

# 에르븀 첨가 광섬유 증폭기의 장거리 전송에 따른 이득 평탄화 특성

정희상 · 이동한

충남대학교 물리학과, 대전시 유성구 궁동 220

정윤철

한국과학기술원 전기 및 전자공학과, 대전시 유성구 구성동 373-1

임성준 · 조홍근

전력연구원, 대전시 유성구 문지동 103-16

(1998년 3월 18일 받음, 1998년 5월 4일 수정본 받음)

에르븀 첨가 광섬유 증폭기(EDFA)를 제작하여 장거리 전송 시의 이득, 신호대 잡음비와 대역을 측정하였다. 이득 평탄화 되지 않은 EDFA를 recirculating loop에 넣어 장거리 전송 실험을 한 결과 EDFA 20 회 통과시에 3 dB 이득 변화를 보이는 대역이 6 nm 이다. 반면에 이득 평탄화 된 EDFA는 1 dB 이득 대역이 22 nm 이며, EDFA 100회 통과시에 9 nm 대역이 5 dB 이내에 들게 되어 여러 파장을 동시에 초장거리 전송 할 수 있음을 확인하였다.

## I. 서 론

Erbium-Doped Fiber Amplifier(EDFA)는 양자 한계에 가까운 잡음지수, 느린 이득 동특성, 작은 편광 의존도 및 넓은 이득 대역 특성 등의 장점으로 광전송 시스템에서 널리 쓰이게 될 광증폭기이다. 특히 1.55  $\mu\text{m}$  근처 파장에서 넓은 이득 대역을 갖기 때문에 여러개의 파장을 동시에 증폭할 수 있어 WDM(Wavelength Division Multiplexing)에 적합한 광증폭기라고 할 수 있다. WDM용으로 이상적인 광증폭기는 낮은 잡음지수와 넓은 이득 대역의 특성뿐만 아니라 파장에 따른 이득의 평탄화가 아주 중요한 과제이다. 특히 다수의 광증폭기가 사용되는 장거리 시스템에서는 광증폭기를 많이 지날수록 이득 평탄화 대역이 작아지기 때문에 더 중요성이 크다. 이런 이유로 단일 광증폭기의 이득 평탄화와 더불어 장거리 전송 시의 광증폭기의 특성은 많은 연구가 이루어지고 있다. 광증폭기 recirculating loop은 장거리 전송 실험을 위해서 테스트 베드를 제작할 경우에 비해 경제성, 유동성 면에서 이점이 있기 때문에 연구에 활용되고 있다.<sup>[1-3]</sup> 국내에서도 recirculating loop을 이용하여 EDFA를 여러번 통과한 출력의 특성을 측정 한 바 있다.<sup>[4]</sup>

본 연구에서는 광증폭기 recirculating loop을 제작하여 EDFA의 장거리 전송 시의 출력, 이득, 이득 대역, 신호대 잡음비와 대역 등의 특성을 측정하였으며 특히, 전송 거리가 수 천 킬로미터 이상인 초장거리의 특성을 분석하였다. 이득 평탄화 되지 않은 EDFA 측정 결과 장거리 시스템에서는 이득 대역이 빠른 기울기로 감소하였다. 반면에 장주기 FBG(Fiber Bragg Grating) 필터를 추가하여 1530 nm의 Amplified Spontaneous Emission(ASE)를 제거하고, 이득 평탄화 된 EDFA의 경우에, 1 dB 이득 평탄화 대역이 22 nm인 EDFA를

recirculating loop에 넣어 100 개의 EDFA를 통과하면 9 nm 대역이 5 dB 이내에 들어온다. 이 EDFA의 신호대 잡음비는 이득 평탄화 대역을 포함한 27 nm가 1 dB 이내로 평탄하며 EDFA 100회 통과시에(8000 km에 해당) 13 nm가 5 dB 이내에 들어온다. 따라서 간단한 구조의 EDFA를 제작하여 여러 파장을 초장거리 전송 할 수 있음을 확인하였다.

