

반도체광증폭기로 전송거리 확장된 2.5 Gb/s TDM-PON에서 버스트 효과에 의한 신호왜곡 분석

최보훈^{1†} · 이상수²

¹동아대학교 신소재물리학과
☎ 604-714 부산 사하구 하단2동

²한국전자통신연구원(ETRI) 광인터넷연구부
☎ 305-700 대전 유성구 가정동

(2011년 12월 5일 받음, 2012년 1월 26일 수정본 받음, 2012년 1월 30일 게재 확정)

256개의 ONU를 수용하며 50 km 전송거리를 갖는 차세대 시분할 수동광망(TDM-PON) 링크에 링크 확장기로 반도체 광증폭기가 적용되었다. 이 광증폭기의 이득은 25dB 였고 입력신호 변화에 따른 이득 자동조정장치는 사용되지 않았다. 상향 링크의 전체 광세기 범위는 58 dB 였고, 광증폭기로의 입력신호가 -30 dBm인 조건에서 링크의 10^{-9} BER을 위한 수신감도는 -25 dBm 였다. 그 입력세기가 -10 dBm인 경우 버스트 신호에 의한 증폭기의 이득 과도응답에 의한 초과펄스왜곡은 45% 였고 이로 인한 신호성능의 악화는 10^{-12} BER 에서 1.55 dB의 페널티를 발생시켰다. 그러나 -15 dBm 이하의 입력조건에서는 페널티는 무시할 수준으로 급격히 낮아져서, 링크의 다이내믹 범위가 최소한 -15 dBm 까지는 보장되었다. 이 같이 측정된 입력신호의 다이내믹 범위는 50 km이상 장거리 그리고 수백개 이상의 다수가입자를 지원하는 차세대 수동광망에서 링크 확장기로 광증폭기가 사용되더라도 광증폭기 이득 자동조정장치를 사용하는 것이 필수적이지 않음을 의미한다.

The Burst Effect Analysis of 2.5 Gb/s TDM-PON Systems Using a SOA Link Extender

Bo-Hun Choi^{1†} and Sang Soo Lee²

¹Department of Materials Physics, Dong-A University, Saha-gu, Busan 604-714, Korea

²Optical Internet Research Department, ETRI, P.O. Box 106, Yusong-gu, Taejeon 305-700, Korea

(Received December 5, 2011; Revised manuscript January 26, 2012; Accepted January 30, 2012)

A bidirectional TDM-PON link to support 2.5 Gb/s upstream signals of 256 ONUs was considered for an extended transmission distance of 50 km. The power budget of the link was 58 dB for the upstream signal and a SOA was applied as a link extender which had a 25 dB gain. Receiver sensitivity of the upstream signal was -25 dBm for -30 dBm input power to the SOA. When the input power was -10 dBm, pulse overshooting caused by gain transient of the SOA was maximum at 45% and the signal performance degradation gave a power penalty of 1.55 dB for 10^{-12} BER. However the penalties diminished rapidly and became negligible as the input power went below -15 dBm. So this input power dynamic range of up to -15 dBm means that it is not positively necessary to use gain control methods for the next generation TDM-PON systems.

Keywords: Passive optical network, Semiconductor amplifier, Erbium-doped fiber amplifier, Optical fiber communications

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

I. 서 론

기가비트 광가입자망은 최종 소비자에게 제공하고 있는 통신 신호의 대역폭을 급속히 확대시키고 있다. 이 같은 능력

이 광섬유 한 선당 많은 가입자를 수용하는 경제성과 결합하여 이 망들은 미래 FTTx(fiber-to-the x) 망에서 주도적인 역할을 할 것이 분명하다^[1-3]. 이 망에서는 현재 가입자들이 상향 신호의 대역폭을 시분할로 공유하는 시분할(time division

[†]E-mail: adamchoi@dau.ac.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

multiplexing) 방식이 주도적으로 사용되고 있는데, 신호 공유로 분할되는 비율은 크게 증가해 128 채널을 넘어서고 있으며 전송거리도 현재 많이 사용되는 20 km를 넘어 50 km 이상으로 크게 확대되고 있다^[4]. 이러한 가입자수 증가와 전송거리의 확대라는 요구사항들은 보다 큰 링크 광세기 변화폭을 필요로 하고, 따라서 기존의 수동광망(optical passive network; PON)에 링크 확장기(link extender)인 광증폭기의 사용이 도입되고 있다. 광증폭기가 사용된 이러한 특징을 갖는 새로운 망의 또 다른 중요한 장점은 광가입자망과 광역망인 도시망을 하나의 전광(all-optic) 통합망으로 결합시킴으로써 망 구축의 경제성을 크게 개선하고 전체 망에 사용되는 구성요소들도 크게 단순화시킨다는 것이다^[2].

