

L-band EDFA에서의 온도에 따른 이득 변화와 가변 감쇄기를 이용한 온도 보상

이원경[†] · 정희상 · 주무정

한국전자통신연구원 네트워크연구소 광통신연구부

⊕ 305-350 대전시 유성구 가정동 161번지

(2002년 11월 12일 받음, 2002년 12월 26일 수정본 받음)

0°C에서 50°C까지 온도를 변화시켜 가며 100 GHz의 채널 간격으로 L-band 40채널을 운용했을 때, 온도에 따른 L-band EDFA의 출력 스펙트럼 변화와 이득 변동폭을 측정하였다. 이득 포화 영역에서의 이득의 변화로 인한 출력 스펙트럼의 변화는 온도에 따른 출력 스펙트럼의 변화와 상반되는 점을 이용하여 1단과 2단 사이에 삽입한 가변 감쇄기를 조절하여 온도에 따른 이득 변동을 보상하였다. 그 결과, 0°C에서 최대 3 dB까지 차이를 보이던 이득 변동 폭은 가변 감쇄기를 이용한 온도 보상으로 1 dB 이내로 줄어듦을 볼 수 있었다.

주제어 : erbium-doped fiber amplifier, temperature compensation, voltage-controlled attenuator, gain flattening.

I. 서 론

오늘날 WDM 광 전송 시스템의 용량을 증가시키기 위해 GS-EDFA(Gain-Shifted Erbium-Doped Fiber Amplifier), TDFA(Thulium-Doped Fiber Amplifier), FRA(Fiber Raman Amplifier) 등 서로 다른 파장 대역에서 이득을 갖는 광증폭기가 개발되고 있으며, 이들을 기존의 EDFA와 함께 사용함으로써 전송 대역을 증가시키고 있다. EDFA는 이득 스펙트럼이 파장에 따라 평탄하지 않으므로 전송 대역폭이 한정되는 단점이 있으나 이득 스펙트럼을 개선하기 위해 많은 방안이 연구되고 있다. 기존의 EDF(Erbium-Doped Fiber)의 코어에 어븀과 함께 알루미늄을 첨가하여 EDFA의 평탄한 이득 스펙트럼을 늘리는 방법이 제시되었으나 1530 nm 부근의 peak이 여전히 남아 있어 평탄한 이득 대역폭을 늘리는 데는 한계가 있었다.^[1] 또한 기존의 실리카 광섬유가 아닌 Fluoride 광섬유에 어븀을 첨가하여 EDF를 만드는 방안도 발표된 바 있다.^[2]

증폭기의 이득 스펙트럼을 변화시키는 요인은 채널 수의 변동으로 인한 입력 레벨의 변화, 포설된 광케이블의 손상 등에 의한 중간 삽입 손실의 변화, 그리고 주변 온도의 변화 등 여러 가지가 있다. 채널 수의 변동으로 인한 입력 레벨의 변화나 중간 삽입 손실의 변화 등은 pump LD(Laser Diode)의 전류를 조절하거나 감시 채널을 추가하여 입력 레벨을 맞추는 방법의 AGC(Automatic Gain Control) 기능과 증폭기 1단과 2단 사이에 삽입된 가변 감쇄기를 이용하여 중간 삽입 손실을 조절하는 ALC(Automatic Level Control) 기능으로 이득 스펙트럼의 변형을 보상할 수 있다.^[3,4] 주변 온도가 바뀌면 EDFA의 증폭 매체인 EDF의 흡수 스펙트럼과 방출 스펙트럼이 변하게 되어 EDFA의 이득 스펙트럼에 영향을 미치게 된다. 특히 L-band EDFA의 경우, 동일한 이득을 얻기 위한 증폭기에 들어가는 EDF의 길이가 C-band 증폭기의 경우에 비

해 훨씬 더 길기 때문에 온도 변화에 큰 영향을 받는다. 따라서 L-band EDFA에서 온도 보상은 시스템의 성능 및 신뢰성 측면에서 중요한 기능이다.

