

광증폭기의 이득과 이득 평탄화를 동시에 자동 제어하는 완전 광학적 방법

최보훈[†]

동아대학교 신소재물리학과
☎ 604-714 부산 사하구 하단2동 동아대학교 자연과학대학

이상수

한국전자통신연구원(ETRI), 광인터넷연구부
☎ 305-700 대전 유성구 가정동

(2009년 8월 27일 받음, 2009년 9월 25일 수정본 받음, 2009년 9월 29일 게재 확정)

직렬 연결된 두 개의 광학적인 회전루프와 고정형 이득 평탄화 필터가 적용된 이단 증폭기 구조가 제안되고 구현되었다. 이 증폭기에 입력신호 채널수를 한 개에서 40개 사이를 역동적으로 변화시키므로 입력신호 세기가 최고 -1 dBm 까지의 변동할 때, 제안된 증폭기는 완전히 광학적인 방법으로 이득과 이득평탄 정도를 1530 nm~1560 nm 파장대역에서 일정하게 유지시켰다. 이 특성을 잡음지수의 큰 희생 없이 고 이득을 유지하는 가운데 이루어 졌다. 각 입력채널에서 이득 특성의 시간에 따른 순간적인 변화와 이 변화의 파장 의존성도 조사되었다. 결과적으로 제안된 구조의 증폭기가 전송선에 적용될 때, 통신량의 급격한 변화에 따라 광증폭기로 입력되는 광신호의 세기가 급격히 변화하더라도 광증폭기의 증폭 특성은 일정하게 유지될 것이다.

Automatic Gain Flattening Control and Automatic Gain Control Using an All Optical Method in an Optical Amplifier

Bo-Hun Choi[†]

Department of Materials Physics, Dong-A University, Saha-gu, Busan 604-714, Korea

[†]E-mail: adamchoi@dau.ac.kr

Sang Soo Lee

Optical Internet Research Department, ETRI, P.O.Box 106, Yusong, Daejeon 305-350, Korea

(Received August 27, 2009; Revised manuscript September 25, 2009; Accepted September 29, 2009)

Our amplifier using an all optical method and a fixed GFF achieved automatic gain flatness throughout the C-band without any NF degradation, and simultaneously achieved a constant 25 dB gain, while input signals were varied between one channel and forty WDM channels. When thirty nine channels were added and dropped, the transient gain variation of the survival channel was not greater than the steady-state gain variation, and its wavelength dependency was negligible.

Keywords: Gain control, Erbium-doped fiber, Optical fiber communications, Wavelength-division multiplexing

OCIS codes: (060.0060) Fiber optics and optical communications; (140.0140) Lasers and laser optics; (250.0250) Optoelectronics

I. 서 론

파장분할다중화 (wavelength-division-multiplexing; WDM) 광 전송 기술을 이용한 통신에서, 장거리 전송망과 달리 도시망 (Metropolitan networks)에서는 통신량의 변화로 광신호 채널 수의 변화가 수시로 발생한다. 이것은 WDM신호들의 삽입과 탈락, 광신호 경로 재설정, 장비의 증설이나 회선보호 스

위칭과 같은 망 운영(network management) 요인들 때문에 발생하는 것이다.^[1,2] 통신망에서 핵심 부품인 에르븀 첨가 광증폭기(Erbium-doped fiber amplifier; EDFA)는 입력 신호의 급격한 변화에 크게 영향을 받기 때문에, 이 증폭기의 이득을 효율적으로 제어하는 방법이 연구되어 왔다. 이득을 조정하는 방법으로 출력세기의 변화를 감지하여 광증폭기의 펌프 세기가 변하도록 피드백 시켜주는 전자적인 방식^[3,4]이 상업적으로 많이 이용되고 있지만 최근 광학적인 방법을 채택한 시도들이 제안되고 있다. 이를 위해 완전 광학적인 이

