

---

# 과장분할다중 방식 광전송망을 위한 초광대역 광증폭기

이영선\* · 정재진\*

Ultra-broadband Optical Amplifier for WDM Optical Transmission Networks

Young-sun Lee\* · Jae-jin Jung\*

## 요 약

인터넷 이용자가 급속히 증가함에 따라 네트워크의 각 노드에서 감당해야 할 트래픽 용량이 수십 테라급에 이를 것으로 예상하고 있다. 한 개의 광섬유를 통해 테라비트 이상의 전송을 위해서는 기존의 시분할다중 방식 외에 과장분할다중 방식을 사용해야 한다. 과장분할다중 방식의 전송 용량을 확대하기 위해서는 채널당 전송 속도 또는 채널의 수를 증가시켜야 한다. 채널의 수를 증가시키기 위해서는 채널 간격을 줄이는 방안과 전송 대역폭을 넓히는 방안이 있다. 전송 대역폭을 넓히기 위해서는 초광대역 광증폭 기술이 필요하다. 본 논문에서는 C/L band에서 사용되는 에르븀 첨가 광섬유 증폭기, 광섬유 라만 증폭기 및 S band 광증폭기들을 소개하고, 다양한 광신호 증폭기술에 대한 발전 동향을 분석하고자 한다.

## ABSTRACT

Affordable traffic capacity of each node in networks is expected to reach in Tb/s range in proportion to the rapid growth of Internet users. To transmit more than Tb/s per fiber pair, WDM should be used as well as existing TDM. To increase the capacity of transmission in WDM networks, there are two ways, increasing channel speed or channel quantity. To increase the channel quantity, there are two ways, narrow spacing or expanding transmission bandwidth. To expand bandwidth, ultra-broadband optical amplifier technology is necessary. In this paper, we introduce EDFA in effect at C/L band, FRA, and some optical amplifiers in effect at S band, and analyze the development trend of various amplification technologies.

## 키워드

WDM, EDFA, FRA, TDFA, GS-TDFA, C, L and S band

## 1. 서 론

과장분할다중 방식(WDM, Wavelength Division Multiplexing) 광전송 시스템의 용량이 폭발적으로 증가함에 따라 이를 뒷받침해야 할 광증폭기의 대역폭

역시 커지고 있다. 채널 간격을 50GHz 내지 100GHz로 하면서 전송용량을 수 Tb/s로 확장하기 위해서는 100nm 이상의 대역폭을 갖는 광 증폭기의 개발이 필요하다. 현재까지 알려진 방법으로 100nm 이상의 대역폭을 갖는 광 증폭기를 구현하기 위해서는 광

---

\* 전남대학교 전자통신공학과  
심사완료일자 : 2008. 11. 14

접수일자 : 2008. 09. 22

섬유 라만 증폭기(FRA, Fiber Raman Amplifier)의 사용이 불가피하게 된다.

1980년대에 광통신 시스템의 전송 용량 증대시키는 데 매우 유용하게 쓰일 수 있는 광증폭기의 필요성이 대두되면서 비교적 적은 펄프 파워로도 매우 큰 이득을 얻을 수 있는 에르븀 첨가 광섬유 증폭기(EDFA, Erbium-Doped Fiber Amplifier)가 출현하게 되었다. 당시에 FRA는 작은 이득 효율 특성으로 광통신 시스템에서 필요로 하는 이득을 얻기 위해서는 매우 큰 파워가 필요했기 때문에 고출력 펄프 광원의 필요성이 가장 큰 단점으로 지적되면서 연구가 이루어지지 않았다. 그러나 1990년대에 고출력 반도체 펄프 레이저가 개발됨에 따라 라만 효과를 이용한 신호의 증폭에 대한 연구가 다시 진행되었고, FRA에 대한 관심이 증가하게 되었다[1]. 게다가 WDM 시스템의 용량 증대로 인하여 EDFA의 한계가 드러나면서 FRA의 역할이 본격적으로 가시화 되었다[1][2].

