

## WDM네트웍을 위한 광 귀환에 의해 이득이 고정된 EDFA의 귀환 파장에 따른 특성

김상용 · 정 준 · 채창준

한국통신 전송기술연구소

이 병 호

서울대학교 전기공학부

(1997년 2월 17일 받음)

광 귀환에 의해 이득이 고정된, 980 nm 펌프 EDFA의 귀환 파장에 따른 특성을 비교하였다. 귀환 파장으로 1532, 1543, 1565 nm의 세가지 파장을 선택하였으며, 각각의 경우에 대해 2.5 Gbps×8채널, WDM시스템을 구성하여, 입력 신호광의 세기에 따른 이득의 변화, 상호 포화에 의한 신호광의 동 특성, relaxation oscillation에 의한 power penalty, 입력 신호광의 세기에 따른 잡음지수의 변화를 측정하여 비교하였다

### I. 서 론

파장 분할 다중화(WDM) 네트워크의 구성에서 어븀 첨가 광 섬유 증폭기(EDFA)는 시스템의 핵심 요소로 각 단계마다 몇 개씩 사용된다. 포화 영역에서 동작하는 경우 광 증폭기의 이득은 입력 신호의 크기에 따라 변한다. EDFA에서는 이득의 변동이 0.1~10 ms정도로 느리게 일어나므로 신호가 수십 kbps이상으로 변조되면 입력의 평균값에 의해 이득이 결정된다. 따라서 EDFA는 모든 채널의 입력의 합이 일정하다면 이득의 상호 포화로 인한 채널 간의 누화가 없다는 장점이 있으며 다채널 WDM네트웍의 광 증폭기로 매우 유용하다.

점 대 점 전송의 경우에는 전송되는 신호량이 변하여도 채널의 수를 일정하게 유지하여 EDFA의 입력의 합을 일정하게 유지하는 것이 가능하다. 그러나 다파장 WDM네트웍에서는 네트워크 구성의 변경, 더 많은 채널의 네트워크로의 확장, 구성 요소의 고장에 의한 몇 개 채널의 소거 등의 원인으로 EDFA를 통과하는 파장의 개수가 변할 수 있다. 또한 패킷 스위치 시스템 또는 광 가입자 망의 경우에는 구조상 여러 채널이 불규칙하게 켜지고 꺼진다. 이와 같은 경우에는 이득의 상호 포화로 인해 남은 채널의 광 출력에 과도 현상이 발생하고 이득이 변동하여 전송 오류가 순간적으로 많아지는 문제가 발생한다.<sup>[1,2]</sup> 통과 채널의 개수가 감소하는 경우, 입력 감소에 따라 이득 포화가 감소하고, 이득이 증가하여 남은 채널의 파워가 증가하므로 비선형 현상이 일어나는 임계값을 넘을 위험이 생긴다. 반대로 통과 채널의 수가 증가하는 경우, 입력 증가에 따라 이득 포화가 증가하고, 이득이 감소하여, 통과 채널의 파워가 감소하므로 수신단에서의 광 출력이 설계된 수신 감도보다 낮아질 위험이 생긴다. 이를 해결하려면 입력광의 크기에 따라 이득이 변화하는 정도를 최소화하여 일정한 광 출력이 유지되도록 시스템을 설계하여야 한다. 따라서 EDFA의 이득을 일정하게 유지하는 자동 이득 조정(AGC :

Automatic Gain Control) 기법이나 광 출력을 일정하게 유지하는 자동 출력 조정(APC : Automatic Power Control) 기법이 많이 연구되고 있다.<sup>[3]</sup>

EDFA의 자동 이득 조정 방법을 크게 분류하면 펌프광을 조절하는 방법과 보상 신호를 인가하는 방법이 있다. 펌프광을 조절하여 EDFA의 이득을 안정화 시키는 방법은 펌프광의 출력을 증가시켜 이득의 포화를 방지하는 방법으로 펌프 LD 구동 회로에 약간의 변경만으로 간단히 구현할 수 있다는 장점이 있으나, 펌프광의 출력이 변하면 EDFA의 동작 특성이 달라질 수 있고 펌프광의 출력은 매우 안정되어야 하므로 이의 제어가 어렵다는 단점이 있다. 보상 신호를 인가하는 방법은 신호광 외에 추가로 인가되는 보상 신호의 크기를 조절하여 EDFA의 포화 수준을 일정하게 유지시키는 방법으로서, 추가의 LD가 필요하므로 상대적으로 비용이 많이 드는 것이 단점이나, 빠른 입력 신호의 변동에도 대응할 수 있다는 장점이 있다.<sup>[1]</sup> 그리고 보상 신호를 사용하는 방법의 변형으로 광 출력의 일부를 귀환하여 레이저를 구성하여 발진되는 광을 보상 신호로 사용하는 방법이 있다.<sup>[4,5]</sup>

