《연구논문》 Hankook Kwanghak Hoeji Volume 9, Number 6, December 1998
(Journal of the Optical Society of Korea - Korean Edition)

파장분할방식 장거리 광전송을 위한 음향광학필터를 이용한 에르븀 첨가 광섬유 증폭기의 이득 평탄화

안성준
전력연구원

정희상 · 이동한
충남대학교 물리학과

(1998년 9월 21일 받음, 1998년 11월 11일 수정본 받음)

장주기 광섬유 브라그 격자 필터와 음향광학필터를 함께 사용하여 에르븀 첨가 광섬유 증폭기(EDFA)의 이득을 평탄화하고, 이 EDFA의 장거리 전송에서의 이득 및 신호대 잡음비 특성을 recirculating loop에서 평가하였다. 이 때, 광신호는 EDFA 200회 통과 시에 20 nm의 매우 넓은 파장 범위에서 4.6 dB 이내의 이득 평탄도와 14 dB 이상의 신호대 잡음비의 특성을 보임으로써, 이 EDFA가 파장분할방식으로 8000 km가 넘는 초장거리 광전송에 적용 가능함을 확인하였다.

I. 서 론

에르븀 첨가 광섬유 증폭기(EDFA : Erbium-Doped Fiber Amplifier)의 개발은 광통신에서 전송거리의 제한 요인이었던 광손실을 극복할 수 있도록 하였고, 특히 전송 속도와 관계없이 광신호를 증폭할 수 있는 점 때문에 기존의 전기적인 중계기들을 빠르게 대체해 나가고 있다. 또한, 최근에는 EDFA가 가지는 1.55 μm 근처 파장에서 넓은 이득 대역으로 인해 WDM(Wavelength Division Multiplexing) 광전송 시스템에 EDFA를 사용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있고, 일부 상용화된 제품도 나오고 있다. WDM 광통신용으로 이상적인 EDFA는 낮은 잡음지수와 넓은 이득 대역의 특성과 함께 파장에 따른 이득의 평탄도가 좋아야 한다. 특히 장거리 WDM 광전송 시스템에서는 많은 수의 EDFA를 지난 후에 각 채널별로 증폭도의 차이가 심해질 경우 시스템의 신뢰도가 크게 떨어지므로 이득 평탄화의 중요성이 더 커지게 된다.

EDFA의 이득을 평탄화하기 위한 수단으로 EDF에 알루미늄을 첨가하는 방법, silica 대신에 fluoride를 기반으로 하는 EDF를 사용하는 방법, 그리고 여러 가지 다양한 이득 평탄화 필터를 사용하는 방법 등이 제안되었다.[1-3] 이득 평탄화 필터로는 Mach-Zehnder 필터, 음향광학필터(AOTF : Acousto-Optic Tunable Filter), 박막필터 등이 있으며, 최근에는 장주기 FBG(Long-Period Fiber Bragg Grating) 필터와 광섬유형 음향광학필터(AOTF : Acousto-Optic Tunable Filter)가 많은 관심의 대상이 되고 있다. 광섬유형 AOTF의 경우 광섬유만으로 구성되어 낮은 삽입 손실을 가지고 있고, coherent crosstalk 없이 동시에 하나의 소자에 몇 개의 rf 신호를 인가할 수 있기 때문에 EDFA의 이득 평탄화 필터로서의 가능성이 제시되었다.[4-5] AOTF를 사용하게 되면 WDM 광전송에서 채널의 수가 변하는 경우에도 EDFA의 이득을 지속적으로 평탄하게 만들 수 있는 등 기존의 수동 소자로는 할 수 없는 능동적인 제어도 가능하다.