[†]E-mail: adamchoi@dau.ac.kr

득 조정(all-optical gain control; AOGC) 방법이 제안되었는데 이는 브래그 격자 공진기^[5-7] 나 피드백 루프^[8-10]을 이용하여 구현되었다. 이 방법은 빠른 이득회복속도와 외부 조정을 필요로 하지 않는다는 점 때문에 매력적이다. 이 방식에서, 파장 홀번닝(spectral hole burning) 효과에 의한 순간적인 이득 변화가 단점으로 작용하는데^[9,10], 이를 극복하기 위해 이중 병렬 공진기 구조나^[11], 단일 공진기에 이중 레이징 신호 발생 구조^[12], 이득 포화기 사용^[13] 등의 방법들이 제안되었다. AOGC 방식을 사용할 때 피할수 없는 본질적인 문제점 중의 하나는 이득을 안정시키기 위해 사용되는 레이징 광이 신호 증폭을 위해 여기된 Er³⁺ 이온을 너무 많이 사용하여 조정 가능한 입력 신호의 세기 영역을 낮게 제한시킨다는 점이다. 이는 AOGC 증폭기의 입력 신호 세기의 다이내믹 영역을 좁히는 결과는 낡는다.^{[12],[14],[15]} 만일 AOGC 증폭기가 입력신호 세기의 변화가 큰 WDM 망에 적용된다면, 잡음지수를 낮게 유지시키면서 다이내믹 영역의 확대가 필수적이다.

낮은 입력 세기 영역을 해결하기 위해 본 논문에서는 직렬 연결된 두 개의 광학적인 회전루프와 고정형 이득 평탄화 필터(gain flattening filter; GFF)가 적용된 이단 증폭기 구조가 제안되고 구현되었다. 1530.33 nm (첫번째 채널)과 1561.42 nm (마지막 채널) 사이의 전 C 파장대역에 걸쳐 있는 40 채널들을 이용하여 입력 채널수의 큰 변화나 입력 세기의 큰 변화 하에서 이 증폭기의 성능이 조사되었다. 이 성능 변화에는 단순히 정적인 이득 변화뿐만 아니라 순간적인 이득 변화(transient effect)도 함께 분석되었다. 또한 레이징 광의 파장과 신호 채널의 파장 사이의 연관성을 조사하기 위해 채널별로 시간에 따른 이득 변화도 함께 측정되었다.

II. 실험과 결과

제안된 증폭기의 구조가 그림 1에 주어졌다. 이 증폭기는 에르븀 첨가 광섬유 증폭기(Erbium-doped fiber amplifier; EDFA)를 이용한 이단(two-staged) 증폭 구조를 가지며 이 이단 구조 사이에 고정형 이득 평탄화 필터(gain flattening filter; GFF)와, 광감쇄기(optical attenuator; ATT), 그리고 분상보상 광섬유(DCF)가 위치한다. 이 때 DCF는 선택적으로

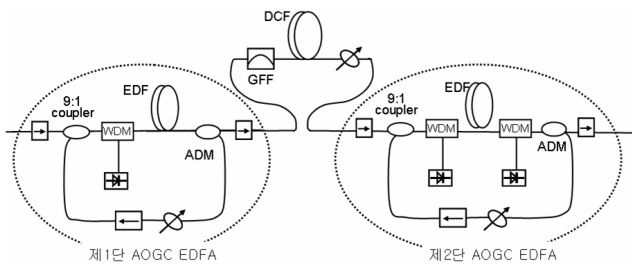


FIG. 1. The schematic of the proposed amplifier using two AOGC EDFAs and a fixed GFF. WDM: a WDM coupler, ADM: add/drop multiplexer, EDF: Erbium-doped fiber.

