

論文2002-39SD-4-7

## 양방향 발진고리형 고정이득 EDFA에서의 잡음지수 특성 (The Characteristics of Noise Figure in Bi-directional Fiber Ring Laser Gain Clamped EDFA)

金 翊 相 \*, 金 昌 俸 \*\*, 李 賢 宰 \*\*\*, 明 承 一 \*\*\*

(Ik-Sang Kim, Chang-Bong Kim, Hyun-Jae Lee, and Seung-II Myung)

### 요 약

양방향 ADM 노드에서 자동이득제어를 위해 발진고리형 고정이득 EDFA를 적용할 경우 잡음지수 특성을 검토하고자 한다. 이를 위해 소신호 입력인 경우에 한해서 발진보상광의 발진방향 및 발진과장에 따른 잡음지수 특성을 평균밀도반전 알고리즘에 의해 계산하였고 실험적으로 확인하였다. 그 결과 단파장의 발진보상광이 광섬유고리에서 후방 발진을 일으킬 경우가 양방향의 소신호 잡음지수 측면에서는 가장 양호한 조건으로 판명되었다.

### Abstract

FRLGC(Fiber Ring laser Gain Clamped) EDFA is demonstrated for an automatic gain control in bi-directional ADM(Add Drop Multiplexer) node configuration. Specifically, we investigate bi-directional characteristics of noise figure. Assuming a bi-directional small signal input, noise figures for forward or backward signal input are calculated using average inversion algorithm, according to the propagating directions and lasing wavelengths of a compensating signal. The operating condition of FRLGC-EDFA may be optimized with a backward lasing and short lasing wavelength in the aspect of bi-directional noise figure characteristics.

\* 正會員, 培材大學教 情報通信工學部

(Dept. of Information &amp; Communication Eng., Paichai University)

\*\* 終身會員, 公州大學教 情報通信工學部/生産技術研究所 研究員

(Dept. of Information &amp; Communication Eng., Kongju University)

\*\*\* 正會員, 韓國電子通信研究院 光通信研究部

(Dept. of Optical Communication, ETRI)

※ 본 연구는 배재대학교 BK21 및 한국과학재단의 지역대학우수과학자 육성지원연구사업의 지원금으로 수행되었습니다. 또한 한국전자통신연구원 광통신연구부의 기술적인 도움에 감사드립니다.

接受日字: 2001年 11月5日, 수정완료일: 2002年 2月19日

### I. 서 론

WDM(Wavelength Division Multiplexing) 전광통신망의 ADM(Add Drop Multiplexer) 노드에서 WDM 채널 분기결합시에 총입력광파워가 변화하면서 어븀첨가광증폭기(EDFA, Erbium Doped Fiber Amplifier)의 출력단에 각 채널의 이득이 변하기 때문에 성능의 열화를 초래하게 되어 이를 최소화시키기 위해 자동이득 조정 광증폭기에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다. 이를 위해 WDM 채널들의 결합 또는 분기시에 발생하는 입력신호광파워의 증감을 보상해 주도록 EDFA의 입력단에 보상신호를 사용하여 입력단의 광파워를 거의 일정하게 유지시켜 줌으로써 입력광파워의 변화로 인한 이득의 변화를 최소화시키는 방법이 있다.<sup>[1]</sup> 또 하나는

펌프광을 제어함으로써 입력신호광의 변화에 대해서 이득을 조정하는 방법이 있다.

최근에는 단일광선로를 사용하여 전송하는 연구가 많이 진척되어 왔는데 광선로의 포설이 반으로 줄고 사용되는 광소자의 수도 절감할 수 있다는 장점이 있는 반면에 이를 위해 양방향에서 들어오는 입력광에 대해서 증폭시켜주는 양방향 EDFA의 사용에 있어서는 많은 제약조건이 따른다. 여기서 주된 문제점은 Rayleigh 후방산란이 cavity를 형성하여 발진될 수 있고 이로 인해 EDFA가 포화되어 정상적인 증폭을 수행할 수 없고 또한 WDM 채널간에 누화가 발생할 수 있다는 점인데 이를 극복할 수 있는 양방향 EDFA 구조가 연구되었다.<sup>[2]</sup> 양방향 EDFA를 ADM노드에 적용할 경우에 대한 연구도 있었는데 여기서는 광섬유격자소자(FBG, Fiber Bragg Grating)를 사용하여 선형 cavity 구조의 양방향 고정이득 EDFA에 관한 것이다.<sup>[3]</sup>

본 논문에서는 단일펌프 EDFA에 광섬유고리를 형성하여 광섬유고리의 일정한 손실이 EDFA의 이득과 같은 부귀환 증폭특성을 사용하여 이득을 일정하게 고정시켰다. 여기서 입력신호광의 방향에 따른 잡음지수 특성을 양호하게 하는 조건을 구하고자 한다.<sup>[4]</sup> 이를 위해 입력신호광을 보상해 주는 발진광의 방향 및 발진파장에 따라 최적의 조건을 구하고자 한다.