본 연구에서는 두 개의 AOTF를 장주기 FBG 필터와 함께 사용함으로써, 매우 넓은 파장 영역에서 EDFA의 이득을 평탄화하고, 이 EDFA를 이용한 장거리 전송 시의 이득평탄 대역, 신호대 잡음비 등의 특성을 측정하였다. 장거리 전송 시의 광증폭기의 영향을 정확하게 평가하기 위해서는 EDFA 한 개에서의 이득 평탄화를 관찰하는 것만으로는 부족하다. 여러 EDFA가 연결되어 있는 경우, 한 개의 EDFA의 특성이 단순히 선형적으로 더해지지는 않기 때문이다. 따라서, 본 실험에서는 EDFA recirculating loop을 구성하여 많은 수의 EDFA를 광신호가 거치게 함으로써, 실제 장거리 광전송 시스템에서 많은 EDFA를 거치는 상황을 구현하였다.[6,7] 실험 결과, AOTF의 필터 모양들을 조절함으로써 EDFA를 200회 이상 통과한 8000 km 이상의 초장거리 전송에서도 20 nm 이상의 넓은 영역에서 이득이 평탄화된 EDFA를 구현할 수 있었다.

II. 실험 및 결과

그림 1은 장거리 전송시의 광증폭기의 특성을 측정하기 위한 광증폭기 recirculating loop의 개략도 이다. 입력 광신호는 AOM(acousto-optic modulator) #1과 3-dB coupler를 통하여 loop 안으로 입력된다. 광신호가 loop을 한바퀴 도는 시간은 단일모드 광섬유의 길이에 의해 결정되는데 이 실험에서는 17 μs이다. Optical isolator를 통과한 광신호는 EDFA를 통과하여 가변 감쇄기를 지나게 된다. AOM #2를 통과한 신호는 3-dB coupler를 통과하여 반은 loop 밖으로 출력되며 반은 다시 loop 안으로 입력된다. 출력신호의 측정은 3-dB coupler에서 하거나 EDFA 전후에 tap을 설치하여 원하는 수만큼 광신호가 EDFA를 통과했을 때 전기적 트리거 신호를 OSA

(Optical Spectrum Analyzer)에 주어 측정한다. 이 때 시스템을 구성하는 소자들의 편광의존손실(PDL : Polarization-Dependent Loss)과 EDFA의 편광의존이득(PDG : Polarization-Dependent Gain) 등에 의해 EDFA의 이득 측정이 부정확해지는 것을 방지하기 위해 polarization scrambler[FiberPro, PS-155-A-B]를 사용하였다.

Loop의 손실은 광증폭기 사이의 span loss에 해당하며 가변 감쇄기를 이용하여 조절할 수 있다. 본 실험에서는 loop을 한 바퀴 돌 때의 손실이 10.5 dB로 하였는데, 이는 광섬유가 0.25 dB/km의 손실을 가진다고 할 때 42 km의 전송거리에 해당한다. 따라서 EDFA를 200회 통과한 출력은 8400 km 전송거리를 지난 것과 같다고 볼 수 있다. 해저 광케이블을 이용한 수 천 km이상의 초장거리 광전송의 경우 신호대 잡음비(OSNR : Optical Signal-to-Noise Ratio)를 일정 수준이상 유지하기 위하여 광증폭기의 이득을 줄이는 대신에 광증폭기 사이의 거리를 짧게 하는 것이 일반적이므로 본 실험의 증폭 이득 및 loop에서의 광손실 값의 설정은 초장거리 광전송의 경우에 해당한다고 하겠다.

본 실험에서 EDFA는 이득매질인 EDF(Erbium-Doped Fiber)와 펌핑용 레이저, 펌프 광과 신호 광을 결합시키기 위한 WDM coupler, 후방 반사광을 차단하는 optical isolator 등으로 간단한 구조로 제작하였다. 펌핑은 980 nm 파장의 레이저 다이오드를 출력 73 mW로 순방향 펌핑하였다. 사용된 EDF의 Er^{3+} ion의 농도(mole fraction)는 300 ppm이고, 길이는 22 m이었다. 앞서 발표된 논문에서와 마찬가지로 1530 nm 대역의 ASE(Amplified Spontaneous Emission) 잡음을 줄이기 위해 장주기 FBG 필터를 EDFA의 뒤에 넣었고,[7] 여기에 다시 이득을 평탄화 하기 위하여 두 개의 AOTF로 구성된 이득 평탄화 필터[FiberPro, LE-155-6A]를 추가하였다. 이것은 그림 2에서 보는 것과 같은 구조로 되어있는데 3-dB notch의 폭이 각각 5 nm와 10 nm인 AOTF 두 개로 구성되어 있고, AOTF 하나에 최대 3개의 rf(radio frequency) 신호를 인가하여 필터의 모양을 조절할 수 있다.[5] 각각의 AOTF에 인