사용될 수 있다. 이 구조는 고출력 특성을 위해 채택되었다. 이단 구조에서 각 단의 EDFA는 광학적 자동 이득조정(all-optical gain control; AOGC) 기능을 위해 귀환 루프를 포함하고 있다. 각 단에 있는 귀환 루프의 구조는 같은데, 에르븀 첨가 광섬유(erbium-doped fiber; EDF)에서 발생하는 증폭자발방출(amplified spontaneous emission; ASE) 중에서 WSC(wavelength selection coupler)필터에 의해 1528 nm의 파장이 선택되고, 이 빛의 세기 중에서 10% 가 10 dB 광세기 분할기에 의해 다시 EDF속으로 재입력되도록 구성되어 있다. WSC 필터는 100GHz 주파수 간격의 WDM 신호들을 분리하거나 결합시키기 위해 사용되는 ADM (Add/Drop multiplexer) 필터를 이용하였고 이 필터의 3 dB 투과 선포는 0.3 dB 이하다. 광이솔레이터(isolator; ISO)가 귀환 루프 속에서 선택되어 진행되는 광의 진행방향을 한쪽 방향으로만 고정시켜주어서 이 광이 루프 속에 있는 EDFA의 이득에 의해 레이징 광이 된다. 이 레이징 광이 정보를 실은 신호 광에 대한 EDFA의 이득을 고정시켜서 AOGC 기능이 작동하게 된다. 신호에 대한 고정되는 EDFA 이득 값은 귀환 루프 속의 ATT를 조정함으로써 변화를 줄 수 있다. EDF의 길이는 첫 번째 루프에서는 15 m, 두 번째 루프에서는 20m가 사용되었다. 두 EDF의 광학적 특성은 같은데, 차단파장(cutoff wavelength)은 1330 nm이고, 조리개수(numerical aperture)는 0.22, 그리고 흡수 계수(absorption coefficient)는 1530 nm 흡수 정점에서 7.6 dB/m이다. 첫 번째 EDFA는 순방향으로 160mW 세기를 사용하는 980 nm레이저다이오드(laserdiode; LD)에 의해 펌핑되었고 두 번째 EDFA는 양방향으로 두 개의 1480 nm LD들로 펌핑되며 펌핑 세기는 360mW 이다. 이 증폭기 구조는 고정형 GFF의 최소한의 도움으로 C 대역 전 파장영역에 걸쳐 이득을 평탄화시키면서 동시에 고 이득을 실현시키기 위해 적절히 선택되었다. 덧붙여, 이득 고정을 위한 레이저 광이 각 EDFA를 벗어나게 되면 WSC 필터가 이 광에 15 dB 감쇄를 가하게 되어 레이저 광이 각 EDFA를 벗어나지 못하도록 하여 EDFA 다음에 위치한 광전송 장치들에 대한 영향을 최소화하였다.

먼저, 제1단 AOGC EDFA의 이득과 잡음지수가 측정되어 그림 2에 주어졌다. 그림에서 마름모 모양은 이득을 사각형 모양의 측정값은 잡음지수를 의미한다. 입력신호의 세기

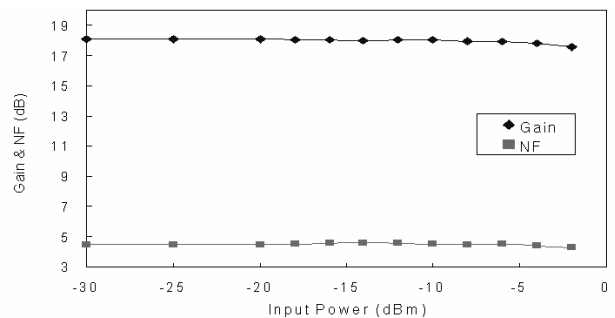


FIG. 2. Gain and NF spectra of the first amplifier in the proposed amplifier for 40 WDM channels.

를 변화시키면서 -30 dBm의 소신호 영역부터 이득포화 영역인 -2 dBm까지의 측정 결과가 보여지는데, -4 dBm의 입력 신호까지 일정한 이득인 18 dB가 측정되었고 이때 최대 이득 편차는 0.3 dB이며 최대 잡음지수(noise figure; NF)는 4.5 dB 였다. 두 번째 EDFA는 입력신호가 -2 dBm까지 고정된 이득 20 dB를 보였고 이때 최대 이득 편차는 0.6 dB이며 최대 잡음지수(noise figure; NF)는 5.5 dB 였다.