II. 고정이득 EDFA의 구조 및 특성 파라미터 추정

먼저 그림 1과 같이 개회로 EDFA입출력 양단에 광

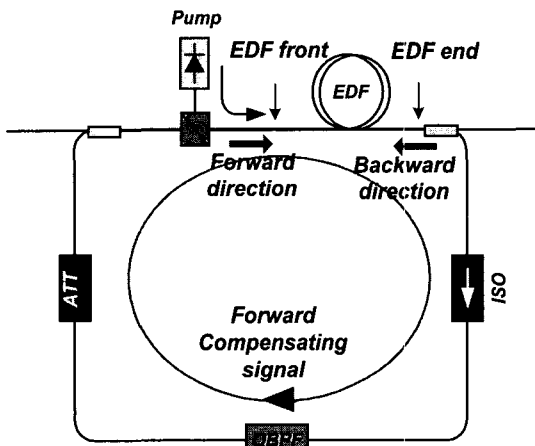


그림 1. 고정이득 EDFA의 구조  
Fig. 1. Structure of gain-clamped EDFA.

섬유고리를 연결하면 EDFA의 자연방출광이 광섬유고리를 돌아 입력으로 들어와 이득을 얻어 다시 광섬유고리를 돌아 EDFA에 입력되어 무한적으로 돌게 된다. 이 때 EDFA 입력단에서 무한히 겹치는 자연방출광의 위상이 같으면 보강간섭에 의해 정상적으로 입력이 가해져서 증폭되어 발진하게 된다. 또한 발진되는 발진광은 EDFA의 이득과 나머지 광경로의 손실과 동일하게 된다. 따라서 광섬유고리의 수동소자들의 안정된 손실이 이득과 같다는 점을 이용한다면 EDFA의 이득을 일정하게 유지시켜 줄 수 있다는 것이 고정이득 EDFA의 핵심이 된다.

EDFA의 동작메커니즘은 펌프광에 의해 EDF내의 어븀원자를 여기시켜 여기된 어븀원자가 입력광을 증폭시키고 자연적으로 형성되는 잡음광, 즉 자연방출광을 생성하게 된다. 자연방출광은 전후방으로 전파하게 되는데 광섬유고리의 광도립기에 의해 전후방 중 하나의 자연방출광만이 광섬유고리를 순환하면서 발진하게 된다. 또한 광섬유고리 안의 OBPF(Optical Band Pass Filter)에 의해 발진파장이 결정된다. 광섬유고리안의 광감쇠기는 전체 광섬유고리의 손실을 조절해 줄 수 있어서 고정이득을 조절할 수 있게 된다.

먼저 본 논문에서 구성한 EDFA는 980nm 펌프광을 사용하고 양방향 WDM coupler를 사용해 23m의 EDF에 단방향 펌핑을 하는 구조로 되어 있다. 펌프광파위에 따라 개회로 EDFA의 전방 자연방출광 출력스펙트럼은 그림 2와 같다. 여기서 범례의 IR은 Inversion Ratio로서 다음에 정의하는 평균밀도반전율을 의미한다.

그림 2에서 펌프 전류 73.1mA(입력펌프광파워 19.6mW)을 주입하여 사용된 EDF 사양서에서 제공되

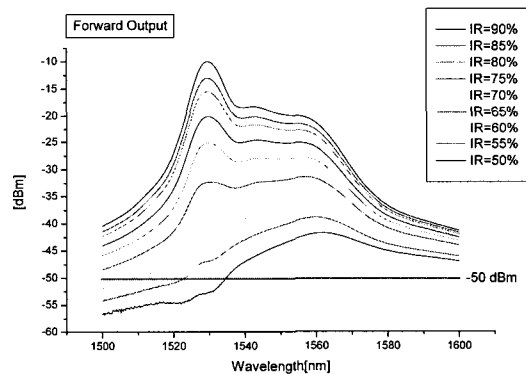


그림 2. 펌프광에 따른 전방 자연방출광 스펙트럼  
Fig. 2. Forward spontaneous emission power spectrum according to pump power.

는 규격화 신호이득 스펙트럼과 대비하여 평균밀도반전을 87%를 이루었음을 알 수 있고 이로부터 기저광파 위 레벨은 약 -50dBm으로 추정된다. 여기서 기저광파 위 레벨  $P_0(\lambda)$  및 전방자연방출광파위  $P_{out}$ 는 다음과 같다.

$$P_0(\lambda) = NFh\nu\Delta\nu = -45 [dBm/nm] \quad (1)$$

$$P_{out} = NFh\nu\Delta\nu(G_s - 1) \approx NFh\nu\Delta\nu G_s \quad (2)$$

또한 평균밀도반전율은 여기밀도  $n_2$ 의 전체 EDF 길이에 대한 평균값이 되고 다음과 같다.