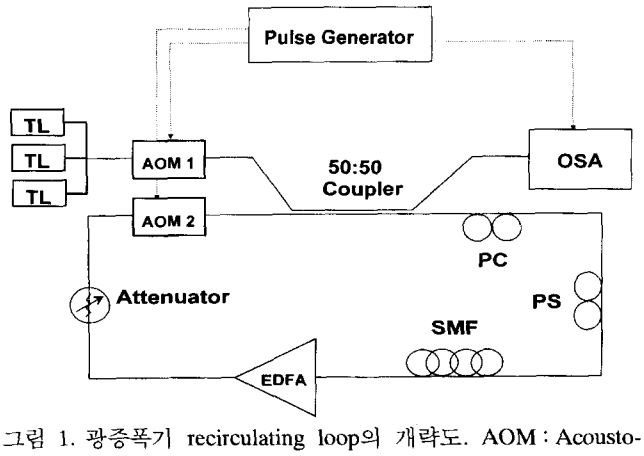

그림 1. 광증폭기 recirculating loop의 개략도. AOM : Acousto-Optic Modulator, EDFA : Erbium-Doped Fiber Amplifier, OSA : Optical Spectrum Analyzer, PC : Polarization Controller, PS : Polarization Scrambler, SMF : Single-Mode Fiber, TL : Tunable Laser.

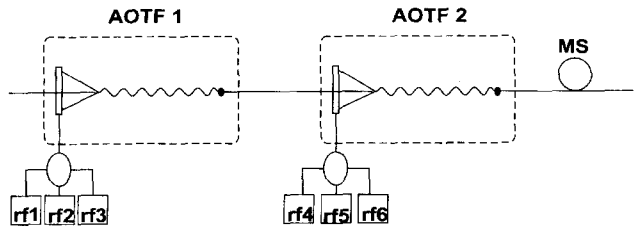

그림 2. AOTF를 이용한 이득 평탄화 필터의 개략도. AOTF : Acousto-Optic Tunable Filter, MS : Mode Stripper, rf : radio-frequency generator.

가되는 rf 신호들의 주파수와 진폭을 EDFA의 이득이 최대로 평탄해지도록 조절하였다.