본 논문은 다양한 초광대역 광증폭 기술 동향을 이해하고 앞으로의 발전 방향을 예측하기 위하여, II장에서는 현재 가장 많이 사용되고 있는 C/L band 증폭용 EDFA, III장에서는 C/L/S band에서 사용이 가능한 FRA, IV장에서는 초광대역 광증폭 기술에 대하여 고찰하고, V장에서는 논문의 내용을 요약, 정리하여 결론을 맺는 내용으로 구성하였다.

## II. 에르븀 첨가 광섬유 증폭기 (EDFA)

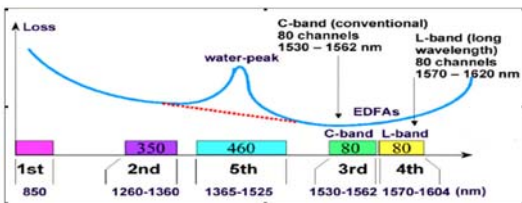


그림 1. DWDM 사용파장과 광증폭 대역  
Fig. 1 DWDM use wavelength and mad width substitute actor

그림 1은 실리카 광섬유의 손실창과 DWDM 적용 파장 및 EDFA 증폭대역 파장을 나타낸다. 현재 대부분의 장거리 광전송기술의 파장 대역이 제3 전송창(C band)에서 이루어지고 있으며, 한편 EDFA 증폭기 이

득을 확장하여 제 4 전송창(L band)의 파장대역 실용화가 이루어지고있다.

## 2.1 EDFA 증폭 원리

광섬유의 코어 부분에 소량의 Erbium 이온(50~1,000ppm)이 함유된 광섬유(EDF)에 980nm 파장대의 레이저 빔을 입사 시키면, 그 빛 에너지가 기저 상태에서  $^4I_{11/2}$  에너지 준위로 여기 된다.  $^4I_{11/2}$  준위로 여기된 이온들은 비복사 천이(Non-Radiative Emission)에 의해 준안정상태인  $^4I_{13/2}$  에너지 준위로 보통  $\mu\text{sec}$ 단위로 떨어진다. 준안정상태에서 기저상태로는 msec 시간으로 떨어지며, 실제 10ms 정도 머물게 될 때 1,550nm 파장대의 신호(속도 0.1~1ns) 광이 준안정 상태를 지나갈 때 빛으로 유도 방출되고 다시 기저 상태로 돌아간다[3][4].

그림 2에서  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$ 는 각각 이온 밀도를 의미하며, 980nm 펄프 광에 의한 EDFA는 3준위 레벨로 1,480nm 펄프 EDFA는 2준위로 전이됨을 알 수 있다.

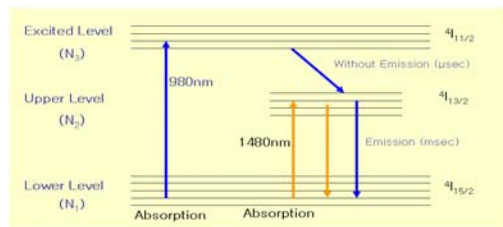


그림 2. 에르븀 이온 에너지 준위  
Fig. 2 Energy level erbium ion

EDFA의 성능은 이온밀도  $N_1$ 과  $N_2$  간의 관계에 따라 크게 달라진다. 증폭 성능은  $N_2$ 가 크거나  $N_1$ 가 작을수록, 밀도반전계수( $n_{sp}$ )가 1에 가까워질수록 좋다.

## 2.2 EDFA 잡음 특성

광 시스템의 가장 중요한 성능 측정값은 비트 에러율(BER, Bit Error Rate)이다. BER을 결정하는 주요 요소 중 하나가 신호대 잡음비(SNR, Signal-to-Noise Ratio)이며, 광증폭기는 자연방출광 잡음(ASE, Amplified Spontaneous Emission) 때문에 광잡음이

추가 되는 것이 일반적 현상이다. 광증폭기를 사용하는 장거리 전송 시스템에서 ASE 잡음이 축적되어 전송 거리에 제약을 받는다.