$$\bar{n}_2 = \frac{\int_0^L n_2 dz}{L} \quad (3)$$

광스펙트럼분석기(OSA)의 분해능이 0.5nm로 설정되어 있기 때문에 이상적인 기저광파위레벨은 -48dBm/0.5nm가 되고 이로부터 전방 출력단의 손실을 약 2dB 정도로 추정할 수 있다. 이로부터 특정 파장(가령 1550nm)에서 전방 자연방출광파위 레벨이 -20dBm이면 기저레벨 -50dBm으로부터의 차이, 즉 30dB가 신호이득으로 추정할 수 있다. 단, 이것은 큰 펌프광에 대해서 소신호이득의 경우에만 해당된다. 일단 평균밀도반전율과 신호이득이 추정되면 다음과 같이 파장에 따른 이득계수를 구할 수 있다.

$$G_s [dB] = 4.34 \alpha (\bar{n}_2 - r^a) L \quad (4)$$

$$\alpha = \alpha^e + \alpha^a, \quad r^a = \alpha^a / \alpha$$

여기서  $\alpha_e$ 는 이득계수,  $\alpha_a$ 는 감쇠계수,  $r_a$ 는 흡수율,  $\bar{n}_2$ 은 평균밀도반전율,  $L$ 은 EDF의 길이를 나타낸다. 사용된 EDF 사양서에서 제공되는 규격화 방출/흡수계수로부터  $r_a$ 을 알 수 있고 또한 추정된 평균밀도반전율, 23m EDF 길이로부터 1550nm 파장에서  $\alpha_e$ 는  $\alpha_a$ 는 각각 1.66[dB/m], 1.13[dB/m]로 추정된다.

EDF의 출력단에서 980nm의 펌프광출력을 측정하고 펌프광입력에 대한 출력의 비율, 즉 감쇠  $G_p$ 는 다음 식에 의해 구해진다.

$$G_p [dB] = -4.34 \alpha_p (1 - \bar{n}_2) L \quad (5)$$

대략 펌프광의 감쇠계수  $\alpha_p$ 는 약 3.9[dB/m]로서 추정된다.

이와 같이 실험적으로 추정된 특성 파라미터,  $\alpha_e$ ,  $\alpha_a$ ,  $\alpha_p$ 를 사용하여 EDFA를 모의실험할 수 있다. 또한

주어진 EDF의 사양서로부터 1530nm에서 포화광출력 120μW를 사용하였다. 추가적으로 그림 1.에서 많이 사용되는 용어, 즉 전방, 후방, EDF 초단, EDF 종단이 표기되어 있다.

### III. 모의실험을 위한 알고리즘

먼저 그림 1과 같이 단일펌핑을 가지는 고리형 고정 이득 EDFA의 구조에서 잡음지수 특성의 관건이 되는 자연방출광을 고려하여 EDFA의 특성을 계산해 볼 필요가 있다. EDF 양단에서 파워가 영이고 전후방으로 전파되어 증폭되는 자연방출광의 경우, 양단에서 경계 조건을 만족하는 방정식을 풀어야 하는데, 이를 위해 사용되는 알고리즘으로는 대표적으로 relaxation, 평균 밀도반전 알고리즘 등을 들 수 있다.<sup>[56]</sup> 먼저 relaxation 알고리즘의 경우, 초기에는 EDF초단의 입력만을 고려하여 전방 여기밀도 및 전방 신호광, 펌프광, 자연방출광을 계산한 다음, EDF 종단에 가면 후방 입력에 의해 바로 직전에 계산된 전방 진행광을 고려하여 후방으로 진행하는 여기밀도와 후방 진행광을 계산한다. 이런식으로 하여 왕복하는 형태로 양단에서의 여기밀도가 수렴하게 되면 계산을 끝내고 전체 EDF 길이에 대한 여기밀도 및 전후방 진행광의 분포를 얻을 수 있다. 여기에서 문제점은 단일 펌핑의 경우 후방 입력신호광파위가 크면, EDF 양단의 여기밀도가 정상상태에 돌입하지 않고 진동하게 되어 해를 구할 수 없게 된다.

이러한 진동 양상이 없는 알고리즘으로서 평균밀도반전 알고리즘을 들 수 있는데 이는 EDFA의 광자flux 보존성을 이용한다. 광자flux 보존성은 식 (7)과 같이 EDF 전체길이  $L$ 에 대해서 입력과 출력되는 광자 flux가 같다는 것이다. 펌프광자 flux와 신호광자 flux, 자연방출광 광자 flux는 다음과 같다.

$$\tilde{q} = \frac{P_p}{h\nu_p}, \quad \tilde{s} = \frac{P_s}{h\nu_s}, \quad \tilde{p}_0 = \frac{h\nu\Delta\nu}{h\nu} = \Delta\nu \quad (6)$$