## II. 실험장치

그림 1은 장거리 전송 시의 광증폭기의 특성을 측정하기 위한 광증폭기 recirculating loop의 개략도 이다. 입력 신호는 AOM(acousto-optic modulator) #1과 3 dB coupler를 통하여 loop 안으로 입력된다. 그리고 단일모드 광섬유 17 km는 loop을 한바퀴 도는 시간을 결정하는데 이는 87  $\mu\text{s}$  이다. Isolator를 통과한 신호는 광증폭기를 통과하여 variable attenuator를 지나게 된다. AOM #2를 통과한 신호는 3 dB

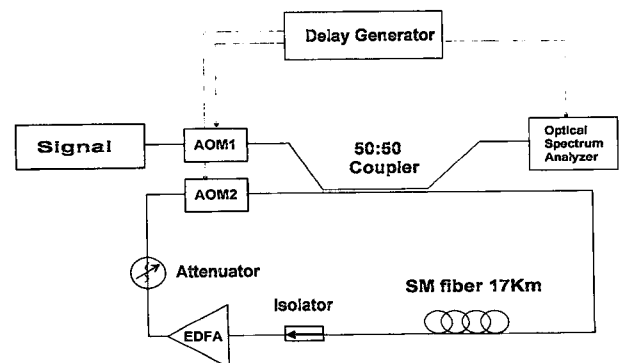


그림 1. 광증폭기 recirculating loop의 개략도. AOM: acousto-optic modulator, EDFA: Erbium-Doped Fiber Amplifier.

coupler를 통과하여 받은 loop 밖으로 출력되며 받은 다시 loop 안으로 입력된다. 출력신호의 측정은 3 dB coupler에서 하거나 EDFA 전후에 tap을 설치하여 원하는 EDFA 통과 회수가 되었을 때 전기적 트리거 신호를 OSA(Optical Spectrum Analyzer)에 주어 측정한다. loop의 손실은 광증폭기 사이의 span loss에 해당하며 attenuator를 이용하여 조절한다. 0.25 dB/km의 손실을 갖는 광섬유를 통해 전송한다면 20 dB의 loop 손실은 80 km의 전송거리에 해당한다. 따라서 EDFA를 100 회 통과한 출력은 8000 km 전송거리를 지난 것과 같다고 볼 수 있다. 이 recirculating loop에 광증폭기를 설치하여 loop 통과 회수에 따라 출력을 측정하면 전송거리에 따른 광증폭기의 특성을 알 수 있다. 본 연구에서는 여러 종류의 광증폭기를 제작하였다. 먼저 이득 평탄화 하지 않은 광증폭기는 초장거리 해저 케이블에서 사용하는 이득 대역인 1.558  $\mu\text{m}$ 에 이득 최대 파장이 있는 경우이다. 이득 평탄화한 WDM용 광증폭기는 EDF의 길이와 펌프 광세기를 최적화 하여 제작한 EDFA와 같은 방법으로 이득 평탄화 하되 장주기 FBG 필터를 추가한 EDFA를 이용하였다. 이득대질인 EDF와 펌핑용 레이저, 펌프 광과 신호를 커플링하기 위한 WDM coupler, back reflection 광을 차단하는 isolator를 이용하여 간단한 구조의 EDFA를 제작하였다. 펌핑은 980 nm 레이저 다이오드로 순방향 펌핑하였다. EDF는  $\text{Er}^{3+}$  ion의 mole fraction이 300 ppm인 type1과 800 ppm인 type2를 이용하였다.

WDM 전송에서 한 개의 EDFA의 파장별 이득을 알기 위해서는 background ASE 스펙트럼을 가지고 분석을 하는 경우가 많다. 그런데 다수의 EDFA를 통과한 ASE는 한 개만을 통과 한 경우와 달리 실제 이득 스펙트럼보다 더 평탄하게 나타난다. N개의 EDFA를 통과한다면 첫 단의 EDFA의 출력은 N-1개의 EDFA를 통과하면서 증폭이 되고, 다음 단의 EDFA는 N-2개의 EDFA를 통과하면서 증폭이 되며, N-1 번째 단의 ASE는 마지막 1개의 EDFA에 의해서 증폭이 된다. 결국 최종 출력의 ASE는 이 모든 값들을 합한 것이므로 N개의 EDFA를 통과한 이득 스펙트럼보다는 더 평탄하게 나온다.