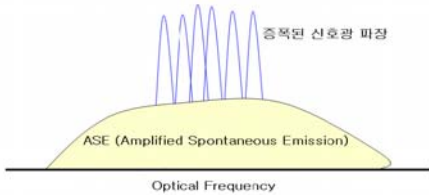


그림 3. 광증폭기의 출력 광신호와 ASE

Fig. 3 Optical Amplifier Output Optical Signal and ASE

### 2.3 EDFA 이득 특성

펌프광과 신호광의 전력 레벨은 EDF 길이 구간에 따라 달라진다. 만약, 펌프 전력이 충분치 않거나 신호 전력이 상대적으로 큰 경우, 상준위의 이온 밀도  $N_2$ 는 강하게 펌핑된 때의 값보다 작다. 이러한 경우  $N_2$ 는 EDF의 길이를 따라 분산된다. 이득계수( $g$ )는 단위 길이당 local gain으로서 상준위의 이온 밀도와 비례한다. 일반적으로  $g$ 는 EDF 길이 구간 내의 지점  $z$ 와 신호 파장  $\lambda$ 에 관한 함수이다. 총 이득  $G$ 는 EDF의 길이 구간에 따른  $g(z)$ 를 합하여 계산한다[5][6].

펌프 전력이 충분하다면 이온 밀도  $N_2$ 는 거의 일정하게 유지된다. 이러한 경우, 이득 계수( $g$ ) 또한 EDF 전체 길이에 걸쳐 일정하다.

### 2.4 EDFA 고려사항

EDFA로 구성된 DWDM 전송 시스템의 장점으로 크게 두 가지가 있다. 첫째로 신호 속도, 변조 방식, 다중화 방식과 같은 신호화 방법에 제한이 없다. 이는 초고속 신호 및 파장 다중화 신호 전송에 용이하다. 둘째로 증폭기의 구조가 단순하다. 이는 보다 높은 신뢰도와 낮은 비용으로 광증폭기를 제작할 수 있다.

한편, EDFA를 장거리 해저 전송 시스템에 사용하는 경우에는 다음과 같은 점들을 고려해야 한다.

첫째, 각 증폭기에 추가된 광 잡음이 축적된다. 따라서 수신 단말 장치에서 SNR의 감소를 최소화하기

위해서는 신호 레벨을 최적화하고 저잡음 증폭기를 사용해야 한다.

둘째, 각 광증폭기 사이에 사용된 광섬유 케이블에서 색 분산에 의한 신호 펄스 파장 왜곡이 축적된다. 이러한 왜곡을 최소화하기 위해서는 잡음 없는 펄스와 적은 분산 값을 갖는 광섬유 회선이 필요하다. 따라서 외부 변조기와 1.5 $\mu$ m 파장에서 영분산 값을 갖는 분산천이광섬유(DSF, Dispersion Shifted Fiber) 사용이 필요하다.

셋째, 각 증폭기 사이의 광섬유 케이블 구간에서 광섬유 비선형 현상이 발생되어 신호 스펙트럼의 분산이 축적된다. 따라서 송신 전력, 영분산 파장과 같은 광섬유 비선형과 관련된 매개변수들을 고려해야 한다. 색분산은 펄스의 왜곡을 최소화하기 위해 영분산에 가깝게 낮아야 하는 반면, 영 분산의 광섬유 케이블은 광섬유의 비선형에 의해 신호스펙트럼의 왜곡을 초래한다. 이와 같은 상충된 점들을 해결하기 위해 EDFA 중계 시스템에서는 분산을 설계하여 시스템을 구축한다.

## III. 광섬유 라만 증폭기 (FRA)

### 3.1 FRA 동작 원리

EDFA, TDFA와 달리 전송하는 광섬유 자체에 에너지를 펌핑하여 신호를 증폭하는 증폭기로 높은 파워를 갖는 라만 펌프는 에너지를 역방향, 즉 전송원(transmission source) 방향으로 향한다.

펌프 광원은 1,550nm 대역에서의 전송을 위해 915nm 레이저 다이오드에서 에너지를 모아 1,455nm 대역의 파장을 갖는 고휘력 신호를 방출하며, 이 신호는 EDF를 통해 1,177nm 파장으로 변환되고 다시 공진기를 통과하면서 1,455nm 광원으로 변환되며, 공진기는 두 개의 FBG(Fiber Bragg Grating) 사이에 끼워져 있는데 FBG는 특정 파장의 광원만을 통과시키는 섬유로 만들어진 선택 필터이다[7][8].