본 논문에서는 980 nm 펌프의 광선로 증폭용 EDFA에 광 귀환 루프를 구성하여 이득을 고정시키고, 1532, 1543, 1565 nm의 세가지 귀환 파장에 대하여 2.5 Gbps×8채널, WDM시스템을 구성하여, 입력 신호광의 세기에 따른 이득의 변화, 상호 포화에 의한 신호광의 동 특성, relaxation oscillation에 의한 power penalty, 입력 신호광의 세기에 따른 잡음지수의 변화를 측정하여, 귀환 파장에 따른 특성을 비교하였다

### II. 광 귀환에 의하여 이득이 고정된 EDFA

광 귀환에 의하여 이득이 고정된 EDFA의 개념도를 그림 1에 나타내었다. 그림 1의 Tap #2를 이용해 EDFA출력의 일

부를 취하고 ASE(Amplified Spontaneous Emission) 중의 특정 파장을 밴드 패스 필터로 선택하여 Tap #1을 통해 EDFA의 입력으로 귀환시킨다. 이때 발진되는 레이저의 크기는 광 감쇠기에 의해 조절된다. 이렇게 링 레이저 형태로 발진되어 생성된 보상 신호에 의해 이득 포화가 증가하는 모습을 그림 2에 나타내었다.

그림 2 (a), (b)의 i)은 광 귀환이 없을 때의 스펙트럼이고 ii)는 이득이 약 1 dB정도 감소될 정도의 광 귀환을 걸었을 때의 스펙트럼이다. 그림 2 (a)에서 보면 두 개의 스펙트럼의 일부분이 겹쳐 구별하기 어려우므로 이를 보기 쉽게 평행이동하고, 귀환 루프의 광 감쇠기를 조절하여 발진되는 보상 신호

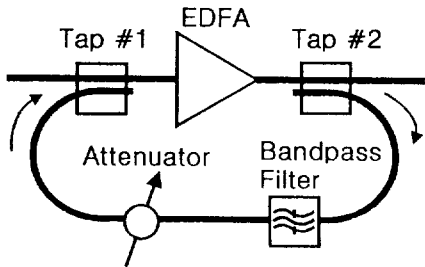


그림 1. 광 귀환 루프를 이용한 자동 이득 조정의 개념도

의 크기를 변화시킨 중간 단계를 포함시킨 것이 그림 2 (b)이다. 8채널 신호의 오른쪽에 떨어져 있는 광 신호가 귀환 루프에서 발진된 보상 신호로서 귀환 파장은 1565 nm이다. ii)의 스펙트럼을 i)의 스펙트럼과 비교해 보면 보상 신호에 의해 이득 포화가 증가하여 ASE 스펙트럼의 크기가 전체적으로 감소하고 ASE스펙트럼 위에 있는 신호 채널들의 출력도 감소하여 이득이 억제되었음을 알 수 있다.

이와 같이 광 귀환을 이용하여 이득을 고정시키는 방법은 몇가지 간단한 수동 소자만을 이용하여 전자회로가 필요없는 전광(All Optical) 귀환 루프를 구성하여 자동 이득 조절이 가능하다는 장점이 있다. 이 방법은 WDM네트워크에서 EDFA자동 이득 조절으로 이용되는 것 외에도 광섬유 자이로스코프에서 손실을 자동으로 보상하는 용도로 사용되기도 한다.<sup>[5,6]</sup>

### III. 실험 및 결과

#### 3.1. 광 귀환 파장에 따른 이득 제어 성능

그림 3와 같은 실험 구성으로 광 귀환에 의하여 이득이 고정된 EDFA를 구성하였다. 실험에서 사용된 EDFA는 980 nm 펌프의 선로 증폭용 EDFA로 1555 nm에서 -30 dBm의 입력 신호에 대해 26.5 dB의 소신호 이득과 4.5 dB이하의 잡음지수를 보이며 알루미늄이 함께 도포되어 일반적인 EDFA보다 균일하게 포화되는 이득 특성을 갖는다.