지금까지 이러한 온도 변화에 의해 기울어진 이득 스펙트럼을 보상하는 방법으로 EDF를 일정한 온도로 가열하는 방법,^[5] 가변 감쇄기를 이용하는 방법 등이 발표되었다.^[6] 후자의 방법은 L-band 파장을 가지는 4 채널을 운용하여 온도 특성을 측정하였으며, 1570 nm의 감시 채널을 이용하여 AGC 기능을 구현하였다. 그러나 감시 채널을 이용한 AGC 기능은 채널 수가 증가함에 따라 감시 채널이 갖는 최대 입력 세기가 커지므로 비선형 현상을 겪게 되는 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 pump LD의 전류를 조절하는 방법으로 AGC 기능을 구현하였으며, 이러한 AGC 기능 하에 L-band (1570 nm~1605 nm) 40 채널을 운용하여 출력이 22 dBm 이상인 L-band EDFA의 온도에 따른 이득 변동과, 가변 감쇄기를 이용한 온도 보상에 대하여 연구하였다.

II. EDF의 온도 의존성

Host glass가 silica인 EDF의 이득 스펙트럼은 식 (1)에 의해 표현될 수 있다. 여기서 $\sigma_a(\lambda)$ 와 $\sigma_e(\lambda)$ 는 각각 absorption cross section과 emission cross section을 나타내며, \bar{n}_1 과 \bar{n}_2 는 normalized ion population densities를, Γ , N_0 , L 은 각각 confinement factor, Er ion concentration, EDF 길이를 말한다.

$$G_{dB}(\lambda) = \Gamma N_0 L \{ \sigma_e(\lambda) \bar{n}_2 - \sigma_a(\lambda) \bar{n}_1 \} \quad (1)$$

그럼 1과 같이 $\sigma_a(\lambda)$ 와 $\sigma_e(\lambda)$ 는 온도에 따라서 스펙트럼이 바뀐다.^[6] 즉, 온도가 높아짐에 따라 약 1530 nm 근처의 peak이 낮아지고 1560 nm 근처에서 약간 높아지는 현상을 볼 수 있다. 이러한 1560 nm에서의 온도에 따른 absorption cross

[†]E-mail: wklee@etri.re.kr

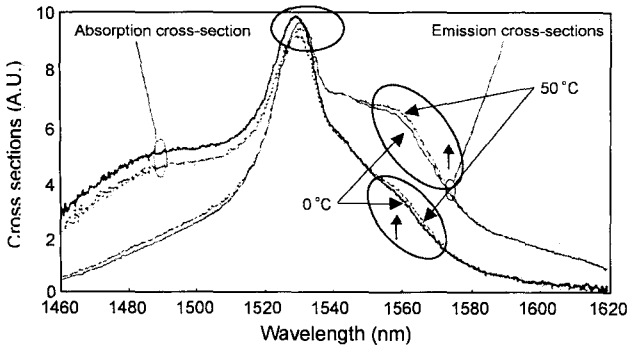


그림 1. 온도(0°C와 65°C)에 따른 EDF(Erbium-Doped Fiber)의 $\sigma_a(\lambda)$ 와 $\sigma_e(\lambda)$ 의 스펙트럼 변화^[5]

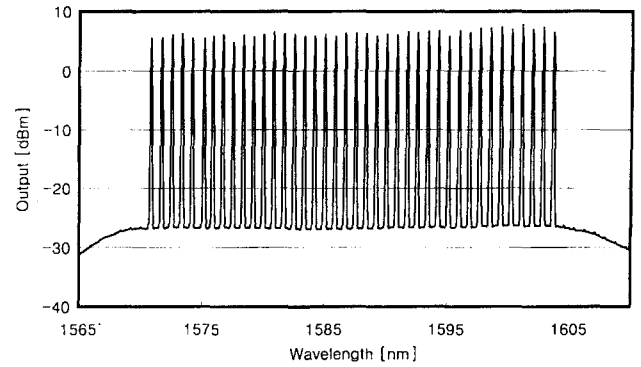


그림 3. AGC 동작 시, 입력이 -2 dBm(채널 당 -18 dBm)일 때의 출력 스펙트럼.

section과 emission cross section의 변화가 L-band EDFA의 이득 특성을 변하게 한다.