그림 2(a),(b),(c)는 두 개의 신호를 입력하여 측정된 광증폭기의 이득 스펙트럼과 한 신호를 넣어서 측정된 출력의 background ASE 스펙트럼을 비교한 것으로 한 번, 다섯 번, 열 번 통과한 후 측정하였다. 이때 4 파장 전송의 경우에 고정된 한 파장에서는 3 파장의 광세기에 해당하는 신호광을 입력하여 포화광원으로 사용하고, 다른 한 파장에서는 1 파장의 광세기를 갖도록 하여 파장을 바꾸면서 이득을 측정하였다. 이득은 처음 광증폭기에 입력된 신호의 세기와 원하는 만큼의 광증폭기를 지난 다음의 출력으로 계산한 값이다. 광증폭기를 한번 통과한 경우에는 두 스펙트럼이 잘 일치하지만, 여러 번 지날수록 차이가 커진다. 표 1은 광증폭기 통과 회수에 따른 1 dB 이득 대역을 ASE와 2 개의 신호를 넣어서 측정된 것과 비교한 것이다.

각 측정에 의한 결과는 EDFA 통과 회수가 증가할수록 차이가 크며 background ASE 스펙트럼의 기울기가 신호를 이용하여 측정된 이득 스펙트럼의 결과 보다 더 크게 나온다. 다수의 광증폭기를 통과할 경우의 이득 대역은 ASE 스펙트

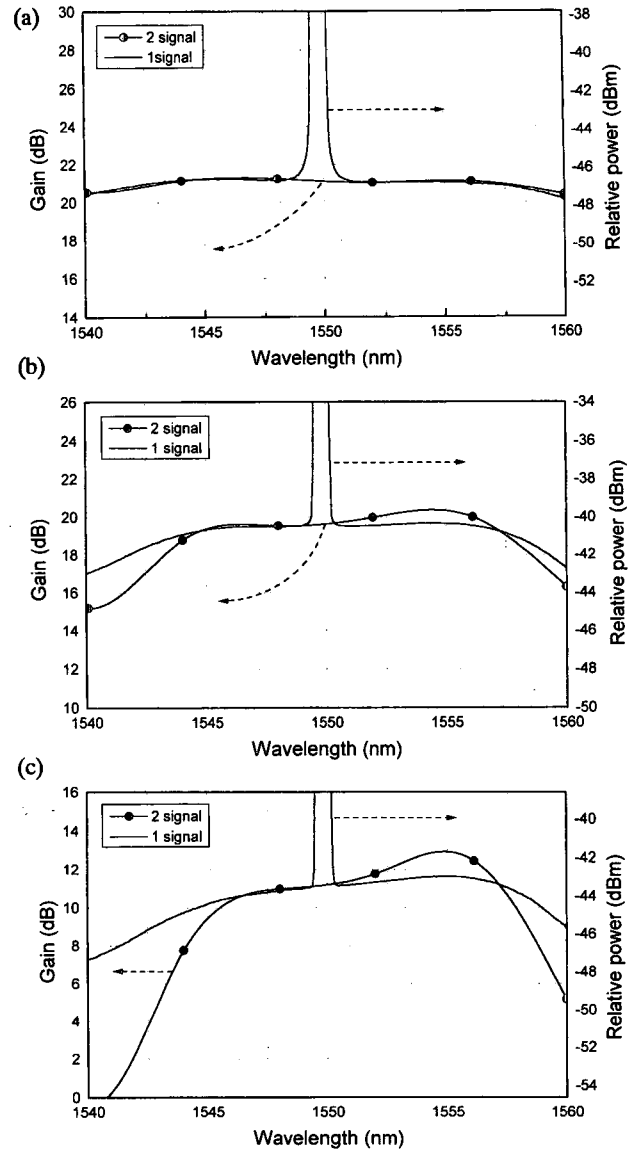


그림 2. 두 개의 신호용 레이저를 입력하여 측정된 이득과 ASE 스펙트럼. EDFA 통과 회수 (a) 1 회, (b) 5 회, (c) 10 회.