WDM 광신호들의 채널수가 변화하는 상황을 고려하기 위해, 채널의 수가 하나로부터 40개까지 변화하는데 이 때 사용된 40 WDM 채널로 구성된 입력 신호의 스펙트럼이 그림 3에 주어진다. 이 40개의 채널들은 1530.334 nm부터 1561.419 nm 사이에서 100GHz 채널간격의 파장 값을 가진다. 이 때 각 채널의 광세기는 -20 dBm 인데 이 값은 도시망 네트워크에서 실제 사용되는 값을 고려하여 선택되었다. 입력 채널의 수가 이 범위 내에서 바뀔 때 첫 번째 EDFA로 입력되는 입력 세기는 -20 dBm에서 -4 dBm 사이에 해당되고, 제1단 AOGC EDFA의 출력 세기는 ATT를 사용하여 15 dB 까지 감쇄된다. 이 감쇄 크기는 분산보상 광섬유(dispersion compensation fiber)나 광신호 삽입/탈락 장치 (add/drop module)와 같은 부품들이 증폭기 내에 포함될 필요가 있을 때 사용될 수 있다. 제2단 AOGC EDFA로 입력되는 광세기의 범위는 -17 dBm와 -1 dBm 사이이다. 총 40개의 WDM 채널 모두가 적용되었을 때, 제안된 증폭기의 이득과 잡음지수의 측정값이 그림 4에 주어지 있다. 측정 파장 영역 내에서 이득 결과

는 최고 25 dB (1531.12 nm)와 최저 24.1 dB (1535.82 nm) 사이에서 파장에 따라 1 dB 편차 내에서 평균 24.6 dB의 평탄화된 이득을 보였다. 최대 잡음지수는 1532.68 nm 에서 7.1 dB, 최저 잡음지수는 1538.98 nm 에서 4.9 dB로 잡음지수의 평균은 5.8 dB였다. 이 고이득과 이득 평탄화는 증폭기와 고정형 GFF를 사용한 적절한 이단 증폭기 구조에 의해 얻어진 것이다. 그림 5는 이때 사용된 고정형 GFF의 파장에 따른 손실 특성을 보여주는 이를 음향광학필터(acoustic optical filter)를 사용하여 구현하였다.

자동 이득조정 기능을 확인하기 위해 입력 채널 수를 변화시키는 실험이 수행되었다. 그림 6은 그 결과를 보여주는데, 아래쪽 그래프로부터 위쪽으로 올라가면서 WDM 채널의 수는 각각 1, 2, 5, 10, 30, 그리고 40 개 사용되었다. 채널 수가 한 개로부터 40 개로 바뀔 때에 최대 0.9 dB 이득 변화가 발생했고 이득 파장 평탄화는 1 dB 편차를 벗어나지 않았다. 따라서 입력 채널수가 어떻게 변하는지에 상관없이 각 채널 들은 똑같은 5 dBm 출력 세기를 가졌다. 각각의 그래프에 있는 스펙트럼에서, 모두 같은 ASE 모양과 세기는 증폭기의 이득 조건이 변화하지 않는다는 것을 의미한다. 각 스펙트럼에서, 제일 왼쪽의 피크로 나타나는 광은 신호 채널이 아니라 광학적으로 자동 이득조정 기능을 위한 레이저 광으로 여기에 보여지는 세기는 WSC 필터에 의해 그 세기가 감소되어진 결과이다. 이 결과는 -4 dBm 입력 광세기까지의 넓은 다이내믹 영역 내에서 이득과 이득 평탄화가 동시에 자동적으로 조정되었다는 것을 보여준다. 이 넓은 다이내믹 영역은 EDFA 이단 증폭기구조와 두 개의 독립된 AOGC 루프가 결합되어서 이루어졌다. 더욱이, 측정된 광스펙트럼들을 통해 입력 채널 수의 변화에도 불구하고 각 채널에서 광 신호대잡음비(optical signal-to-noise-ratio; OSNR) 값의 악화가 전혀 없음을 알 수 있다. 이를 보다 정확히 뒷받침하기 위해 여러 가지 채널 수의 변화 가운데서도 계속 살아있는 채널 20 (1542.32 nm)의 이득과 잡음지수 값의 변화를 측정한 결과가 그림 7에 나타나 있다. 이득이 채널 수의 변화와 함께 최대 편차로 0.8 dB를 보였다. 잡음지수도 편차를 보이는데 40개