이렇게 구성된 실험 장치에서 EDFA의 파장에 따른 이득을

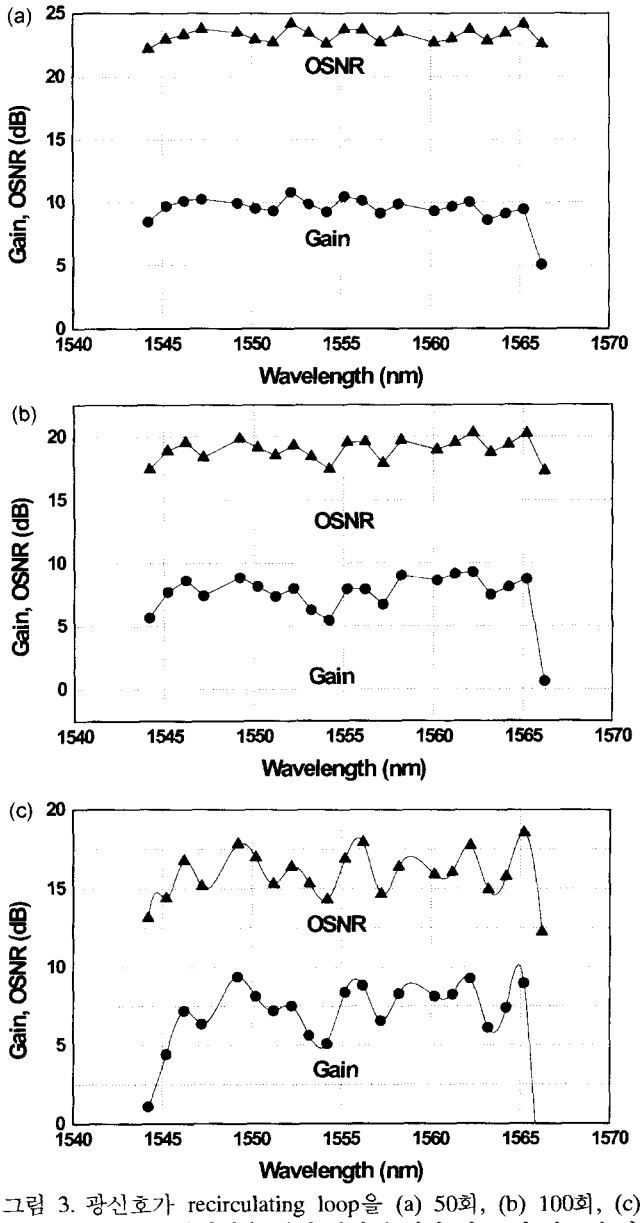

그림 3. 광신호가 recirculating loop을 (a) 50회, (b) 100회, (c) 200회 통과하였을 때의 파장에 대한 이득 및 신호대 잡음비 특성.

표 1. EDFA 통과 회수에 따른 이득 평탄도

EDFA 통과 회수 (전송 거리)	이득 (dB)	이득 평탄도 (dB)
50 (2100 km)	8.6-10.8	2.2
100 (4200 km)	5.5- 9.3	3.8
200 (8400 km)	4.4- 9.0	4.6

표 2. EDFA 통과 회수에 따른 신호대 잡음비

EDFA 통과 회수 (전송거리)	OSNR (dB)
50 (2100 km)	22.6-24.2
100 (4200 km)	17.4-20.3
200 (8400 km)	14.5-18.5

측정하기 위하여 1548 nm와 1559 nm의 파장을 가지는 두 개의 포화광원을 각각 −4.2 dBm의 세기로 EDFA에 넣어 주었다. 이득을 측정하기 위한 광신호는 −13 dBm의 세기로 1545.2 nm에서 1565.2 nm까지 파장을 변화시키면서 넣어 주었다. 포화광원과 광신호의 세기를 합하면 약 −0.91 dBm로, 이것은 WDM 광전송에서 한 채널당 입력 광신호가 −13 dBm이라고 할 때 16채널 광전송의 경우에 해당한다. 이득은 처음 광증폭기에 입력된 신호의 세기와 원하는 만큼의 광증폭기를 지난 다음의 광신호의 세기로부터 계산하였고, ASE의 세기는 근접 파장의 ASE 세기로부터 알아내었다. 단일 EDFA의 이득은 1541.2 nm~1568.2 nm에서 0.7 dB 이내의 이득 평탄도를 갖으며 잡음지수는 4.9~5.6 dB의 값을 갖는다.

그림 3의 (a), (b), (c)는 이 EDFA를 광신호가 각각 50회, 100회, 200회 통과했을 때의 특성을 보여주고 있다. EDFA의 통과 회수가 증가함에 따라 이득의 평탄도가 점점 낮아지고 있지만, EDFA를 200회 통과시켰을 경우에도 4.6 dB 이내의 좋은 평탄도를 유지하고 있음을 알 수 있다. 장주기 FBG 필터만을 사용한 실험에서 8000 km 전송시 5 dB의 평탄도를 가지는 이득 대역이 12.5 nm이었음을 감안할 때, AOTF를 함께 사용함으로써 이득 평탄화에 있어서 상당히 개선된 결과를 얻었음을 알 수 있다.[7] 표 1에는 1545.2 nm에서 1565.2 nm까지의 파장 영역에서 EDFA의 통과 회수 (또는 전송 거리)에 따른 광신호 이득 및 그 평탄도를 나타내었다.

그림 3에서 OSNR은 신호대 잡음비(OSNR : Optical Signal-to-Noise Ratio)로 EDFA를 지정된 회수만큼 통과한 후의 ASE 잡음의 세기에 대한 광신호의 세기의 크기로 정의된다. 이때 사용된 잡음의 대역폭은 0.1 nm이다. 신호대 잡음비는 이득에 비해 더 평탄한 편이며 이러한 추세는 신호의 출력이 감소하는 파장에서는 ASE도 감소하기 때문이다. 아래의 표 2에서 알 수 있듯이 EDFA를 50회 통과한 후의 OSNR은 22.6 dB 이상, 200회를 통과한 후에도 14.5 dB 이상의 결과를 보였다.