표 1. EDFA의 통과 회수에 따른 1 dB 이득 대역

no. of EDFA	1 EDFA	5 EDFA	10 EDFA
측정방법			
ASE	23.1 nm	15.3 nm	12 nm
2 신호 입력	23.7 nm	12 nm	6 nm

럼으로 분석 할 경우 실제 보다 더 크게 결정 할 수 있으므로 다수의 EDFA를 통과하는 장거리 전송의 경우는 파장별로 신호를 입력하여 측정하는 것이 바람직하다. 이렇게 하여 이득과 신호대 잡음비를 측정하였다.

### III. 측정 및 결과

#### 3.1. 이득 평탄화 되지 않은 EDFA

최근 설치된 초장거리 해저 케이블용 광증폭기에서는 1.558  $\mu\text{m}$  대역의 단일 파장을 사용하고 있으며, 이득 평탄화 되지 않은 EDFA를 사용하고 있다. 이와 비슷하게 1.558  $\mu\text{m}$  에서 이득 최대 파장을 갖고 이득 평탄화 하지 않은 EDFA를 이용하여 장거리 전송 시의 출력을 측정하였다. 입력 신호의 세기는 -14 dBm이며 펌프 광세기는 35 mW이다. EDF는 type2 이며 길이는 11 m이다. 그림 3(a)는 이득 평탄화 되지 않은 광증폭기의 이득이며, 이때 포화용 신호의 파장은 1555 nm 이다. 이득 최대 파장인 1.558  $\mu\text{m}$ 에서의 3 dB 이득 대역은 1, 10, 20회 광증폭기를 지날 때 각각 15 nm이상, 7.6 nm, 5.9 nm로써 급하게 감소하는 것을 알 수 있다. 전송거리 증가에 따른 증폭대역의 협소화로 인해 사용할 수 있는 파장수의 제약을 받을 것이다. 그림 3(b)는  $\frac{P_s^{out}}{N_{out}}$ 로 정의되는 신호대 잡음비이다.  $P_s^{out}$ ,  $N_{out}$ 는 각각 출력 신호 광세기와 출력 잡음 세기이다. 이때 사용된 noise bandwidth는 0.1 nm 이다. 이득 최대 파장에서의 3 dB 대역은 1, 10, 20회 광증폭기를 지날 때 각각 15 nm이상, 9.5 nm, 6.8 nm로써 급하게 감소하는 것을

알 수 있다. 표 2는 EDFA 통과 회수에 따른 이득 및 신호대 잡음비 대역의 변화이다.

### 3.2. 이득 평탄화 된 EDFA

평균 밀도 반전의 원리를 이용하여 type1의 EDF로 1 dB 이득 대역이 23 nm인 EDFA를 제작하였다.<sup>[5-6]</sup> EDF의 길이는 19 m, 입력 신호광 세기는 -14 dBm을 입력하고 펌프 광세기는 21.4 mW를 입력하였다. 이 광증폭기를 recirculating loop에 넣고 전송거리에 따른 출력을 측정하였다.

그림 4(a)는 EDFA의 출력 스펙트럼이다. 1537 nm에서 1560 nm 까지 1 dB 이내에도 들도록 평탄화 하였으며 이득 최대 파장은 1532 nm 이다. 광증폭기 통과 회수가 증가하면서