식 (7)에서  $\bar{n}_2$ 는 평균밀도반전을 의미하고 미지수  $\bar{n}_2$ 를 구할 수 있다. 이를 사용하여 신호이득, 펌프감쇠를 계산할 수 있지만 양단에서 전후방 출력자연방출광을 평균밀도반전율에 의한 반전인자  $n_{sp}$ 를 사용하여 같은 크기로서 근사화하였기 때문에 정확한 전후방 자연방출광의 해를 이대로는 계산할 수 없다.

$$(G_p(\bar{n}_2) - 1) \hat{q}_{in} + (G_s(\bar{n}_2) - 1) \hat{s}_{in} + \sum_j 4n_{sp,j}(\bar{n}_2)(G_j(\bar{n}_2) - 1) \hat{p}_0 \approx 0 \quad (7)$$

여기서 이득 또는 감쇠 및 반전인자는 다음과 같이 표시된다.

$$G_j(\bar{n}_2) = \exp\{(a_j^e \bar{n}_2 - \alpha_j^a(1 - \bar{n}_2))L\} \quad (8)$$

$$n_{sp,j}(\bar{n}_2) = \frac{\alpha_j^e \bar{n}_2}{\alpha_j^a \bar{n}_2 - \alpha_j^a(1 - \bar{n}_2)} \quad (9)$$

이를 위해 단일 펌핑의 경우, 전방 자연방출광이 후방 자연방출광에 비해 작고 전방 자연방출광은 초단의 밀도반전에 의한 반전인자를 사용해 근사화할 수 있다. 후방 자연방출광의 경우 이러한 전방 자연방출광의 특성과 앞서 광자flux 보존성에 의해 출력되는 식 (7)의 총 자연방출광의 광자flux를 고려할 때 식 (10)과 같이 근사화할 수 있다. 또한 이로부터 근사적인 후방 잡음지수를 식 (11)과 같이 해석적으로 표현할 수 있다.

$$\hat{p}_j^-(0) \approx 4n_{sp,j}(\bar{n}_2)(G_j(\bar{n}_2) - 1) \hat{p}_0 - 2n_{sp,j}(\bar{n}_2(0))(G_j(\bar{n}_2) - 1) \hat{p}_0 \quad (10)$$

$$NF^-(\lambda_j) \approx 4n_{sp,j}(\bar{n}_2) - 2n_{sp,j}(\bar{n}_2(0)) \quad (11)$$

입력신호광, 펌프광이 주어지면 EDF를 미소구간으로 나누어 EDF초단에서부터 광자flux 보존성을 이용하여 그 미소구간에서 여기밀도  $n_2$ 와 다음 단에 적용될 신호광자flux, 펌프광자flux를 구할 수 있다. 이런 식으로 전체 EDF길이에 대한 여기밀도 분포 및 신호광, 펌프광의 분포를 구할 수 있다. 그러나 입력신호광파워가 커지면 총 자연방출광이 식 (7)의 근사치보다 많이 크기 때문에 다른 방법을 찾아야 한다.

relaxation 알고리즘의 경우에는 후방 입력신호광이 커지면 해를 구할 수 없어서 적용하기 곤란하지만, 평균밀도반전 알고리즘의 경우 자연방출광을 무시한다면 이 경우에도 적용이 가능하다. 단, 자연방출광을 무시할 수 있는 조건은 큰 입력신호광에 의해 EDFA가 포화상태에 있을 경우에 제한적으로 사용될 수 있다. 다음에 설명하게 될 고정이득 EDFA의 전후방 잡음지수를 계산하는 경우, 발진보상광에 의해 EDFA는 어느 정도 포화되어 있기 때문에 평균밀도반전 알고리즘을 사용하여 잡음지수 특성을 모의실험해 볼 수 있다.

#### IV. 양방향 고정이득 EDFA의 이득 특성

42.4mA 펌프전류 주입시에 펌프광파워는 약 9mW이고 1550nm 파장에서 개회로 EDFA 초단으로부터 중단까지의 순수한 EDF 소신호이득은 약 26dB로서 측정되고 평균밀도반전율은 81% 정도이다.

고정이득 EDFA의 경우 광섬유고리의 OBPF를 1530nm로 조정하고 광고립기를 전방향으로 정치시킨다. 광감쇠기를 약 9dB로 하면 EDF를 제외한 나머지 광섬유고리의 총 손실은 약 21dB 정도 된다. 이 경우 전방 자연방출광 스펙트럼은 그림 3과 같다. 개회로 EDFA에서 추정된 기저광파워 레벨 -55dBm을 근거로 해서 1550nm에서의 소신호 고정이득은 약 19dB이고 평균밀도반전율은 약 70%정도이다. 그림 3.에서 전방 입력신호광파워가 커지면서 점점 평균밀도반전율은 떨어짐을 볼 수 있고 이는 1530nm의 발진보상광의 이득이 광섬유고리의 손실보다 작게 되어 더 이상 발진을 하지 못하고 고정이득을 유지하지 못함을 의미한다.