WDM시스템은 1548.6 nm에서 1559.8 nm까지 1.6 nm간격의 2.5 Gbps×8채널로 구성하였다. 최근에 제정된 ITU-T의 WDM 파장 권고안은 193.1 THz, 즉 1552.52 nm를 중심으로 100 GHz, 약 0.8 nm의 배수의 간격으로 채널을 배정할 것을 제안하며 위의 구성은 이에 준하는 200 GHz, 약 1.6 nm 간격의 채널로 구성되었다. LiNbO<sub>3</sub>마하젠더형 외부변조기를 이용하여 신호 채널로 사용된 4번 채널을 2.5 Gbps로 변조하였고, 또 하나의 LiNbO<sub>3</sub>외부변조기를 사용하여 7개 채널을 100

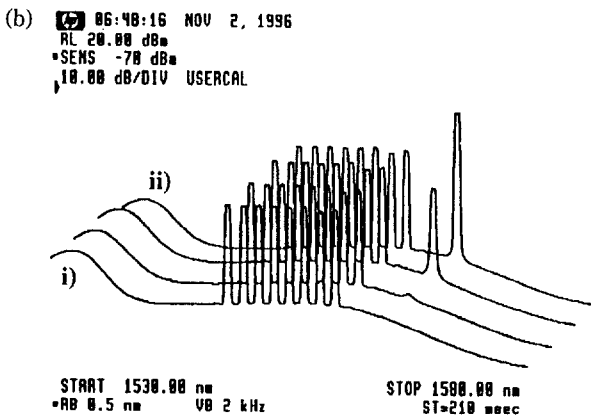
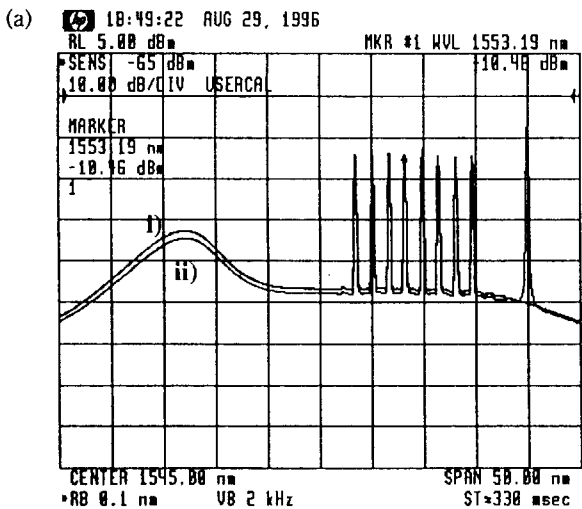