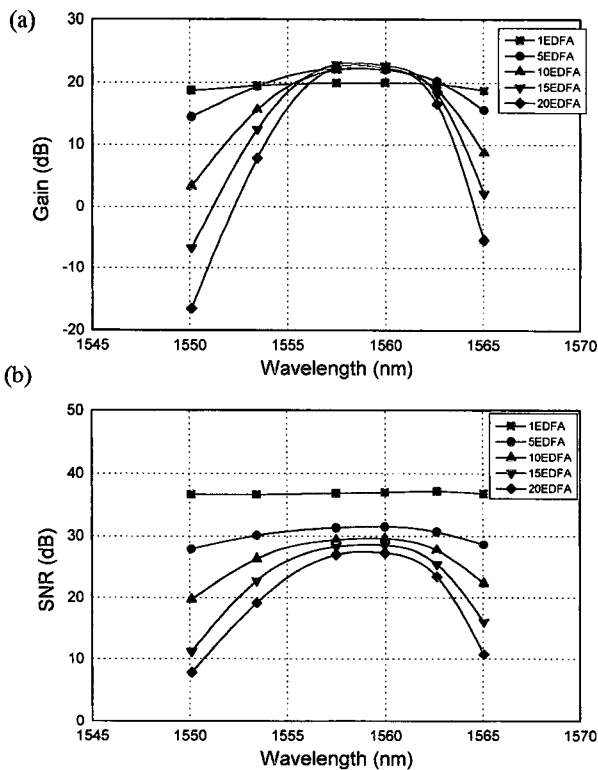


그림 3. 이득 최대 파장이 1.558  $\mu\text{m}$  인 이득 평탄화 되지 않은 EDFA. (a) 이득, (b) 신호대 잡음비.

표 2. EDFA의 통과 회수에 따른 3 dB 이득 대역 및 신호대 잡음비 대역

no. of EDFA	1 EDFA	5 EDFA	10 EDFA	15 EDFA	20 EDFA
3 dB 대역					
이득	>15 nm	9.8 nm	7.6 nm	6.5 nm	5.9 nm
신호대 잡음비	>15 nm	14.2 nm	9.5 nm	7.8 nm	6.8 nm

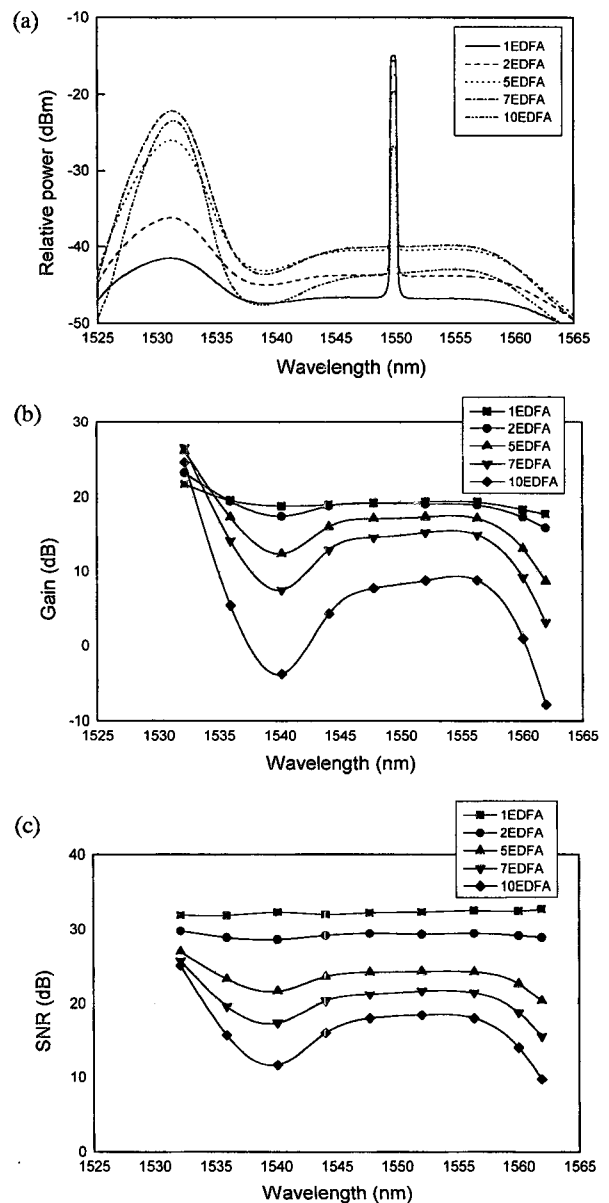


그림 4. 이득 평탄화 된 EDFA. 입력 신호 광세기 -14 dBm, 펌프 광세기 21.4 mW, EDF: type1: 길이 19 m (a) 출력, (b) 이득, (c) 신호대 잡음비.