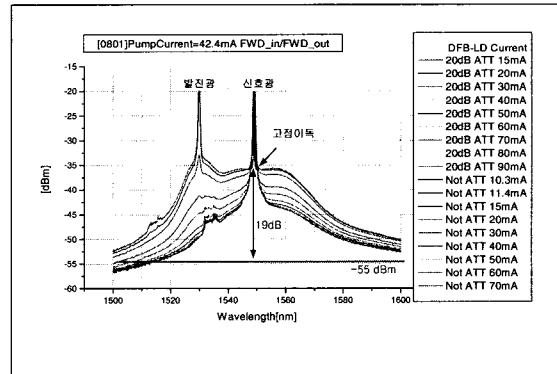


그림 3. 고정이득 EDFA에서 입력신호광에 따른 전방 자연방출광 스펙트럼

Fig. 3. Forward spontaneous emission power spectrum according to input signal power in gain-clamped EDFA.

이번에는 광섬유고리의 OBPF를 1560nm로 조정하고 광감쇠기를 6.5dB로 조정하면 1550nm에서의 소신호 고정이득이 19dB로서 앞서 1530nm 발진보상광과 같은 조건이 된다. 또한 광고립기를 후방향으로 정치시켜서 전방 입력신호광파워를 증가해가면서 신호이득을 측정한다.

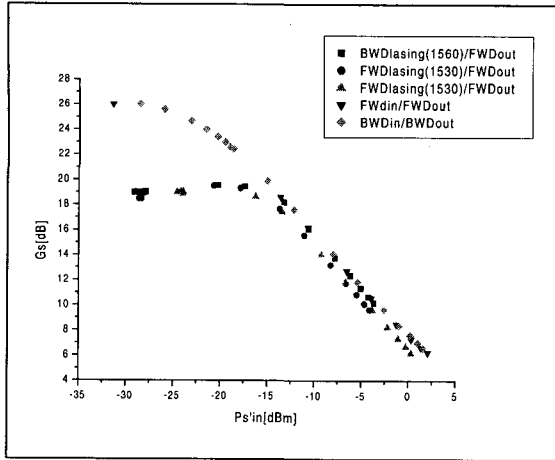


그림 4. 개회로 및 고정이득 EDFA에서 입력신호광에 따른 전방 신호이득  
 Fig. 4. Forward signal gain vs. input signal power in open-loop and gain-clamped EDFA.

그림 4에서 개회로 EDFA 및 1530nm 전방발진, 1560nm 후방발진의 세 가지의 경우에 대해서 전방 신호이득을 보여준다. 여기서 입력신호광파위가 -15dBm 까지 고정이득을 유지함을 알 수 있다. 또한 1530nm 전방발진과 1560nm 후방발진의 경우 모두 거의 같음을 알 수 있다. 이는 광자flux 보존성으로부터 입력광의 방향과 상관없이 EDFA의 평균밀도반전율은 동일하다는 것에 기인한다. 측정하지는 않았지만 이러한 광자 flux 보존성으로부터 후방 입력신호광에 대한 이득 특성도 동일할 것으로 생각된다. 이는 개회로 EDFA의 경우 실험적으로 입증하였다.

V. 양방향 고정이득 EDFA의 잡음 특성

양방향 고정이득 EDFA의 잡음특성을 알아보기 위해 먼저 문제의 단순성을 피하도록 발진보상광이 두드러지게 나타나고 입력신호광은 매우 미약한 소신호입력광에 제한해서 모의실험을 한다. 이 경우 고정이득이 무너지는 큰 파워의 입력신호광과 작은 파워의 소신호 입력광의 두 가지 잡음지수를 고려하면 이 사이의 입력신호광의 경우에는 이 두 잡음지수 한계값 사이에 있을 것이라는데 있다.

그림 5는 발진보상광의 방향 및 파장에 따른 1550nm 파장의 소신호 입력시에 전후방 잡음지수를 모의실험한 결과이다. 모의실험은 자연방출광을 무시하고 평균 밀도반전 알고리즘을 사용하였다. 모의실험 조건은

9mW 단일 펌프광, 23m EDF, 특성파라미터, 16dB 고정이득을 사용하였다.(注 : 앞서의 실험조건에서는 고정 이득이 19dB였는데 달리 한 이유는 자연방출광을 무시 하기 위해 더욱 포화된 조건에서 계산하려고 한 데 있다.)