라만 증폭기는 1,100~1,700nm의 광범위한 파장 대역에 걸쳐 광증폭이 가능하며, 100km 이상의 장거리 전송이 가능하다.

### 3.2 All Raman Amplifier

그림 4는 S band 신호 증폭을 위한 All Raman Amplifier의 구조이다 [10]. Distributed 증폭기와 two stage discrete 증폭기가 결합된 구조이다. Distributed 증폭기는 TrueWave 100km와 1,410nm 라만 펌프로 구성되어 있으며, discrete amplifier는 DCF를 증폭 매질로 사용함으로써 dispersion 보상과 span loss보상을 위한 Raman gain을 얻을 수 있다. 채널간 이득 차이를 최소화 하기 위해 DCF의 펌프 파장으로 1,393nm 와 1,427nm를 선택하였다. 그림 3.1의 Inline amplifier는 1,490~1,515nm에서 20dB이상의 이득과 0dB 이하의 잡음지수 값을 갖는다.

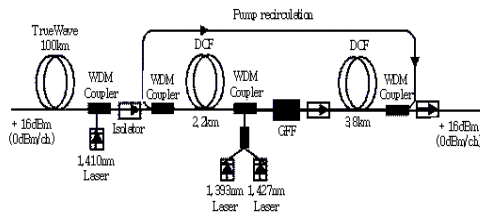


그림 4. All Raman Amplifier의 구조  
Fig. 4 All Raman Amplifier structures

그림 5는 inline amplifier를 사용하여 NZ-DSF (Non Zero-Dispersion Shifted Fiber) 600 km 전송을 위한 실험 구성도이다 [10]. Raman recirculating loop를 구성하여 실험하였으며, 총 전송용량은 40×10Gb/s이다.

NZ-DSF 300km와 600km 전송 후에 전송 특성을 OSNR 값, Q 값, eye diagram을 통해 알 수 있으며, 300km와 600km 전송 후 OSNR은 각각 28dB, 24dB이다. NZ-DSF 600km 전송 결과 가장 좋은 Q값은 18.3dB이고 가장 나쁜 Q 값은 16dB였다.

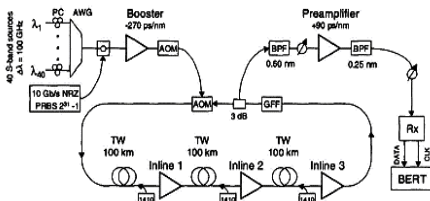


그림 5. S band all Raman 전송 실험 구성도  
Fig. 5 S band all raman transmission experimental block diagrams

### 3.3 FRA 적용

FRA의 가장 큰 장점은 적당한 펌프 광원만 존재할 경우 특별한 광섬유의 설치 없이 기존의 전송용 광섬유를 사용하여 어느 대역에서나 광증폭이 가능하다는 것이다. 이러한 점은 광 신호를 기존의 포설된 광선로를 따라 손실 없이 진행하게 해주는 distributed amplifier를 가능하게 하여 EDFA 출력에 여유분을 제공함으로써 광 링크의 설계를 용이하게 하거나 증폭기 사이의 간격을 크게 하여 증폭기의 개수를 줄임으로써 그 비용을 절감시킬 수 있게 한다.

## IV. 초광대역 광증폭 기술

실리카 광섬유의 저손실 대역이 1460~1650nm로 넓은 범위 임에도 불구하고 EDFA의 한정된 증폭 대역폭으로 인해 DWDM 전송 시스템에서 사용 가능한 파장 수에 제한이 따른다. EDFA 증폭 대역 밖의 파장을 증폭하는 기술로 TDFA(Thulium-Doped Fiber Amplifier) GS-TDFA(Gain Shifted TDFA), 광섬유 라만증폭기(FRA, Fiber Raman Amplifier), 복합형 광증폭기들이 개발되어 점차 증폭 파장대역을 C band 이외에 L band, S band 대역으로 확장하고 있는 추세이다. 그림 6은 각각의 대역에서 영분산을 갖는 광섬유와 이들 대역에서 개발되고 있는 광증폭기를 나타내고 있다.