표 3. EDFA의 통과 회수에 따른 신호의 이득

no. of EDFA	1 EDFA	2 EDFA	5 EDFA	7 EDFA	10 EDFA
신호의 이득(dB)	19.3	19.1	17.2	14.9	8.3

1530 nm 대역의 ASE가 빠른 기울기로 증가하면서 신호의 세기는 계속 감소한다. 그림 4(b)는 2 신호 입력 방법으로 측정 한 이득 스펙트럼이다. 1dB 이득 대역은 EDFA 통과 회수가 1, 5, 10회 일 때 각각 23.5 nm, 12.7 nm, 6.8 nm로 감소한다. EDFA를 10회 통과하면 13 nm가 3 dB 이내에서 이득이 평탄함을 알 수 있다. 그림 4(c)는 신호대 잡음비의 파장에 따른 스펙트럼이다. 신호대 잡음비는 이득에 비해 더 평탄한 편이며 이러한 추세는 신호의 출력이 감소하는 파장에서는 ASE도 감소하기 때문이다. 신호대 잡음비의 1 dB 대역은 EDFA 통과 회수가 1, 5, 10회 일 때 각각 29.8 nm, 15.7 nm, 11.2 nm로 감소한다. 그러나 대역이 비교적 넓은 편이라도 ASE 잡음의 세기가 급격히 증가하고 신호세기는 급격히 감소하기 때문에 장거리 전송에 사용하기는 어렵다. 표 3은 이득 평탄화 대역인 1550 nm에서 EDFA 통과 회수에 따른 이득 값으로 7개의 증폭기단을 지나면서 이득이 급격히 감소함을 알 수 있다.

**3.3. FBG 필터를 넣은, 이득 평탄화 된 EDFA**

type1의 EDF를 이용하여 1550 nm 대역에서 이득 평탄화 할 경우에 이득 최대 파장이 1532 nm 이기 때문에 전송거리가 증가하면서 1530 nm 대역의 ASE가 빨리 증가하는 것은 피할 수 없다. 따라서 1525 nm에서 1535 nm 까지 19 dB 이상 억제할 수 있는 장주기 FBG 필터를 증폭기의 출력단에 설치하여 1530 nm 대역의 잡음을 줄일 수 있도록 하고 평균 밀도 반전율의 원리를 이용하여 이득 평탄화 된 광증폭기를 제작하였다. EDF의 길이는 18.6 m, 펌프 광세기는 26.1 mW, 입력 광세기는 -14 dBm 이다.

그림 5(a)는 이 증폭기의 출력이다. 1538 nm에서 1560 nm 까지 22 nm 의 1 dB 이득 평탄화 대역을 갖으면서 1530 nm 대역의 ASE 잡음은 상당히 억제되었다. 이 효과로 인해서 EDFA 100회 통과할 때까지 전체 출력 광세기가 6 dB 감소되어 전체 출력 광세기의 약화도, 필터를 사용하지 않았을 경우의 10 회 전송시 12 dB 감소치에 비하여 많은 개선이 있음을 알 수 있다. 그림 4(a)와 비교하면 전송거리 증가에 따른 ASE 잡음의 증가도 작다. 이는 ASE 잡음이 증가함으로 인해서 출력 광세기가 약해지는 것을 완화하는 효과가 있다. 전송거리가 증가함에 따라 포화 신호 파장인 1550 nm 근처의 spectral hole burning이 커지는데, 이는 신호 파장의 위치를 옮겨서 입력 할 경우에는 1550 nm에서 나타나지 않았다. 그림 5(b)에서 1 dB 이득 대역은 EDFA 통과 회수가 1, 10, 20회 일 때 각각 22.2 nm, 12.3 nm, 11.3 nm로 감소한다. 이득 대역 협소화의 기울기가 완만해졌을 뿐만 아니라 100 회 이상 전송할 수 있다는 점을 고려하면 필터로 1530 nm의 ASE를 제거한 효과는 크다. 8000 km의 전송거리에 해당하는 100 회의 EDFA를 전송했을 때의 10.5 nm 대역에서 이득의 변화