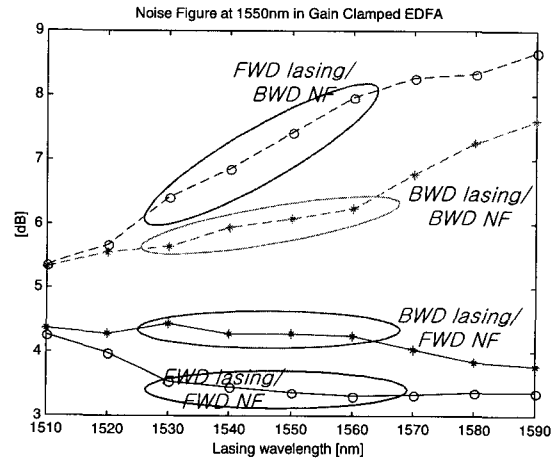


그림 5. 발진보상광의 발진방향 및 파장에 따른 1550nm에서의 소신호 전후방 잡음지수  
 Fig. 5. Forward and backward small signal noise figure at 1550nm wavelength vs. lasing direction and wavelength of a compensating signal.

첫 번째로 전방 잡음지수가 후방 잡음지수에 비해 작음을 알 수 있는데 이는 EDF중단에서 밀도 반전이 초단에 비해 떨어져서 후방 자연방출광이 전방에 비해 EDF초단에서 유효하게 증폭되기 때문이다. 두 번째는 전방발진인 경우 전방 소신호 잡음지수가 후방발진에 비해 작음을 알 수 있는데 이는 전방 발진보상광이 후방 발진보상광에 비해 EDF 중단에서 밀도반전을 더 떨어뜨리기 때문에 전방 자연방출광이 EDF 중단에서 유효하게 증폭되지 못하는 이유이다. 반면 후방 소신호 잡음지수의 경우에는 반대 양상을 보이는데 이는 전방 발진이나 후방발진의 두 경우 모두 같은 평균밀도반전율을 유지하고 총 전후방 자연방출광은 거의 동일하기 때문이다. 세 번째로 발진보상광의 파장이 단파장일수록 전방 소신호 잡음지수는 커지는 반면 후방 소신호 잡음지수는 작아지는 경향을 보인다. 그 이유는 단파장일수록 EDF의 특성상 흡수율  $\gamma^a$ 가 커서 EDF 중단에서의 밀도반전이 크기 때문이다.(주 : 흡수율 정의는 식 (4) 참조)

$$n_2(L) = \frac{a_b^* \hat{q}^+(L) + a_s^* \hat{s}^+(L) + \sum_j a_j^* \hat{b}_j^+(L)}{a_b^* \hat{q}^+(L) + (a_s^* + a_s^*) \hat{s}^+(L) + \sum_j (a_j^* + a_j^*) \hat{b}_j^+(L) + 2 \cdot sp}$$

$$\approx \frac{a_s^* \hat{s}^+(L)}{(a_s^* + a_s^*) \hat{s}^+(L)} \approx r_s^* \quad (12)$$

여기서  $\hat{s}^+(L)$ 은 EDF 종단에서의 전방 발진보상광자 flux,  $\hat{b}_j^+(L)$ 은 EDF 종단에서의 전후방 자연방출광자 flux,  $\hat{q}^+(L)$ 은 EDF 종단에서의 전방 펌프광자 flux를 나타내고  $sp$ 는 추가 자연방출광이다. EDF 종단에서 전방 펌프광자 flux는 감소되어 매우 작고 전후방 자연방출광자 flux는 포화상태에서 미미하기 때문에 식(12)에서와 같이 발진보상광자 flux가 우세하므로 종단에서의 여기밀도는 근사적으로 흡수율과 같게 된다.

실험적으로 이를 증명하기 위해서 앞서 9mW의 펌프광을 주입하고 1550nm 파장에서 19dB의 고정이득을 갖도록 광감쇠기를 조정한다.(注: 앞서의 모의실험조건에서는 고정이득이 16dB 였음) 여기서 OBPF를 1530nm, 1540nm, 1550nm, 1560nm로 조정함으로써 발진파장을 조정하고, 광섬유고리안의 광고립기를 전방 및 후방으로 정치함으로써 전후방 발진을 야기시킨다.

먼저 그림 6의 후방 자연방출광의 경우 전방발진에서는 단파장일수록 광파워 레벨이 두드러지게 떨어질 수 있다. 이는 그림 5에서 보는 것처럼 발진파장이 단파장일수록 후방 소신호 잡음지수가 현저하게 떨어지는 사실을 잘 대변해 준다. 후방발진의 경우에는 전방발진보다 더 낮은 광파워레벨을 가지는 것을 볼 수 있는데 이는 그림 5의 결과와 잘 일치한다. 그러나 발진파장에 따른 구분이 명확하지 않고 거의 같은 스펙트럼을 볼 수 있다. 그림 5에서 후방발진의 경우가 전방발진에 비해 후방 소신호 잡음지수의 발진파장에 따른 변화의 기울기가 완만한 탓으로 비교가 가능하지만 그래도 기울기는 어느 정도 있기 때문에 실험결과의 후방자연방출광의 발진파장에 따른 모습은 조금이라도 차이가 있어야 할 것 같다. 그러나 그림 5는 실험조건(19dB)보다 더 작은 고정이득(즉, 16dB로서 더욱 포화된 상태)의 조건에서 계산된 결과이므로 잡음지수가 실제 실험조건에서 보다 더 크게 나타난다. 이는 실험조건에서는 발진파장에 따른 기울기가 모의실험에서 보다 더 완만해 짐을 뜻한다. 이 점에서 후방발진의 경우 후방 잡음지수에 대한 실험 결과, 즉 후방 자연방출광 스펙트럼이 발진파장에 따라 거의 같은 모습을 띠게 되는 것으로 설명할 수 있다.