III. L-band EDFA의 구조

그림 2에서는 제작된 L-band EDFA의 구조를 보여주고 있다. L-band EDFA는 분산보상 광섬유(DCF: Dispersion Compensating Fiber)를 수용하고 고출력을 갖도록 2단으로 구성되었다. 앞서서부터 이득 블록 1과 이득 평탄화 필터(GFF: Gain Flattening Filter), 가변 감쇄기(VCA: Voltage Controlled Attenuator), DCF, 이득 블록 2로 구성되어 있다. 이득 블록 1과 2는 1480 nm의 LD에 의해 양방향으로 여기 된다. 이득 블록 1의 출력단에 사용된 GFF는 FBG(Fiber Bragg Grating)을 사용하였으며, 33 nm의 대역에서 1 dB 이내의 이득 평탄도를 갖도록 하였다. 이득 블록 1의 최대 출력은 20 dBm이며, 이득 블록 2의 입력이 2 dBm이므로 GFF의 손실 이외에도 VCA와 DCF에 의한 추가 삽입 손실을 최대 16 dB까지 허용한다. 입력 광은 100 GHz 간격의 채널 당 평균 세기 -18 dBm이며 출력 편차 1.5 dB 이내인 L-band 40 채널(1571.2~1604.0 nm)을 사용하였으며, 이 경우의 최대 출력은 22 dBm 이상이다. L-

band EDFA의 AGC 기능은 이득 블록 1과 이득 블록 2에 포함된 PD(Photo Diode)를 통해 입출력을 감시하여 이득을 구한 다음 일정한 이득을 유지하도록 LD의 전류를 조절함으로써 구현된다. 그림 3은 AGC 모드로 동작할 때, -2 dBm 입력에 대한 출력 스펙트럼을 나타낸다. 33 nm의 파장 대역에서 입력 채널의 편차가 반영되어 1 dB 이상의 출력 편차를 보이지만, 이득의 평탄도는 1 dB 이내이다. 그림 3에 나타난 ASE (Amplified Spontaneous Emission)는 33 nm 대역에서 0.6 dB 이내의 편차를 갖는다.

IV. L-band EDFA의 온도 의존성

온도 보상을 하지 않았을 때, 온도에 따른 L-band EDFA의 스펙트럼 특성은 그림 4에 나타나 있다. 온도가 높을수록 단파장의 스펙트럼이 올라가고 장파장의 스펙트럼은 내려감을 볼 수 있다. 그림 1에서와 같이, 온도에 따른 EDF의 absorption cross section과 emission cross section의 스펙트럼 변화는 1560 nm 파장에서 가장 두드러지게 나타나며 장파장으로 갈수록 그 변화는 적다. 또한 1560 nm 파장에서 온도에 따라 σ_a

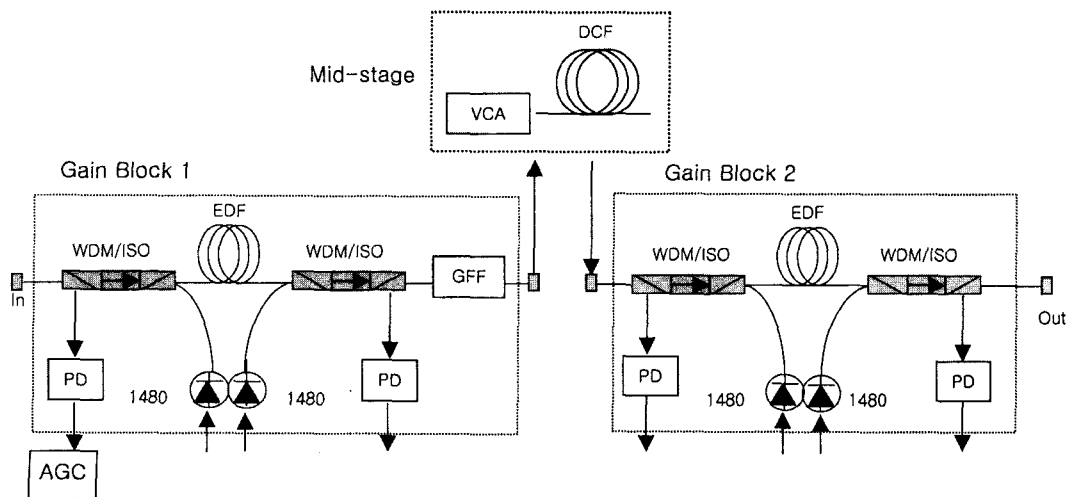


그림 2. L-band EDFA의 구성도. WDM: Wavelength-Division Multiplexer, ISO: Isolator, PD: Photo Diode, gff: Gain Flattening Filter, VCA: Voltage-Controlled Attenuator, DCF: Dispersion Compensating Fiber.