이런 목적을 위한 광증폭기로는 반도체 광증폭기(semiconductor optical amplifiers; SOA)^[3], 프라세오디뮴 첨가 광섬유 증폭기(Praseodymium-doped fiber amplifiers)^[5], 어븀 첨가된 광섬유 증폭기(Erbium-doped fiber amplifiers; EDFA)^[6] 등이 제안되었다. 이 같은 차세대 PON의 사용에 떠오르는 연구과제 중의 하나는 상향 광신호 세기의 버스트 특성과 관련이 있다. 즉 가입자와 OLT(optical line terminal) 사이의 거리 차이에 따른 광손실 차이, 각 ONU들의 출력 세기 차이 등에 의해 광증폭기로 입력되는 광신호의 세기가 짧은 시간 내에 크게 변하게 되고, 따라서 광증폭기는 이득 과도응답(gain transient) 효과를 나타내게 된다^[3]. 이 같이 신호 왜곡에 영향을 주게 되는 이득 과도응답 효과는 광증폭기의 종류에 따라 차이가 있다. 따라서 사용되는 광증폭기에 따라서 적절한 이득 조정 기술이 적용된 실험들이 발표되었다. 예로 안정화 전자회로를 EDFA^[2]나 SOA^[7]에 적용시키기도 하며, 이득포화기법이 적용된 SOA^[3,8]나 이득 물질의 들뜬 수명시간이 1 ps보다도 짧은 초고속 양자점 SOA^[9]가 적용되기도 했다. 또는 EDFA에 입사되는 광세기를 전자회로로 조정해서 일정하게 함으로써 버스트 효과를 제거하는 기술도 적용되었다^[10].

그러나 분명한 것은 버스트 효과를 조정하는 장치를 사용하지 않고 링크 증폭기를 이용할 수 있다면 이는 보다 구조

가 단순하고 가격 경쟁력이 있게 될 것이다^[11]. 사실 증폭기의 입력신호 세기가 충분히 낮다면 버스트 효과로 인한 신호 왜곡은 무시할 수 있는 수준이 될 수 있지만, 전송 거리가 확대된 링크에서는 이 입력신호의 세기가 이 범위를 넘나들게 된다. 따라서 수동광 링크에서 광증폭기를 사용할 때, 어떻게 이득 과도응답을 억제할 것인가를 묻기 이전에 보다 근본적인 질문은 이득 자동조정 기능이 얼마나 절대적으로 필요한 지를 알아보는 것이다. 이를 위해서는 버스트 신호에 의한 신호 왜곡 정도를 정량화하는 것이 필수적이다. 따라서 우리는 이 논문에서 링크 확장기가 적용된 차세대 PON 시스템으로 ONU 256개를 수용하고 50 km 전송거리를 갖는 양방향 TDM-PON 에서, SOA를 링크 증폭기로 사용할 경우 야기되는 펄스의 패턴 왜곡과 신호 성능 악화를 분석하였다. 이 같은 분석을 위해서는, 다양한 형태의 버스트 신호를 발생시켜야 하고 이 신호들의 일부분을 선택적으로 수신할 수 있어야 하므로 하드웨어 실험으로는 제약을 받게 된다 따라서 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 실험이 수행되었다. 하지만 시뮬레이션을 위한 중요한 시스템 상수들은 과거 우리의 하드웨어 실험에서 얻거나 적용한 값들을 사용하였다^[12,13]. 따라서 증폭기의 입력세기 변화 영향이 조사되었고, 프리앰플비트를 사용하여 버스트 효과에 의한 신호 왜곡 정도가 정량적으로 분석되었다. 그래서, 최종적으로 SOA를 링크증폭기로 사용하는 TDM-PON링크에서 신호 성능의 왜곡 없는 입력 신호의 범위(dynamic range)가 구해졌다.