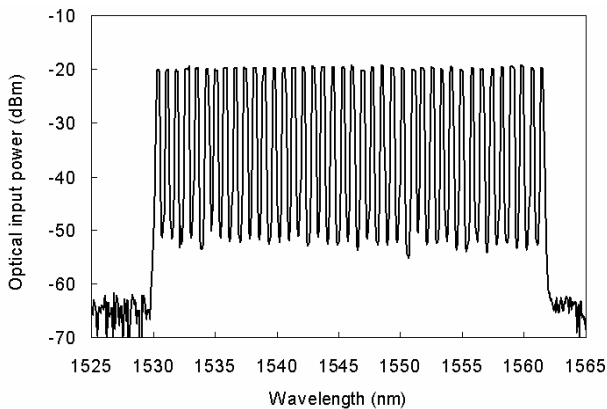


FIG. 3. Optical spectrum of input with 40 WDM channels.

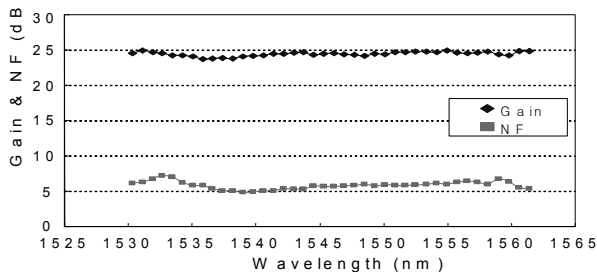


FIG. 4. Gain and NF spectra of the proposed amplifier for 40 WDM channels.

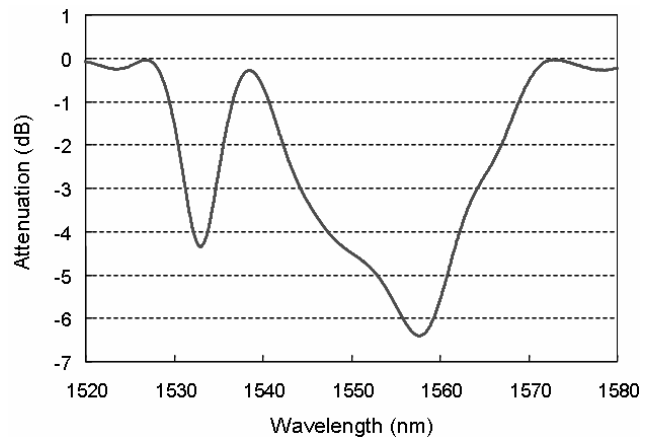


FIG. 5. Insertion loss spectrum of a fixed GFF.