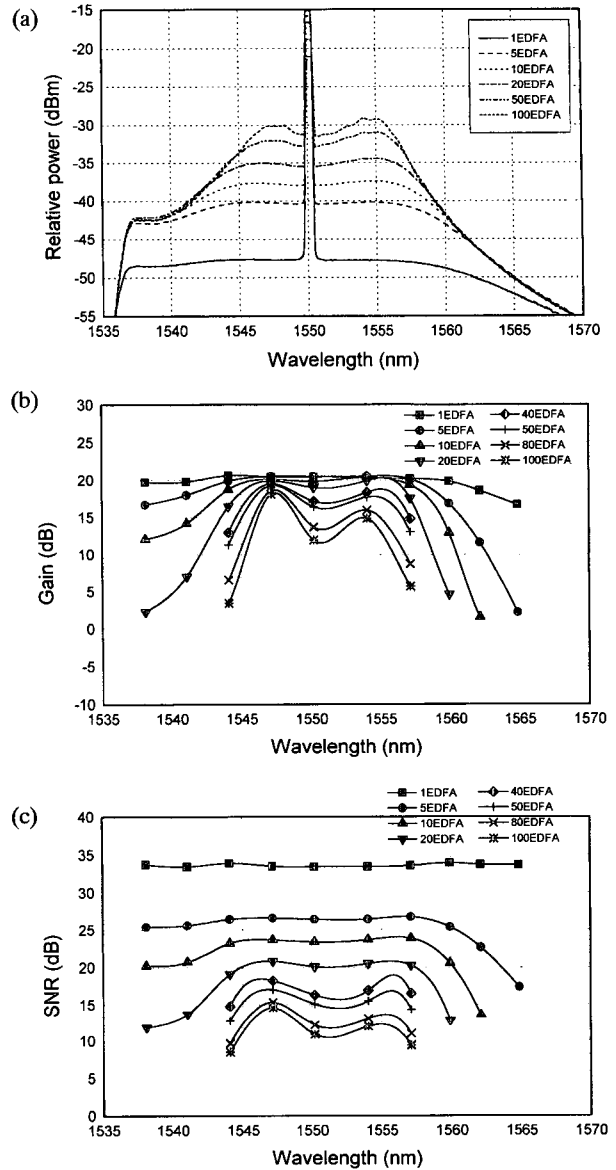


그림 5. FBG 필터 (필터 중심파장 1530 nm)를 넣은, 이득 평탄화 된 EDFA. 입력 신호 광세기 -14 dBm, 펌프 광세기 26.1 mW, EDF : type1, 길이 18.6 m (a) 출력, (b) 이득, (c) 신호대 잡음비. 포화용 신호의 파장은 1552 nm 이다.

는 7 dB이다. 이때 1550 nm의 이득이 근처 파장의 이득 보다 작은 것은 실제 사용할 신호광보다 세 배가 큰 포화용 신호광에 의한 spectral hole burning 효과임을 고려하면 5 dB 이득 평탄화 대역은 9 nm 이다. 그림 5(c)는 신호대 잡음비의 스펙트럼이며 EDFA 통과 회수가 1, 10, 20회 일 때 1 dB 대역은 이득 대역을 포함하며 각각 26.7 nm, 14.7 nm, 12.5 nm로 감소한다. 100개의 EDFA 전송시에 5 dB 대역은 12.5 nm이다. 표 4는 EDFA 통과 회수에 따른 이득 및 신호대 잡음비 대역의 변화이다.

이 실험으로부터 단순한 구조로 이득 평탄화한 광증폭기를 이용하여 100개의 EDFA를 통과하더라도 많은 파장수의 WDM 전송이 가능하다는 것을 알 수 있다.

표 4. EDFA의 통과 회수에 따른 1 dB 이득 대역 및 신호대 잡음비 대역. 100회 통과시 5 dB 대역

no. of EDFA	1	5	10	20	100
1 dB 대역	EDFA	EDFA	EDFA	EDFA	EDFA
이득	22.2 nm	14.4 nm	12.3 nm	11.3 nm	9 nm
신호대 잡음비	26.7 nm	17.5 nm	14.7 nm	12.5 nm	12.5 nm