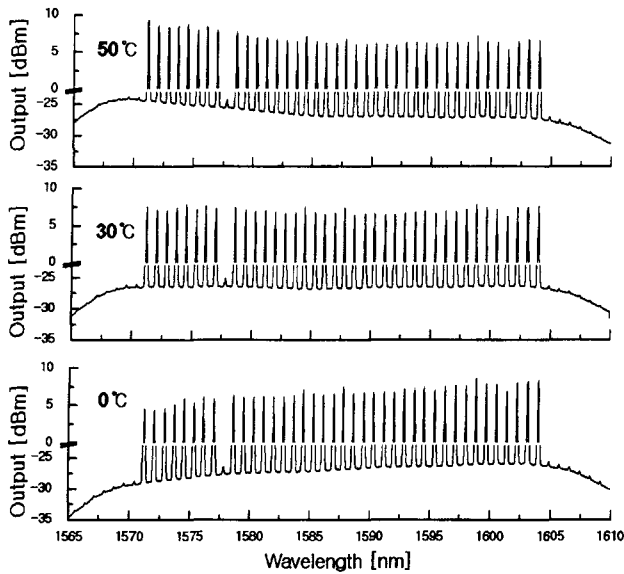


그림 4. 온도 보상하지 않았을 때 0°C, 30°C, 50°C에서 L-band EDFA의 출력 스펙트럼.

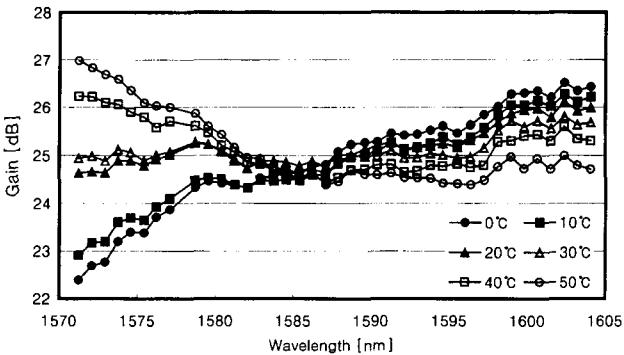


그림 5. 온도에 따른 L-band EDFA의 이득 변화.

(λ)보다 $\sigma_e(\lambda)$ 이 더 많이 변한다. 따라서 식1에서와 같이, 온도가 올라가면 1560 nm에서 $\sigma_a(\lambda)$ 보다 $\sigma_e(\lambda)$ 의 값이 더 많이 커지기 때문에 이득이 커지게 됨을 알 수 있다. 그러나 다른 장파장에서는 $\sigma_a(\lambda)$ 와 $\sigma_e(\lambda)$ 의 변화가 거의 없기 때문에 이득도 변화가 없게 된다. 결국 온도가 올라가면 그림 4와 같이 단파장의 이득 스펙트럼은 올라가고 장파장의 이득 스펙트럼은 내려가는 형태가 된다. 반대로 온도가 내려가면 1560 nm에서 $\sigma_a(\lambda)$ 보다 $\sigma_e(\lambda)$ 의 값이 더 많이 작아지기 때문에 이득이 내려가게 된다. 결국 그림 4와 같이 단파장의 이득 스펙트럼은 내려가고 장파장의 이득 스펙트럼은 올라가게 된다.

그림 5는 온도에 따른 L-band EDFA의 이득 변화를 나타낸 것이다. 상온인 27°C 온도에서의 이득 스펙트럼과 비교했을 때, 0°C일 때는 이득 변화폭이 약 3 dB 정도이며, 50°C일 때는 약 1.6 dB 정도의 이득 변화폭을 나타내었다. 또한 L-band에서도 양 끝, 특히 1570 nm 부근에서의 이득 스펙트럼이 상온일 때와 큰 차이를 보인다.

온도에 따른 이득 평탄도는 그림 6에 나타나 있으며, 상온인 27°C를 기준으로 온도 차이가 많이 날수록 이득 평탄도가 커짐을 볼 수 있다.