그림 2. 1565 nm에서 발진되는 보상 신호에 의한 이득포화의 증가

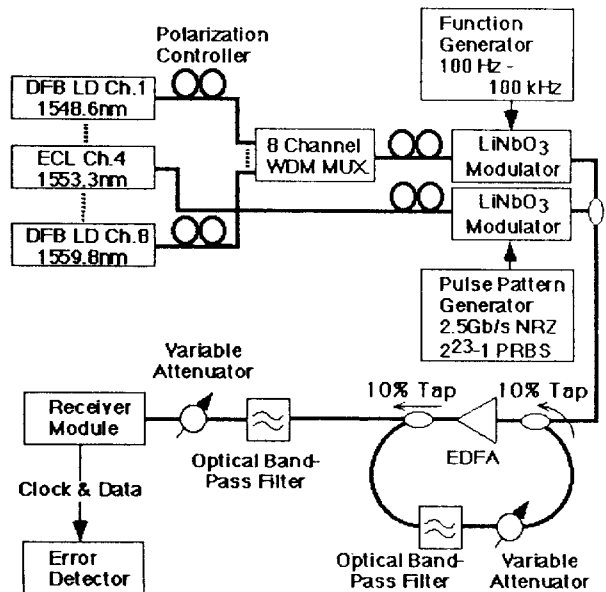


그림 3. 실험 구성도

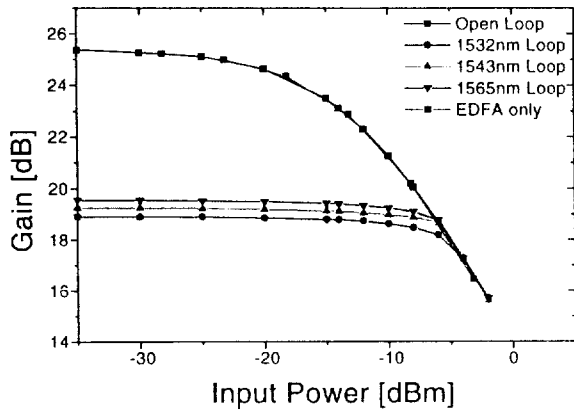


그림 4. 입력 신호광의 세기에 따른 이득의 변화

Hz~100 kHz로 on-off시켰는데 이는 채널들이 불규칙하게 변동되는 경우 중의 최악의 경우에 해당한다. 자동 이득 조정을 위한 루프를 구성하기 전에 각 8채널의 입력은 -20 dBm으로 총 -11 dBm으로 설정되었으며 이때 EDFA의 이득은 약 21 dB로 포화되었다.

귀환 파장은 EDFA의 첫번째 이득 최대점인 1532 nm와 8채널 신호 대역에서 약 5 nm떨어지고 EDFA의 이득이 신호 대역에 비해 작은 영역인 1565 nm, 신호 대역으로 쓰이는 영역 중 1번 채널보다 약 5 nm 앞쪽의 1543 nm의 세가지 파장을 선택하였다. 각 경우마다 루프의 손실을 조정하여 이득이 1 dB 정도 감소되어 약 20 dB가 되도록 하였다. 이를 달리 표현하면 루프에서 발생하는 링 레이저의 광 출력이 8채널 모두가 존재하는 경우의 문턱 광 출력에 비해 1 dB의 여유가 있다는 뜻이다. 입력 신호에 대한 이득의 그래프를 그림 4에 나타내었다.

입력 신호의 변동에 따른 광 출력의 변동을 관찰하기 위해 다른 7개 채널의 신호가 100 Hz로 on-off될 때 신호 채널의 동특성을 측정된 결과를 그림 5에 표시하였다. 귀환 루프가 없을 때에는 EDFA의 입력 신호의 크기가 변함에 따라 이득이 변화하고 신호 채널의 출력도 변화하며 약 3.68 dB의 변동이 관측되었다. 귀환 루프를 구성하면 입력 신호의 변화를 링 레이저 출력이 변동하며 흡수하므로 출력 광신호에는 거의 변동이 생기지 않는다. 세가지 귀환 파장의 경우 모두 변동이 0.2 dB이하로 억제되는데, 신호 파장에 가까운 1565 nm 또는 1543 nm의 귀환 파장의 경우가 신호 파장에서 멀리 떨어진 1532 nm의 귀환 파장을 사용하는 경우 보다 광 출력의 변동을 더 잘 억제함을 알 수 있었으나, 그 차이는 0.04 dB로 미미하다.

### 3.2. Relaxation oscillation의 영향

광 귀환을 이용한 자동 이득 조정 방법에서는 귀환 루프에서 발생하는 relaxation oscillation이 문제가 될 소지가 있다고 알려져 있다. 출력광이 귀환되면서 링 레이저가 발진할 때, EDFA의 인버전의 크기와 귀환 루프의 길이에 따라 결정되는 주파수의 relaxation oscillation이 발생될 수 있는데 만일 이와 비슷한 주파수의 입력광 변동 또는 펌프 광의 변동이 있을 때 출력광 세기에 변동이 나타나며 이에 따른 power penalty가

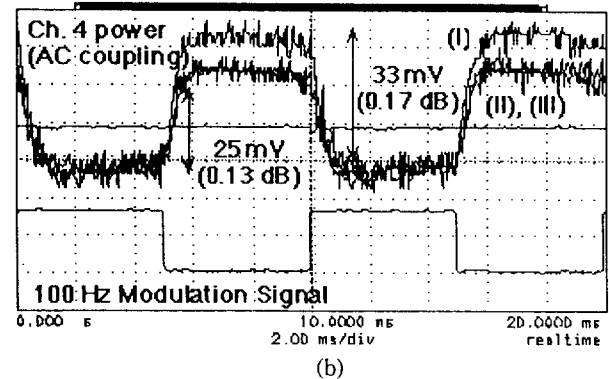
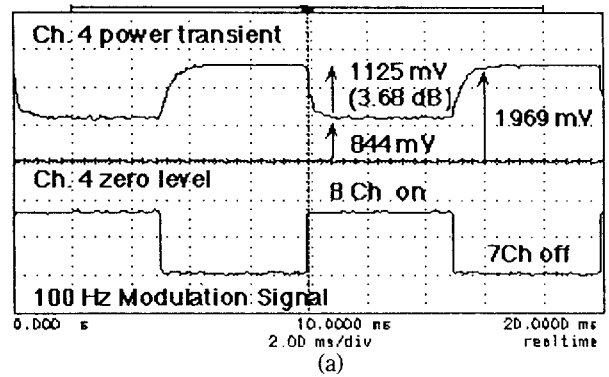