앞에서 언급한 대로, 이 실험은 각각 −13 dBm의 크기를 가지는 16개의 채널로 구성된 WDM 광전송의 경우와 같은 조건이다. 그러나, 만일 채널의 수가 변한다고 하더라도 펌핑광의 세기를 변화시켜 이득을 일정하게 해 준다면, 현재 실험에서 얻은 이득 평탄도와 OSNR은 그대로 유지할 수 있다.[3,8] 따라서, 각 채널당 파장 간격을 0.8 nm (또는 100 GHz)라고 할 때, 20 nm의 파장 범위에서는 25개의 채널을 다중화하여 전송하는 것이 가능하다.

III. 결 론

EDFA의 이득을 평탄화하기 위하여 장주기 FBG 필터와 AOTF를 동시에 사용하였다. 장주기 FBG 필터로는 주로 1530 nm 대역의 ASE(Amplified Spontaneous Emission) 잡음을 줄이는데 사용하였고, AOTF에 인가되는 rf 신호들의 주파수와 진폭을 조절하여 EDFA의 이득이 최대로 평탄해지는 조건을 찾았다. 이렇게 이득이 평탄화된 EDFA의 장거리 전송에서의 이득 및 신호대 잡음비 특성을 recirculating loop에서 관찰한 결과, 광신호가 EDFA를 200회 통과한 후에도 20 nm의 매우 넓은 파장 범위에서 4.5 dB 이내의 이득 평탄도와 14 dB 이상의 신호대 잡음비의 특성을 보였다. 이 결과를 초장거리 WDM 광전송의 경우에 적용하면, 채널 사이의 간격을 0.8 nm (100 Gb/s)로 할 때 25개의 채널을 8400 km까지도 전송할 수 있는 가능성을 보여준 것이다.

참고문헌

[1] A. Mori, Y. Ohishi, M. Yamada, H. Ono, Y. Nishida, K. Oikawa, S. Sudo, Optical Fiber Communication Conference, Dallas, Texas, U.S.A. Postdeadline Paper PD1 (1997).

[2] M. Chbat, S. Artigaud, D. Bayart, A. Jordan, M. Sotom, J.-L. Beylat, Optical Fiber Communication Conference, Dallas, Texas, U.S.A. Technical Digest TuP3 (1997).

[3] P. F. Wysocki, J. Judkins, R. Espindola, M. Andrejco, A. Vengsarkar, K. Walker, Optical Fiber Communication Conference, Dallas, Texas, U.S.A. Postdeadline Paper PD2 (1997).

[4] H. S. Kim, S. H. Yun, I. K. Hwang, B. Y. Kim, Optical Fiber Communication Conference, Dallas, Texas, U.S.A. Postdeadline Paper PD7 (1997).

[5] H. S. Kim, S. H. Yun, H. K. Kim, N. K. Park, B. Y. Kim, Optical Fiber Communication Conference, San Jose, California, U.S.A. Technical Digest WG4 (1998).

[6] 김향균, 박서연, 이동호, 박창수, 한국광학회지, **8**, 209 (1997).

[7] 정희상, 이동한, 정윤철, 안성준, 조홍근, 한국광학회지, **9**, 181 (1997).

[8] D. Lee, H. S. Chung, J. R. Simpson, and D. J. DiGiovanni, J. Kor. Phys. Soc., **31**, 603 (1997).

Gain flattening of erbium-doped fiber amplifiers by using an AOTF for long-haul WDM optical transmissions

Seong Joon Ahn
Korea Electric Power Research Institute, Taejon 305-380, Korea

Heesang Chung and Donghan Lee
Department of Physics, Chungnam National University, Taejon 305-764, Korea

(Received September 21, 1998, revised manuscript received November 11, 1998)

We have flattened the gain of EDFA by using a long-period FBG filter and AOTF's. The gain and optical SNR characteristics of the gain-flattened EDFA in long-haul transmission have been evaluated in a recirculating EDFA loop. The gain variation was less than 4.6 dB and the optical SNR was higher than 14 dB over 20-nm wavelength range when the optical signal went through the EDFA as many as 200 times. These results indicate that this gain-flattened EDFA is applicable for ultra long-haul WDM optical transmissions over 8000 km.