II. 실험과 결과

그림 1은 실험에서 사용된 링크 확장된 양방향 TDM-PON 시스템의 개략도를 보여주고 있다. 이 시스템은 하나의 OLT(optical line terminal), 총 50 km의 단일모드광섬유(single mode fiber; SMF) 전송구간, 256개의 ONU(optical network unit), 그리고 링크 확장기로 구성되어 있다. 링크의 하향신호는 1555 nm 파장의 DFB(distributed feedback) LD(laser diode)를 광원

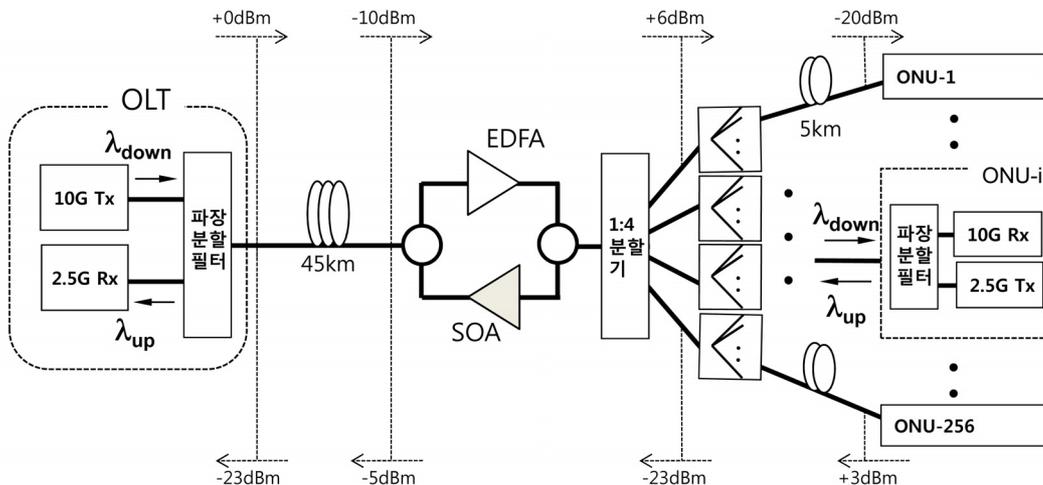


FIG. 1. A schematic of the bidirectional TDM-PON system with a link extender. OLT: optical line terminal, ONU: optical network unit.

으로 하며 이 광원을 마흐젠더 변조기를 사용하여 NRZ(non-return-to-zero) 형식의 10 Gbit/s로 변조시켰다. 변조된 신호는, OLT의 가장자리에 위치하면서 상향과 하향 신호를 분리시켜주는 파장분할필터를 거쳐 +0 dBm이 된다. 이후 전송선인 45 km의 SMF(전송손실은 1550 nm 파장에 대해서 0.2 dB/km)를 지나면서 9dB의 전송손실과 기타 접속손실 등의 오차를 고려하여 총 10 dB의 손실을 겪게 된다. 전송과정에 비선형 현상을 포함시키기 위해, 비선형 계수로 $26 \times 10^{-21} \text{ m}^2/\text{w}$, 레일리 산란계수로 -80 dB 등의 계수를 적용시켰다. 하향신호 증폭기로 사용되는 EDFA의 입력단에 -10 dBm 세기로 도착한 신호는 증폭기에 의해 23 dB 이득을 얻은 뒤, 7 dB 손실의 1:4 신호 분할기를 거쳐 6 dBm 이 된다. 이 신호는 다시 1:64 분할기를 거쳐 나누어진 뒤 각 신호들은 SMF에 의해 5 km 더 전송된다. 각 TDM 신호들은 각자의 ONU에 도착하는데 도착된 신호들은 상향과 하향신호를 분리시켜주는 파장분할 필터 거친 뒤 최종적으로 ONU 내의 PIN 수신기(photodiode; PD)에 -20 dBm의 신호로 입력된다. 1:4 신호 분할기에서 수신기까지 총 26 dB 손실은 1:64 분할기에 의한 손실 21 dB, 삽입손실 등을 포함한 5 km 전송손실 2 dB, 그리고 전송마진 3 dB가 포함된 값이다. -20 dBm 수신값은 일반적인 10G급 PIN 수신기의 수신감도 보다 다소 낮은 값이지만 상용장비에서는 FEC(forward error correction) 등의 장치들이 함께 사용되는 환경이 고려된 것이다.