그림 5. 8채널 중 7개 채널이 100 Hz로 on-off 될 때 남은 채널의 변동

- (a) 귀환 루프가 없을 때
  - 약 3.68 dB의 변동이 관측됨.
- (b) 귀환 루프가 있을 때
  - 변동이 작으므로 오실로스코프를 AC coupling으로 관측한 그림
  - (I) 1532 nm, (II) 1543 nm, (III) 1565 nm 귀환 루프
  - 세가지 귀환 파장의 경우 모두 변동이 0.2 dB이하로 억제됨.

발생한다는 점이다. 이를 확인하기 위해 8개 채널 중 7개 채널의 광 출력을 100 Hz에서부터 relaxation oscillation frequency 이상의 높은 주파수인 50 kHz까지의 주파수로 on-off 시켜가며 4번 채널의 BER을 측정하였다. 1532 nm, 1565 nm의 두 가지 귀환 파장의 경우에 대해 측정된 BER을 각각 그림 6의 (a), (b)에 표시하였다. 1532 nm는 EDFA의 이득이 최대인 점으로 1565 nm의 경우에 비해 인버전이 높기 때문에 귀환에 의해 발생하는 링 레이저가 문턱보다 매우 높은 값에서 발진하므로 RF spectrum analyser로 측정된 relaxation oscillation frequency가 약 31 kHz로 더 높고, 링 레이저의 발진이 더 안정된 특성을 보이며 그림 6 (a)에서 보듯이 relaxation oscillation frequency 이외의 주파수에서는 BER이 나빠지지 않고 relaxation oscillation frequency에서만 BER 악화가 뚜렷하였다. 두 귀환 파장의 경우 모두 10<sup>-9</sup> BER에서의 power penalty는 약 0.4 dB의 작은 값이므로 전송 시에 큰 문제가 없음을 확인하였다. 그러나 여러 단을 cascade로 연결할 경우 각 단에서 발생하는 relaxation oscillation에 의한 power penalty들이 누적되어 나타나면 시스템의 크기를 제한하는 요소로 나타날 수 있으므로 향후 이에 대한 연구가 필요하다.

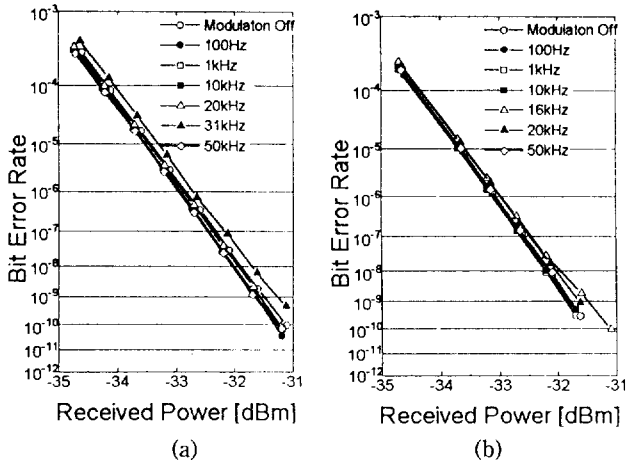


그림 6. 8채널 중 7채널이 여러 주파수로 on-off될 때 남은 채널의 BER  
 (a) 귀환 파장 1532 nm  
 - relaxation oscillation frequency : 31 kHz  
 (b) 귀환 파장 1565 nm  
 - relaxation oscillation frequency : 16 kHz