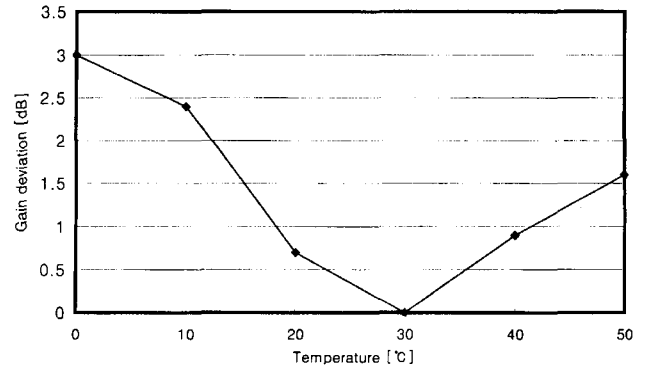


그림 6. 온도 보상하지 않았을 때의 온도에 따른 L-band EDFA의 이득 평탄도의 변화.

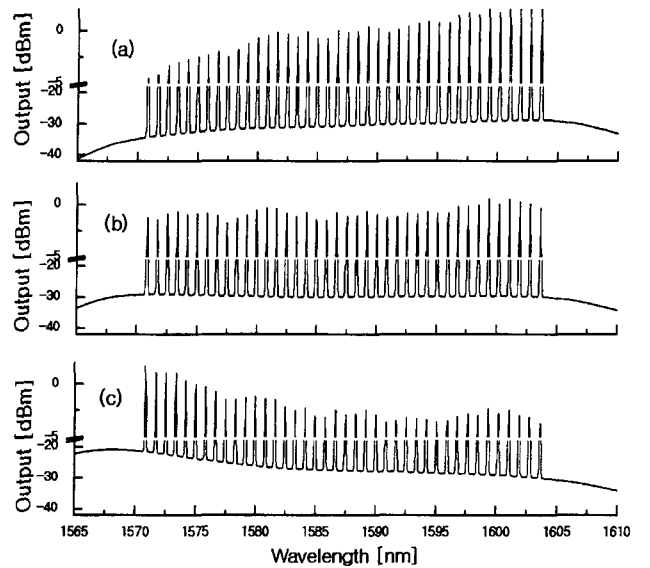


그림 7. 이득 블록1의 입력은 -8 dBm이며, 이득 블록2의 입력이 (a) -4 dBm, (b) -5 dBm, (c) -6 dBm일 때 출력 스펙트럼.

V. L-band EDFA의 온도 보상

온도에 따른 이득 스펙트럼의 기울어짐을 보상하기 위해 EDFA의 1단과 2단 사이에 삽입된 VCA를 이용하였다. L-band EDFA의 이득 스펙트럼은 이득에 따라 달라진다. 여기서 L-band EDFA는 이득이 24 dB로 일정하기 위해 AGC 기능이 작동하는 상태이며, mid-stage의 삽입 손실을 변화시켜 이득을 조절하였다. 그림 7에서 보듯이 포화 이득 영역에서는 이득이 낮을수록 단파장 부근의 스펙트럼이 내려간다. 이는 온도에 따른 이득 스펙트럼과 반대이다. 따라서 온도에 따라 변하는 이득 스펙트럼을 가변 감쇄기를 이용하여 2단의 입력을 조절하여 이득을 변화시킴으로써 기울어진 스펙트럼을 보정할 수 있다. 즉, 온도가 올라가면 이득을 낮춰 단파장 부근의 올라갔던 스펙트럼을 내리고, 온도가 내려가면 이득을 높임으로써 단파장 부근의 내려갔던 이득 스펙트럼을 올릴 수 있다.