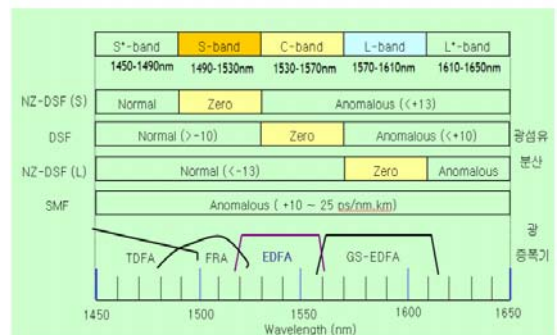


그림 6. 실리카 광섬유의 저손실 대역  
Fig. 6 That loss substitute actor of silica optical fiber

### 4.1 S band 광증폭기 기술의 발전 동향

S band 광증폭기 기술은 세 가지로 구분할 수 있다. TDFA(Thulium-Doped Fiber Amplifier), GS-TDFA(Gain Shifted TDFA), EDFA(Erbium-Doped Fiber Amplifier) 등과 같은 희토류 원소를 광섬유에 도핑하고 펌핑 광을 가하는 증폭기와 FRA(Fiber Raman Amplifier), 그리고 복합형 증폭기(TDFA+FRA 또는 FRA+TDFA)이다. S band(1,460~1,530nm)를 S+(1,460~1,490nm)와 S band(1,490~1,530nm)로 구분할 때 TDFA는 S+ band 증폭기, GS-TDFA는 S band 증폭기로 사용된다.

### 4.2 S band 광증폭기의 상용기술

상용화된 S band 광증폭기는 Thulium doped fluoride fiber를 이용한 TDFA가 대부분이다. 상용화된 증폭기는 반도체 레이저 다이오드를 펌프광원으로 사용하여 증폭기의 크기를 최소화 하였으며, WDM시스템에 사용하기 위한 이득평탄 특성이 고려되었다. 특히 TDFA는 기존의 C/L band EDFA와 쉽게 연결하여 S+C+L band 증폭기를 구현하기에 편리하다. AFW사의 증폭기는 다른 제조 회사들의 제품에 비해 사용 이득대역이 20nm 정도 넓으며 출력 파워가 19dBm으로 크기 때문에 metro system뿐만 아니라 long-haul system에서도 사용가능하다. INO사의 제품은 1,055nm 레이저 다이오드를 펌프광으로 사용하여 증폭기의 크기가 작고 automatic pump control이 가능하다. 또한 다른 회사의 제품보다 낮은 잡음지수를 갖는다. 현재 상용화된 대부분의 제품들은 30nm의 이득평탄대역과 25dB의 이득, 6~7dB의 잡음지수 값을 갖는다. 기본적으로 신호의 삽입/추출에 의한 이득 고정특성 기능은 포함하고 있지 않지만, TDFA에서의 transient 특성에 대한 연구가 이루어지고 있기 때문에 이득 조절 기능이 추가된 TDFA의 구현은 어렵지 않을 것으로 판단된다.

상용 제품이 13dBm에 7dB의 잡음지수를 제공한다면 현재 C band에서 메트로 WDM 전송용으로 사용하고자 하는 연구가 진행되고 있는 LOA나 GCSOA (Gain-Clamped SOA)로 대체가 가능할 것이며, 라만을 결합한 RAGCSOA(RFA and GCSOA)의 사용도

고려할 필요가 있다. 이 경우 반도체의 에너지 갭만 조절함으로써 이득과장대역을 조절할 수 있어 개발이 어렵지 않을 것으로 보인다.

표 1. 상용 S band 증폭기들의 특성  
Table. 1 Characteristic of commercial S band amplifier

제조 회사	제품명 (model)	파장 (nm)	출력 (dBm)	이득 (dB)	잡음지수 (dB)	참조
AFW	TAM series	1455~1335	19	25	6.5	[7]
INO	FAS series	1455~1485	12	25	6	[8]

## V. 결 론

과장분할다중 방식의 전송용량 확대를 위하여 채널 수를 증가시키려면 전송 대역폭을 넓혀야 하며, 전송 대역폭을 넓히기 위해서는 초광대역 광증폭 기술이 필요하다.

