tau \quad (1)$$

$$\pm \frac{d\hat{q}^{\pm}}{dz} \approx -a_p^a n_1 \hat{q}^{\pm}, \quad \pm \frac{ds_j^{\pm}}{dz} = (a_i^e n_2 - a_i^a n_1) \hat{s}_j^{\pm}, \quad \pm \frac{dp_j^{\pm}}{dz} = (a_j^e n_2 - a_j^a n_1) \hat{p}_j^{\pm} + 2a_j^e n_2 \hat{p}_0 \quad (2)$$

relaxation 알고리즘의 경우, 초기에는 EDF초단의 입력만을 고려하여 前方 밀도반전을 계산한 다음, EDF 종단에서의 後方 입력에 의한 밀도반전과 바로 직전에 계산된 전방 밀도반전을 추가하여 후방으로 진행하는 밀도반전을 계산하는 식으로 하여 왕복하는 형태로 양단에서의 밀도반전의 변화가 매우 작게 되면 계산을 끝내는 형식을 취한다. 여기에서 문제점은 역방향 펌핑의 경우 후방 입력신호광파워가 크면, EDF 양단의 밀도반전이 정상상태에 돌입하지 않고 진동하게 되어 해를 구할 수 없게 된다.

이러한 발진 양상이 없는 알고리즘으로서 EDFA의 光子보존성을 이용할 수 있는데 이는 식(3)과 같이 EDF 전체길이에  $L$ 에 대해서 입력과 출력되는 광자의 수가 같다는 것이다. 여기서  $x$ 는 평균밀도반전을 의미하고 식(3)에서 미지수  $x$ 를 구할 수 있다. 이를 사용하여 신호이득, 펌프감쇠를 계산할 수 있지만 양단에서 같은 크기의 출력자연방출광을 평균밀도반전에  $x$ 에 의한 반전인자  $n_{sp,i}(x)$ 를 사용하여 근사화하였기 때문에 자연방출광의 증폭을 이대로는 계산할 수 없다.

$$(G_p(x) - 1) \hat{q}_{in} + (G_s(x) - 1) \hat{s}_{in} + \sum_j 4n_{sp,j}(x)(G_j(x) - 1) \hat{p}_0 \approx 0 \quad (3)$$

여기서 이득 또는 감쇠  $G_i(x) = \exp\{[a_i^e x - a_i^a(1-x)]L\}$ ,  $n_{sp,i}(x) = \frac{a_i^e x}{a_i^e x - a_i^a(1-x)}$ ,  $x = \frac{\int_0^L n_2(z) dz}{L}$  이다.

이를 위해 단일 펌핑의 경우, 전방 자연방출광이 후방 자연방출광에 비해 작고 전방 자연방출광은 초단의 밀도 반전에 의한 반진인자를 사용해 근사화할 수 있다. 후방 자연방출광의 경우 이러한 전방 자연방출광의 특성과 앞서 광자보존성에 의해 출력되는 식(3)의 총 자연방출광의 광자량을 고려할 때 식(4)와 같이 근사화할 수 있다. 또한 이로부터 근사적인 잡음지수를 식(5)와 같이 해석적으로 표현할 수 있다.

$$\tilde{p}_j^-(0) \approx 4n_{sp,i}(x)(G_j(x)-1) \tilde{p}_0 - 2n_{sp,i}(n_2(0))(G_j(x)-1) \tilde{p}_0 \quad (4)$$

$$NF^-(\lambda_j) \approx 4n_{sp,i}(x) - 2n_{sp,i}(n_2(0)) \quad (5)$$

앞서의 경우와 마찬가지로 EDF를 미소구간으로 나누어 수행할 수 있는데 이 역시 입력신호광파워가 커지면 식(4)의 근사치에서 많이 벗어나기 때문에 다른 방법을 찾아야 한다.