그림 8에서는 이러한 방법으로 온도 보상을 했을 경우, 0°C와 50°C의 온도에서 L-band EDFA 출력 스펙트럼을 나타내

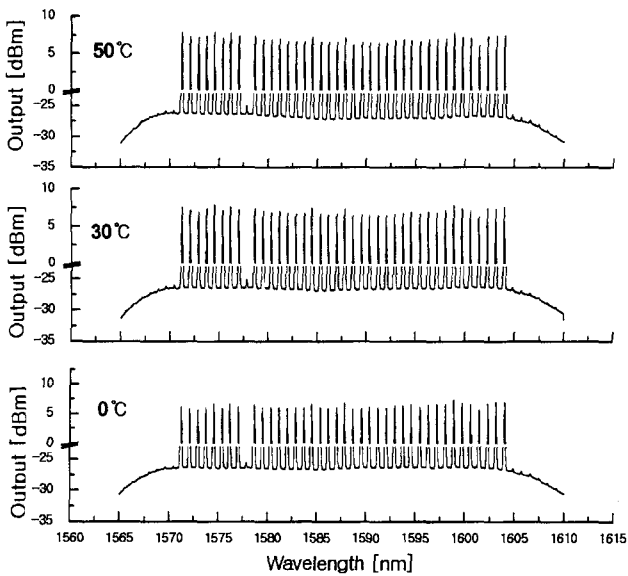


그림 8. 온도 보상 했을 때 0°C, 30°C, 50°C에서 L-band EDFA의 출력 스펙트럼.

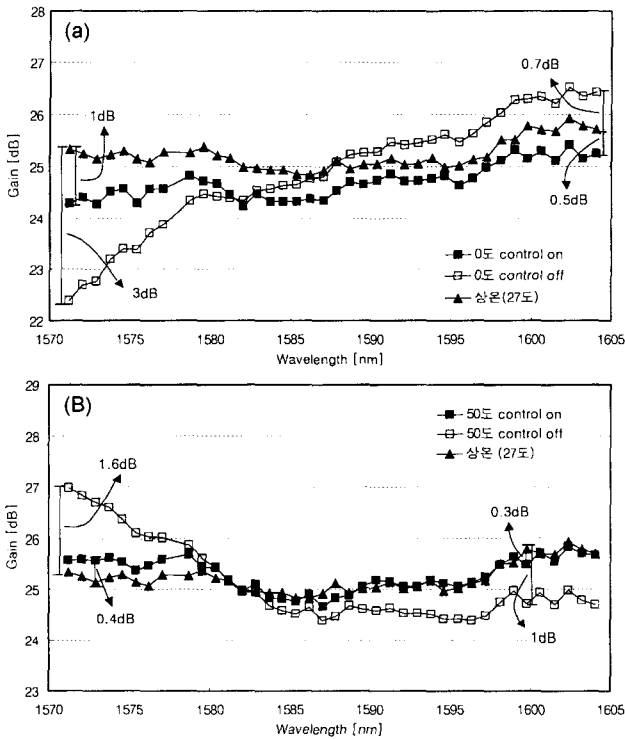


그림 9. (a) 0°C의 온도에서 온도 보상 했을 때와 하지 않았을 때의 파장에 대한 이득 변화, (b) 50°C의 온도에서 온도 보상 했을 때와 하지 않았을 때의 파장에 대한 이득 변화.

었다. 그림 3에서 0°C의 온도에서 단파장 스펙트럼이 아래로 기울던 것이 그림 8에서는 1 dB 이내로 평탄하게 되었으며, 5°C의 온도에서 위로 기울던 단파장 스펙트럼도 1 dB 이내로 평탄하게 되었다. 또한 그림 9(a)에서와 같이 3 dB까지 차이를 보였던 이득 변동은 가변 감쇄기를 이용하여 1 dB 이내로 이득 변동폭이 줄었으며, 그림 9(b)에서 보듯이 50°C의 온

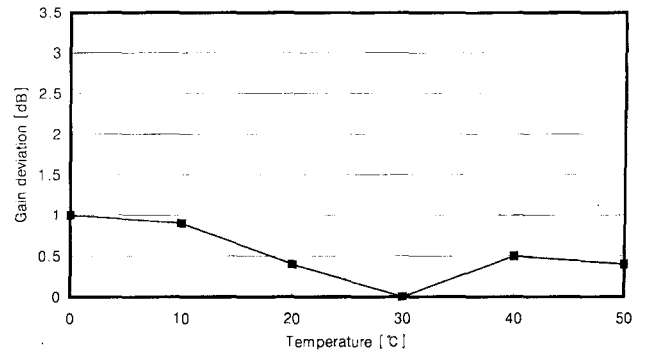


그림 10. 온도 보상 했을 때의 온도에 따른 L-band EDFA의 이득 평탄화의 변화.