본 논문에서는 C/L band에서 사용되는 EDFA, S band에서 사용 가능한 FRA 및 TDFA 광증폭기, 그리고 다양한 광신호 증폭기술에 대한 발전 동향을 알아보았다.

연구되고 있는 S band 증폭기는 크게 세 가지로 구분할 수 있다. Rare earth amplifier인 TDFA, GS-TDFA와 EDFA, all Raman amplifier, 그리고 hybrid amplifier(TDFA+FRA)이다. 세 가지 증폭기는 공통적으로 증폭기의 펌프 광으로 반도체 레이저 다이오드 사용에 초점을 맞춘다. 또한, WDM 광전송 시스템에 적합한 증폭기로 요구되는 이득평탄 특성을 고려한다. 살펴본 바에 의하면 EDFA로 가능한 C/L band에 비해 성능이 많이 떨어지는 것을 알 수 있다. Raman amplifier의 경우 펌프광 세기가 너무 높아지고 펌프 파장에서의 흡수 손실이 높아 더욱 효율이 떨어지는 문제가 있다. TDFA의 경우 TDF의 가격이 아주 높다는 문제와 안정성이 떨어지는 fluoride 유리를 사용하는 점에서 장기간 신뢰도에도 문제가 있다. 또한 아직까지 효율이 낮고 비교적 복잡한 펌핑 방법을 사용하고 있다. S band 광증폭기의 경우 기존의 C+L band와 같이 장거리 대용량 시스템에 사용될 가

능성이 많고 이 경우 채널수가 많아져 출력이 충분히 커야 할 것이다.

결론적으로 S band를 사용하기 위해서는 아직까지 신뢰도가 높고 경제적인 증폭기가 없어 보이며, WDM 시스템의 측면에서 앞으로 계속 주목을 받을 것은 dual C/L band EDFA와 이와 결합된 FRA가 될 것으로 보인다.

### 참고 문헌

- [1] 이영선, 유재덕, 정재진, 박홍태, 김건우, “해저 광통신 시스템,” Infinity books, Apr. 2008.
- [2] 오정미, 이동한, “S-band 광증폭기 기술 동향”, ITFIND 주간기술동향, March 2004.
- [3] Jae-Oh Byum, Pilhan Kim, Won Jae Lee, Choong Hee Lee, and Namkyoo Park, "Analysis on the transient response of 1.55um/1.4um dual wavelength pumped thulium-doped fiber amplifiers", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 14, No. 11, 2002.
- [4] 김승관, 주무정, “초광대역 광증폭기술 동향”, June 2000.
- [5] E. M. Dianov, "Raman fiber amplifiers", Technical Digest of 10th Optical Amplifiers and Their Applications(Nara, Japan), 1999.
- [6] 이만섭, “광인터넷 기술의 발전 방향”, 2002.
- [7] www.afwtechnology.com
- [8] www.ino.ca
- [9] A. K. Srivastava, et al., “System Margin Enhancement with Raman Gain in Multi-Span WDM Transmission”, Technical Digest of OFC’99(San Diego, California, USA), 1999.
- [10] J. Bromage, J. C. Bouteiller, H. J. Thiele, K. Brar, J.H. Park, C. Headley, L.E. Nelson, Y. Qian, J. DeMarco, S. Stulz, L. Leng, B. Zhu and B.J. Eggleton, "S band all Raman amplifiers for 40×10Gbit/s transmission over 6×100km of non-zero dispersion fiber", OFC 2001, Vol. 4, 2001.

### 저자 소개



#### 이영선(Young-sun Lee)

1987년 숭실대학교 전자공학과 졸업 (공학사)  
2008년 전남대학교 전자통신공학과 석사과정

※ 주관심분야 : 해저광통신 시스템, DWDM시스템



#### 정재진(Jae-jin Jung)

2002년 정보통신공학사  
2008년 전남대학교 전자통신공학과 석사과정

※ 주관심분야 : 해저광통신 시스템, DWDM 시스템, u-City