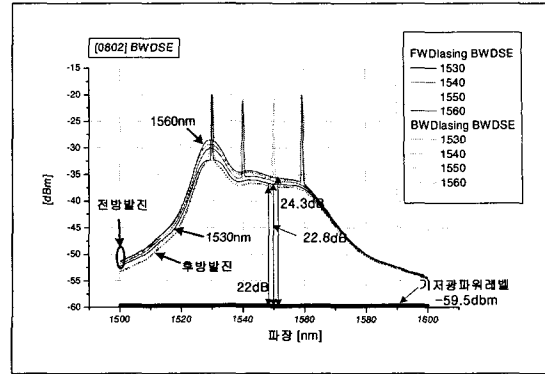


그림 6. 전후방발진의 경우 발진파장에 따른 후방 자연방출광 스펙트럼

Fig. 6. Backward spontaneous emission spectrum for forward and backward lasing vs. lasing wavelengths.

그림 7의 전방 자연방출광의 경우 전후방발진에서도 두 다 발진파장에 따른 스펙트럼의 변화가 거의 없고 또한 거의 같은 스펙트럼을 보인다. 이는 그림 5에서 전후방발진의 경우 전방 잡음지수의 발진파장에 따른 변화 기울기가 완만하고 또한 앞서 언급한 바처럼 그림 5의 전후방 발진의 전방 소신호 잡음지수의 차이는 실험조건에서는 더 작아질 수 있다는 것으로 설명할 수 있다.

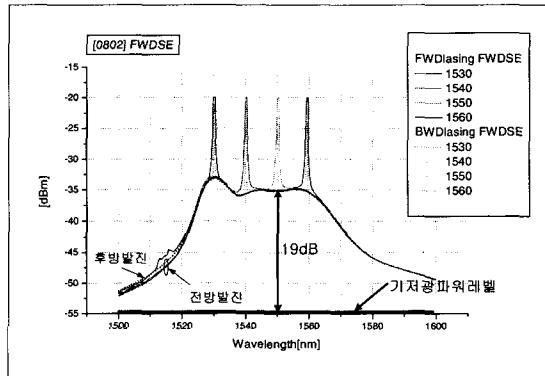


그림 7. 전후방발진의 경우 발진파장에 따른 전방 자연방출광 스펙트럼

Fig. 7. Forward spontaneous emission spectrum for forward and backward lasing vs. lasing wavelengths.

그림 6에서 1550nm에서 후방 소신호 잡음지수를 구하는 방법은 기저광파워레벨 -59.5dBm에서 1550nm 파장의 광파워레벨의 차이를  $C_{sp}$ 라고 정의하고 다음 식에

의해 구할 수 있다. 여기서  $G_s$ 는 1550nm에서의 소신호 이득이다.

$$NF = \frac{2G_{sp}}{G_s - 1} \quad (13)$$

가령 1560nm의 전방발진에서  $G_{sp}=24.3dB$ 이고 그림 7에서 기저광파워레벨 -55dBm에서 1550nm 파장의 광파워레벨의 차이, 즉 소신호 이득이 19dB라고 하면 (注: 사실 이보다 더 작게 나타나고 이 경우에는 전방 잡음지수는 3dB가 된다.) 식 (13)에 의해 후방 소신호 잡음지수는  $3dB + 24.3dB - 19dB = 8.3dB$ 가 된다. 이로부터 그림 8과 같이 정량적인 잡음지수를 계산할 수 있다. 여기서 최소의 잡음지수 3dB를 가정하고 상대적인 잡음지수를 나타낸다.

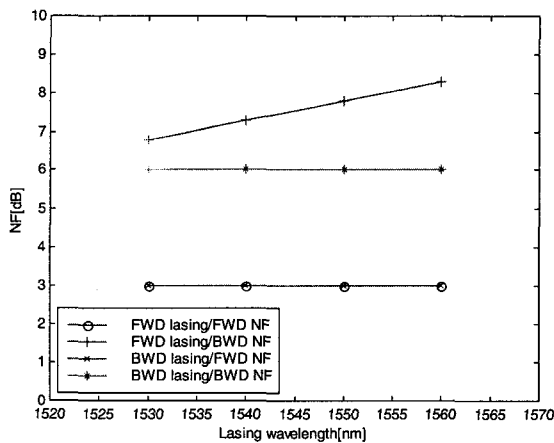


그림 8. 측정된 상대적 잡음지수  
Fig. 8. Measured relative noise figure.