#### IV. 요 약

장거리 전송 실험을 위하여 광증폭기 recirculating loop을 이용하였으며, 포화용 신호 레이저와 가변 파장 레이저를 이용하여 다수의 EDFA 통과시의 파장에 따른 이득, 신호대 잡음비를 편리하게 측정하였다. 이득 최대 파장이 1.558  $\mu\text{m}$  인 이득 평탄화 하지 않은 EDFA를 장거리 전송할 경우 출력, 이득 대역, 신호대 잡음비는 빠른 기울기로 감소하였다. EDF의 길이와 펌프 광세기를 최적화 하여 이득 평탄화한 간단한 구조의 EDFA를 제작하였다. 이 광증폭기는 1 dB 이득 대역이 23 nm 에 이르나 장거리 전송할 경우에 상당히 빠른 속도로 감소하며 ASE 또한 급격히 증가한다. 이 EDFA에서는 1530 nm 대역의 ASE가 출력 신호 감소와 이득 대역 감소의 주요한 원인이었기에 1530 nm 의 ASE를 제거하는 FBG 필터를 이용하여 이득 평탄화한 EDFA를 제작하였다. 이 광증폭기는 1 dB 이득 대역이 22 nm 이며 장거리 전송할 경우에 이득 대역 감소 기울기가 완만하여 100개의 EDFA 통과시에도 9 nm 대역에서 이득이 5 dB 이내에서 변화하였다. 신호대 잡음비는 27 nm가 1 dB 이내에서 평탄하였으며 100개의 EDFA 통과시에 5 dB 변화를 보이는 대역이 13 nm 였다. 이 실험으로

부터 단순한 구조로 이득 평탄화한 광증폭기를 이용하여 100개의 EDFA(8000 km에 해당)를 통과하더라도 많은 파장수의 WDM 전송이 가능하다는 것을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 부분적으로 과학재단 광전자연구센터의 연구 지원, 정보통신부의 대학기초연구사업, 그리고 전력연구원의 지원에 의해 이루어졌습니다.

#### 참고문헌

- [1] N. S. Bergano, C. R. Davidson, G. M. Homsey, D. J. Kalmus, P. R. Trischitta, J. Aspell, D. A. Gray, R. L. Maybach, S. Yamamoto, H. Taga, N. Edagawa, Y. Yoshida, Y. Horiuchi, T. Kawazawa, Y. Namihira, and A. Akiba, Optical Amplifiers and Their Application, Santa Fe, NM, postdeadline paper PD12(1992)
- [2] H. Taga, M. Suzuki, Y. Yoshida, S. Yamamoto and H. Wakabayashi, J. Lightwave Technol., **11**, 2100(1993)
- [3] N. S. Bergano, and C. R. Davidson, J. Lightwave Tech., **13**, 879(1995)
- [4] 김향균, 박서연, 이동호, 박창수, 한국광학회지, **8**, 209(1997)
- [5] D. Lee, P. F. Wysocki, J. R. Simpson, D. S. DiGiovanni, K. L. Walker, and D. Gasper, IEEE Photonics Technol. Letter, **6**, 1094(1994); P. F. Wysocki, J. R. Simpson, and D. Lee, IEEE Photonics Technol. Letter, **6**, 1098(1994)
- [6] D. Lee, H. S. Chung, J. R. Simpson, and D. J. DiGiovanni, J. Kor. Phys. Soc., **31**, 603(1997)

### Gain bandwidth characteristics of erbium-doped Fiber amplifiers for long-haul transmissions

Heesang Chung, Donghan Lee

Department of Physics, Chungnam National University, Taejon 305-764, Korea

Yuncheol Chung

Department of Electrical Engineering, KAIST, Taejon 305-701, Korea

Sungjun An, Honggeun Cho

Korea Electric Power Research Institute, Taejon 305-380, Korea

(Received March 18, 1998, Revised manuscript received May 4, 1998)

Gain characteristics of concatenated erbium-doped fiber amplifiers(EDFA) are studied with a recirculating EDFA loop. For a non-flat gain EDFA, the 3 dB gain bandwidth was reduced to 6 nm after the 20th EDFA. However, for an optimized gain flattened EDFA, in a simple configuration, the 5 dB gain bandwidth was found to be 9 nm, even after the 100th EDFA, corresponding to 8000 km transmission. This results suggest that the simple optimized flat gain amplifier could be a good candidate for ultra-long distance wavelength division multiplexed transmissions.