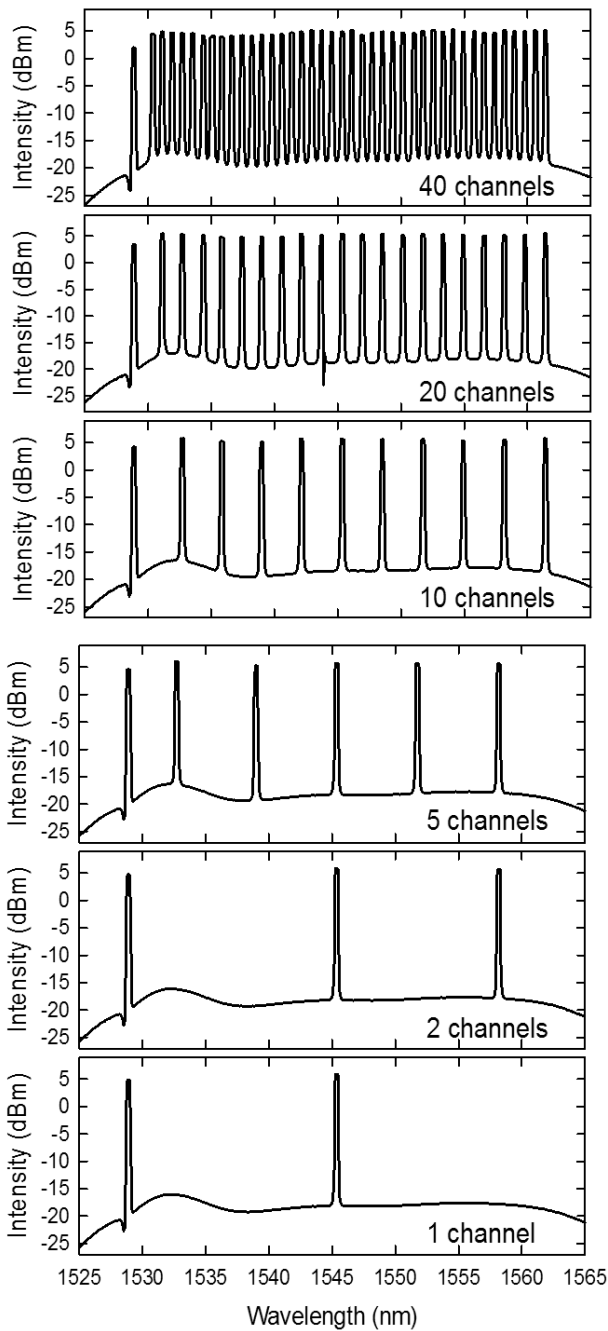


FIG. 6. Optical output spectra when the input signals are 1, 2, 5, 10, 30, and 40 channels from the bottom graph to the top graph.

채널일 때 최고 5.2 dB, 10개 채널 일 때 최저 4.7 dB로 이 편차는 채널 수에 따라 증가하거나 감소하는 경향이 없으므로 측정오차의 영향이 큰 것으로 생각된다. 이 결과들은 채널 수가 한 개일 때와 사십 개일 때 사이에 이득과 잡음지수에 있어서 의미 있는 차이가 없음을 확인해 주는 것이다.

그림 6과 7의 결과는 입력신호의 채널 수가 변한 뒤 시간 간격을 두고 측정한 것이므로 이득의 정적 (steady state) 변화에 해당된다. 증폭기 특성에서 정적 변화와 함께 중요한 것은 특성들의 순간적인 변화효과 (transient effect)다. 이 순

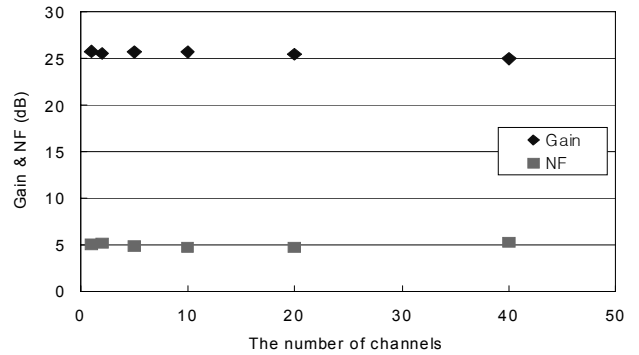


FIG. 7. Gain and NF variations according to the number of input channels.