## VI. 결 론

본 논문에서는 발진고리형 고정이득 EDFA를 양방향 ADM 노드에 적용할 경우 소신호입력광에 대한 잡음지수 특성을 검토해 보았다. 이는 양방향으로 대부분의 WDM 채널들이 분기된 상황을 나타낸다. 물론 양방향에서 동시에 입사되는 전후방 입력광파워 조합의 많은 경우들에 대해서 특성을 살펴 볼 필요는 있다. 그러나 발진광의 특성(발진파장 및 발진방향)에 따른 잡음특성에 초점을 두었고 문제에 대한 통찰성을 위해 단순화했기 때문에 일단은 양방향으로 동시에 입사된 어느 정도 광파워가 큰 신호광에 대해서는 고려하지 않았다.

그림 5의 1550nm 전후방 발진보상광인 경우, 각각

실제로 전후방에서 입사되는 1550nm의 신호광이 고정 이득을 유지하기 위해 최대 허용되는 상황(즉 고정이득이 유지되는 최대 결합 가능한 WDM 채널)에서의 잡음지수 특성을 의미한다. 반면 나머지는 소신호 입력인 경우에 해당됨으로써 결국 1550nm에서 고정이득을 유지하기 위한 최대허용 입력광(발진광은 사라진 상태)과 작은 광파워의 소신호입력광(발진광이 두드러진 상태)의 두 가지 경우에 대한 잡음지수 특성을 얻은 것이다.

그림 6과 7의 실험상의 조건에서라면 단파장의 발진보상광을 사용하고 발진방향을 후방향으로 적용하면 전후방으로 입력되는 신호광에 대해서 동시에 최적의 잡음특성을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

## 참 고 문 헌

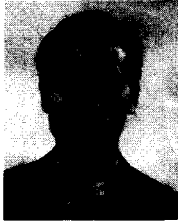
- [1] H. Okamura, "Automatic optical loss compensation with erbium-doped fiber amplifier," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 10, No. 8, pp. 1110~1116, Aug. 1992.
- [2] Kim, C. H. and Chung Y. C., "2.5 Gb/s/spl times/16 channel bidirectional transmission over 560-km of single-mode fiber using bidirectional EDFA based on spectrally interleaved synchronized etalon filters" International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication. *OFC/IOOC '99*. Technical Digest, pp. 310~312, 1999.
- [3] C. H. Kim, H. Yoon, S. B. Lee, C. H. Lee, and Y. C. Chung, "All-optical gain-controlled bidirectional add-drop amplifier using fiber Bragg gratings," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, Vol. 12, No. 7, pp. 894~896, Jul. 2000.
- [4] 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.
- [5] W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, and W. T. Vetterling, Numerical Recipes, *The Art of Scientific Computing*, Cambridge University Press, New York, 1986.

- [6] 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.

---

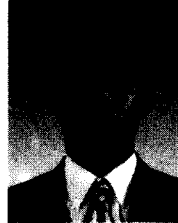
 저 자 소 개
 

---



金翊相(正會員)

1984년 2월 : 한양대학교 전자통신공학과(공학사). 1986년 2월 : 한양대학교 대학원 전자통신공학과(공학석사). 1995년 8월 : Texas A&M University Electrical Eng.(공학박사). 1987년 5월~1990년 6월 : 금성반도체 주임연구원. 1995년 4월~1997년 3월 : 한국통신 전송기술연구소 선임연구원. 1997년 3월~현재 : 배재대학교 정보통신공학부 조교수. <주관심분야 : 광섬유 레이저, 광증폭기, 광센서>



李賢宰(正會員)

1960년 9월 2일생. 1983년 : 서강대학교 물리학과 이학사. 1985년 : 서강대학교 물리학과 이학석사. 1990년 : 서강대학교 물리학과 이학박사. 1990년 5월~1992년 5월 : 한국표준과학연구원 박사후 연수 연구원. 1992년 6월~현재 : 한국전자통신연구원, 광통신연구부, WDM 시스템팀 책임연구원. <주관심분야 : 광통신 시스템 설계, 광전달망, 광소자 등>



金昌俸(終身會員)

1983년 : 고려대학교 전자공학과(공학사). 1988년 : Florida Tech 대학 전자공학과(공학석사). 1992년 : Texas A&M 대학 전자공학과(공학박사). 1993년~현재 : 공주대학교 정보통신공학부 부교수. <주관심분야> 반도체 레이저, 광섬유레이저, 양방향광전송



明承一(正會員)

1970년 9월 1일생. 1997년 2월 명지대학교 전자공학과 졸업(공학학사). 1999년 명지대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 2000년 3월~현재 한국전자통신연구원 광통신연구부 광송수신기술팀 연구원. <주관심분야 : DWDM 광트랜스폰더 기술, Digital Wrapper기술, OTDM 신호 발생 및 전송기술>