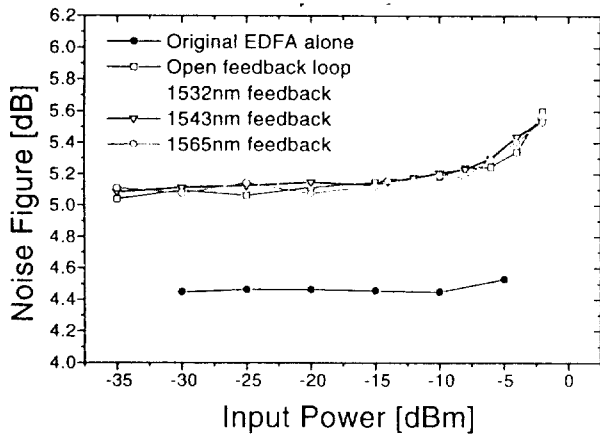


그림 7. 광 귀환이 있는 경우 측정된 잡음지수

3.3. 잡음지수에 미치는 영향

보상 신호를 인가하여 자동 이득 조절을 하는 경우에는 추가로 인가된 보상 신호에 의해서 이득의 포화가 심해지고 인버전이 감소하여 잡음지수가 증가할 우려가 있다. 광귀환 루프를 구성함에 따라 증가하는 잡음지수의 크기를 측정하여

그림 7에 표시하였다.

측정된 잡음지수는 약 5.1 dB로 세가지 귀환 파장의 경우 모두 비슷한 경향을 보이며 귀환 루프가 없는 원래의 EDFA 만의 경우에 비해서 약 0.6 dB증가한 것이다. 귀환 루프의 구성 시 EDFA의 입력에 10% 탭이 사용되어 입력 신호가 약 1 dB감소하므로 이에 따른 잡음지수의 증가를 고려하면 광 귀환에 의한 EDFA의 이득 감소에 의해 발생하는 잡음 지수의 증가는 무시할만하다.

IV. 결 론

광 귀환에 의해 이득이 고정된 980 nm 펌프EDFA의 귀환 파장에 따른 특성을 비교하였다. 귀환 파장을 1532, 1543, 1565 nm의 세가지 파장을 선택하여, 각각의 경우에 대해 2.5 Gbps×8채널, WDM 시스템을 구성하여, 입력 신호광의 세기에 따른 이득의 변화, 상호 포화에 의한 신호광의 동 특성, relaxation oscillation에 의한 power penalty, 입력 신호광의 세기에 따른 잡음지수의 변화를 측정하여 비교하였다. 이로부터 다음의 사항들을 확인할 수 있었다. 광 귀환을 이용하면 귀환 파장에 상관없이 상호 포화에 의한 이득의 변동을 억제할 수 있으며, 귀환 파장을 신호 채널에 가깝게 하는 것이 좀더 결과가 좋으나 그 차이는 미미하다. 그러나 relaxation oscillation의 관점에서 보면 이로 인한 power penalty는 0.4 dB로 같아도 1532 nm 쪽이 좀 더 안정된 레이저 발진을 이루므로 유리하다.

실제 WDM네트워크 시스템은 여러 개의 EDFA를 사용한 링크로 구성될 것이다. 이렇게 여러 단의 EDFA를 사용하면 입력광의 변동에 따른 광신호의 변화가 더 빠른 시간 간격에서 일어나므로<sup>[1]</sup> 이의 동작특성에 대한 연구가 보충되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] J. L. Zyskind, et al., OFC'96 PD31-1 (1996).  
 [2] K. Motoshima, et al., OFC'94, ThC4 (1994).  
 [3] E. Desurvire, *Erbium-doped Fiber Amplifiers*, (John Wiley & Sons Inc., New York, 1994), pp.469-480 and references therein  
 [4] M. Zirngibl, *Electron. Lett.*, **27**, 560 (1991).  
 [5] H. Okamura, *Electron. Lett.*, **27**, 2155 (1991).  
 [6] 김 호삼, 박 회갑, *한국광학회지*, **5**, 291 (1994).

**Performances of gain-clamped EDFAs with different optical feedback wavelengths  
for use in WDM networks**

Sang Yong Kim, Joon Chung and Chang Joon Chae

*Transmission Technology Research Laboratory, Korea Telecom, Taejon 305-348, Korea*

Byoung-ho Lee

*School of Electrical Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea*

(Received : February 17, 1997)

We compare feedback wavelength-dependent performances of all-optical gain-clamped 980-nm pumped erbium-doped fiber amplifiers. In a 2.5-Gbps 8-channel WDM system, we have measured and compared gain compressions, signal power variations due to cross-saturation, power penalties caused by relaxation oscillations and noise figures for three different feedback wavelengths - 1532, 1543, and 1565 nm.