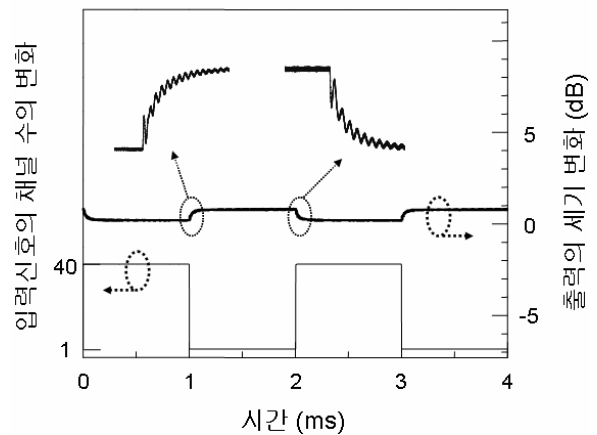


FIG. 8. The transient effect measurement of one survival channel while all other 39 channels were dropped except the measured channel.

간적인 변화효과가 정적변화와 비교하여 크다면 증폭기의 특성은 시간에 따라 변하게 될 것이다. 이를 확인하게 위해서, 단 한 개의 측정을 위한 채널만 남겨 두고 나머지 모두 39개의 채널들을 동시에 삽입 혹은 탈락되는 순간에 신호 채널의 시간에 따른 변화 효과의 측정 결과를 측정하였고 그 결과가 그림 8에 주어진다. 모두 39개의 채널들을 삽입 혹은 탈락되는 이유는 가능한 변화 중에서 가장 심한 경우를 고려한 것이다. 그림에서 수평 축은 시간의 흐름이고 수직축에서 왼쪽은 입력채널의 수를 오른쪽은 상대적인 광세기의 변화다. 제일 아래쪽 그래프는 입력신호의 수가 한 개에서 40개 사이를 변화하는 것을 보여주며 39개 채널들의 삽입과 탈락이 일어나는 주기는 2 ms임을 알 수 있다. 중간 그래프는 계속 살아 있는 채널인 채널 20의 출력세기의 변화를 보여준다. 이 출력세기 변화 중에 39개 채널들이 동시에 탈락한 순간의 이득 변화가 상단 좌측에 확대되어 보이고 39개 채널들이 동시에 삽입된 순간의 이득 변화가 상단 우측에 확대되어 보여진다. 이 그림들에서 비록 약간의 신호의 세기의 흔들림이 있지만 그 크기는 순간적인 변화 효과가 안정되어 나타나는 이득의 정적 변화 상태의 크기를 벗어나지 않는 것을 알 수 있다.

III. 결 론

귀환 루프를 통해 광학적 자동 이득조정(all-optical gain control; AOGC) 기능을 가지는 에르븀 첨가 광섬유 증폭기(Erbium-doped fiber amplifier; EDFA)들이 직렬로 이단(two-staged) 증폭 구조를 가지며 이 이단 구조 사이에 고정형 이득 평탄화 필터(gain flattening filter; GFF)와, 광감쇄기(optical attenuator; ATT), 그리고 분상보상 광섬유(DCF)가 장착된 증폭기가 제안되고 구현되었다. 입력 신호의 채널 수가 1개에서 40개 사이에서 변화할 때, 제안된 증폭기는 1530.334 nm와 1561.419 nm (31 nm) 사이의 전 C 파장대역에 걸쳐 최대 0.9 dB의 편차 내에서 25 dB의 일정한 이득을 가졌다. 이 때 다이내믹 입력 세기 영역은 -1 dBm까지이며, 이 특성에서 최대 잡음지수는 7.1 dB 였다. 40개의 신호 채널 중 동시에 39 채널들이 삽입이나 탈락될 때 생존해있는 신호 채널의 시간에 따른 이득 변화 효과(transient effect)는 정적 이득 변화(steady-state gain variation) 보다 크지 않았다. 또한 어떠한 증폭기 특성의 변화도 유발하지 않으면서 8 dB 손실의 분상보상광섬유(DCF)가 제안된 증폭기의 두 단 사이에 삽입되어 사용될수 있음을 보였다. 제안된 구조는 AOGC 기능을 가지면서도 C신호 대역 내에서 평탄이득과 동시에 고이득의 출력 특성을 보여주었다.