도에서는 1.6 dB의 이득 변동폭이 0.4 dB 이내로 줄었다.

이때, 온도에 따라 적절한 가변 감쇄기의 감쇄도는 0°C에서 8.2 dB, 50°C에서 3.1 dB로 가변 감쇄기의 온도별 적용 변동폭은 5.1 dB이다. 또한 온도에 따라 가변 감쇄기를 이용하여 2단의 입력 광세기를 조절하기 때문에 증폭기 입력인 1단의 입력 광세기를 같게 하더라도 광신호대 잡음비(OSNR)는 조금씩 바뀌게 된다. 그러나 0°C에서 50°C까지 광신호대 잡음비(OSNR)의 변화가 약 1 dB미만이었으며 잡음지수(Noise Figure)의 변화도 1 dB 미만임을 확인하였다.

그림 10에서는 그림 6과 비교하여 가변 감쇄기를 이용한 온도 보상으로 온도에 따른 이득 변동 폭이 1 dB 이내로 줄어든 것을 볼 수 있다.

VI. 결 론

L-band EDFA는 온도에 따른 이득의 기울기가 급격히 변화하여 온도가 높을수록 1570 nm 부근의 단파장에서는 이득 스펙트럼이 올라가고 1605 nm 부근의 장파장에서는 내려간다. 이는 2단 구조의 광증폭기에서 AGC 동작 하에 제2단의 이득을 변화시킴으로써 보상할 수 있다. 따라서 두 단의 중간에 가변 감쇄기를 삽입하여 제2단의 입력되는 광의 세기를 바꿔서 이득을 조절함으로써 온도를 보상한 결과 0~50°C의 온도 변화에 따라 3 dB 이상 차이가 나던 이득 변동 폭이 1 dB 이내로 감소하였다.

참고문헌

- [1] S. Yoshida, S. Kuwano, and K. Iwashita, "Gain-flattened EDFA with high Al concentration for multistage repeated WDM transmission," *Electro. Lett.*, vol. 31, pp. 1765-1767, 1995.
- [2] B. Clesca, D. Ronarc'h, D. Bayart, Y. Sorel, L. Hamon, M. Guibert, J. L. Beylat, J. F. Kerdiles, and M. Semenkoff, "Gain flatness comparison between erbium-doped fluoride and silica fiber amplifiers with wavelength-multiplexed signals," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 6, pp. 509-512, 1994.
- [3] Hongxing Dai, J.-Y. Pan, and Chinlon Lin, "All-optical gain control of in-line erbium-doped fiber amplifiers for hybrid

- analog/digital WDM systems," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 9(6), pp. 737-739, 1997.
- [4] Kuniaki Motoshima, *et al.*, "A channel-number insensitive erbium-doped fiber amplifier with automatic gain and power regulation function," *JLT.*, vol. 19, no. 11, 2001
- [5] M. Kakui, *et al.*, "Dynamic-gain-tilt-free long-wavelength band Erbium doped fiber amplifiers utilizing temperature dependent characteristics of gain spectrum," *OFC*, vol. 2, pp. 68, 2000.
- [6] J. Nakagawa, *et al.*, "1580-nm band erbium-doped fiber amplifier employing novel temperature compensation technique," *OFC*, vol. 2, pp. 108-110, 2000.

A compensation method for a temperature-dependent gain tilt in L-band EDFA using a voltage-controlled attenuator

Wonkyoung Lee[†], Hee Sang Chung, and Moo-Jung Chu

Optical Communication Department, Electronics and Telecommunications Research Institute, Daejeon 305-600, KOREA

[†]*E-mail: wklee@etri.re.kr*

(Received November 12, 2002, Revised manuscript December 26, 2002)

This paper presents a compensation method for a temperature-dependent gain tilt in L-band erbium-doped fiber amplifier using a voltage-controlled attenuator. The gain tilts in the L-band of 1570-1605 nm due to a temperature change have negative slopes, whereas they have positive slopes for the increasing optical input powers in a saturation region. The proposed method utilizes these opposite gain variations to compensate for the gain tilt over a wide range of temperature. While applying forty channels with a channel spacing of 100 GHz in the L-band and changing the ambient temperature from 0 to 50°C, the compensation method maintained the gain deviation within 1 dB.

Classification codes : FO.020, OC.010, LO.010.