고리형 고정이득 EDFA에서 EDF 길이는 29m이고 규격화 펌프광파워가 50일 때 15dB의 이득을 유지하도록 할 경우 1550nm의 파장에서 최대 규격화 신호입력광파워는 1이 되고 이 이상되면 이득은 떨어진다. 이 조건은 현재 사용되는 EDFA의 사양에 따르면 980nm 펌프광이 약 17.5mW, 고정이득을 위한 최대 신호광파워는 -10dBm에 해당한다. 소신호입력의 경우 발진광만이 나타나게 되는데 이 상황에서 발진광의 입력방향과 파장 및 소신호광의 입력방향에 따른 잡음지수의 특성을 광자보존성에 의해 계산하고자 한다. 계산상에서 자연방출광을 무시하더라도 신호광, 발진광파워에 비해 미약하므로 무시해도 큰 에러는 없는 것으로 간주할 수 있다.

그림 2.에서 보는 것처럼 전후방 발진입력에 대해서 발진파장이 단파장일수록 전방 잡음지수는 크고 반면 후방 잡음지수는 작아지는 경향을 볼 수 있는데 이는 흡수율  $r^a = \alpha^a / (\alpha^e + \alpha^a)$ 이 단파장일수록 커져 밀도반전이 종단에서 크고 반면에 초단에서는 작기 때문이다. 전후방 발진입력의 두 경우를 비교해 보면 전방 발진입력의 경우 전후방 잡음지수의 차이가 큰 반면, 후방 발진입력은 작은 것이 특징이다. 그 이유는 전방 발진입력은 EDF의 초단에서의 큰 펌프광에 의해 밀도반전을 크게 하고 종단에서는 감쇠된 펌프광과 증폭된 발진광에 의해 작아지게 되어 전방 자연방출광은 작게 증폭되는 반면 후방 자연방출광은 크게 증폭된다. 반면에 후방 발진입력은 EDF의 초단에서의 큰 펌프광이기도 하지만 증폭된 후방 발진광에 의해 밀도반전을 떨어뜨리고 종단에서는 미약한 후방 발진광에 의해 크게 되어 전방 자연방출광은 전자에 비해 좀 더 증폭되는 반면 후방 자연방출광은 덜 증폭된다.

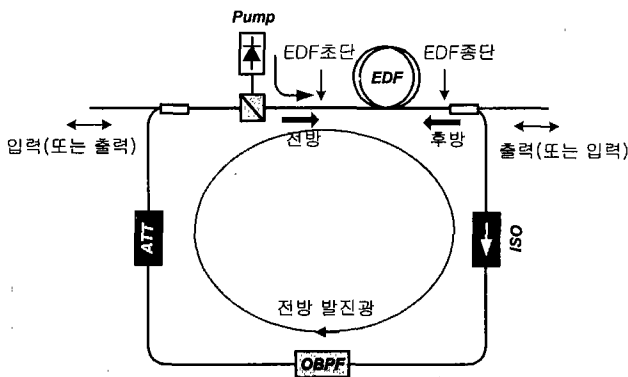


그림 1. 고리형 고정이득 EDFA의 구조

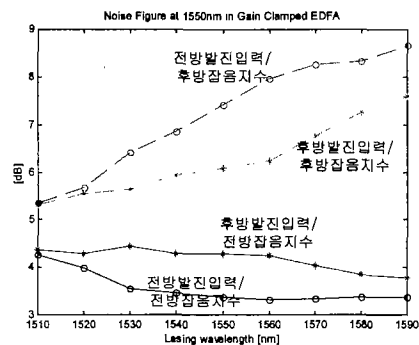


그림 2. 발진광의 파장, 입력방향 및 소신호광의 입력방향에 따른 1550nm의 신호파장에서 잡음지수

참고문헌

- (1) M. Cai, X. Liu, J. Cui, P. Tang, and J. Peng, "Study on Noise Characteristic of Gain-clamped Erbium-Doped Fiber-Ring Lasing Amplifier," *IEEE Photonic Technol. Lett.*, Vol. 9, No. 8, pp 1093-1095, 1997.
- (2) T. Georges and E. Delevaque, "Analytic modeling of high-gain erbium-doped fiber amplifiers," *Optics Lett.*, Vol. 17, No. 16, pp 1113-1115, Aug. 1992.