감사의 글

본 논문은 동아대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

1. D. H. Richards, J. L. Jackel, and M. A. Ali, "Multichannel EDFA chain control: a comparison of two all-optical approaches," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **10**, 156-158 (1998).
2. M. Karasek, A. Bononi, L. A. Rusch, and M. Menif, "Effectiveness of gain control in EDFAs against traffic with different levels of bursty behaviour," *IEE Proc. Optoelectron.* **147**, 355-362 (2000).
3. J. H. Jang, J. H. Jung, W. J. Lee, W. W. Yun, and K. K. Lee, "Implementation of automatic gain controlled bidirectional EDFA in WDM networks," in *Proc. CLEO/Pacific Rim* (Seoul, Korea, Aug. 1999), vol. 3, pp. 650-651.
4. K. Motoshima, N. Suzuki, K. Shimizu, K. Kasahara, T. Kitayama, and T. Yasui, "A channel-number insensitive

erbium-doped fiber amplifier with automatic gain and power regulation function," *J. Lightwave Technol.* **19**, 1759-1767 (2001).

5. J. Massicott, C. Lebre, R. Wyatt, R. Kashyap, D. Williams, and A. Yu, "Low noise, all-optical gain controlled Er³⁺-doped fibre amplifier using asymmetric control laser cavity design," *Electron. Lett.* **32**, 816-817 (1996).
6. A. V. Tran, C.-J. Chae, and R. S. Tucker, "A bidirectional optical add-drop multiplexer with gain using multipoint circulators, fiber Bragg gratings, and a single unidirectional optical amplifier," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **15**, 975-977 (2003).
7. K. Ennser, G. D. Valle, M. Ibsen, J. Shmulovich, and S. Taccheo, "Erbium-doped waveguide amplifier for reconfigurable WDM metro networks," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17**, 1468-1470 (2005).
8. A. Bononi and L. Barbieri "Design of gain-clamped doped-fiber amplifiers for optimal dynamic performance," *J. Lightwave Technol.* **17**, 1229-1240 (1999).
9. G. Luo, J.L. Zyskind, J. A. Nagel, and M. A. Ali, "Experimental and theoretical analysis of relaxation-oscillations and spectral hole burning effects in all-optical gain-clamped EDFA's for WDM networks," *J. Lightwave Technol.* **16**, 527-533 (1998).
10. A. R. Bahrapour and M. Mahjoei, "Theoretical analysis of spectral hole burning and relaxation oscillation in all-optical gain stabilized multichannel erbium-doped fiber amplifier (EDFA)," *J. Lightwave Technol.* **19**, 1130-1139 (2001).
11. Y. Liu and M. F. Krol, "Transient gain control in EDFA's by dual-cavity optical automatic gain control," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11**, 1381-1383 (1999).
12. C.-L. Zhao, H.-Y. Tam, B.-O. Guan, X. Dong, P. K. A. Wai, and X. Dong, "Optical automatic gain control of EDFA using two oscillating lasers in a single feedback loop," *Opt. Comm.* **225**, 157-162 (2003).
13. C. Wang and G. J. Cowle, "Optical gain control of erbium-doped fiber amplifiers with a saturable absorber," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **12**, 483-485 (2000).
14. B.-H. Choi, K.-J. Hong, C.-B. Kim, and Y.-H. Won, "An all-optical gain-controlled amplifier for the bidirectional transmission," *ETRI Journal* **28**, 1-8 (2006).
15. J. T. Ahn and K. H. Kim, "All-optical gain-clamped erbium-doped fiber amplifier with improved noise figure and freedom from relaxation oscillation," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16**, 84-86 (2004).