상향신호의 경우는, 각 ONU에서 1270 nm 파장을 갖는 DFB LD를 NRZ 형식으로 직접 변조 시켜서 2.5 Gbit/s 전송대역폭을 가지는 64 비트 길이의 패킷 신호를 생성시킨다. 각 비트들의 '0' 신호와 '1' 신호 사이의 소광비는 30 dB다. ONU 입구의 파장분할필터를 거친 후 3 dBm 세기인 신호가 5km SMF를 지나고 광세기 분할기들을 거쳐서 -30 dBm으로 상향신호 증폭기의 입력단에 도착한다. 상향 신호의 광증폭기로 사용된 SOA가 이 신호를 25 dB 이득으로 증폭시킨 뒤 SMF를 통해 45 km 더 진행한 후 최종적으로 -25 dBm 세기로 OLT내의 PIN PD에 도달하게 된다. 45 km SMF를 통해 전송될 때 상향의 1270 nm 파장 신호는 하향신호와 큰 차이가 나는 18 dB의 감쇄를 겪게 된다. PD에 수신된 신호들은 256개의 ONU로부터 출발한 상향신호들이 시분할방식으로 합쳐진 상태므로 전기적으로 각각의 신호들을 역다중화시킨 뒤 이들을 클럭회복기와 비트 에러율 테스터기로 비트 에러율(bit error rate; BER)을 측정한다. 이 링크의 총 신호세기범위(power budget)는 하향신호는 55 dB이고 상향신호는 58 dB였다. 링크의 각 점에서 기술한 광세기 값들을 포함한 수치들은 우리의 과거 하드웨어 실험을 통해 주의 깊게 선택되었다^[15]. 링크 전송을 계산할 때, 각 데이터 비트당 등간격의 16개 시간점에서 신호 세기의 변화가 계산되었고, 하나의 시간창(timewindow) 내에 최소한 256개 이상의 데이터 비트들이 동시에 계산되었으며 충분한 파장선폭 범위를 포함시켜 계산되었다.

그림 2는 상향증폭기로 사용된 SOA의 특성을 보여준다. SOA의 시뮬레이션을 위한 구조로 칩의 활성영역은 벌크구조로 두

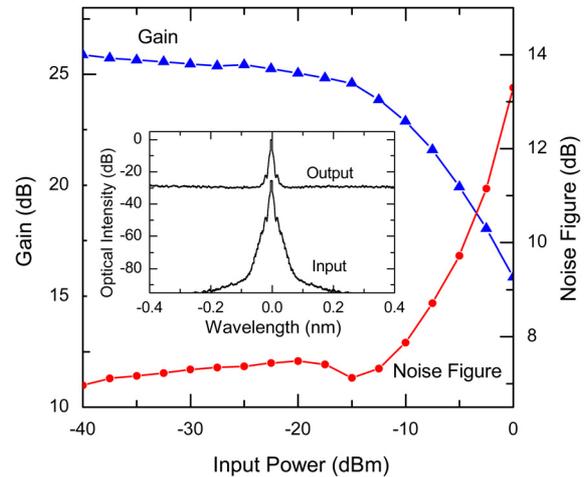


FIG. 2. Input and output optical spectra (inset) of the SOA link and its gains and noise figures.

께, 폭 그리고 길이는 각각 100 nm, 2.5 μm , 그리고 350 μm 다. SOA의 입출력면의 반사율은 1×10^{-4} 이고 활성영역의 구속인자(confinement factor)는 0.2로 설계되었다. 결과적으로 이 SOA가 25 dB 이득을 갖게 되었는데 이 결과값과 SOA의 구조 특성 값들이 상용제품의 하드웨어 특성과 일치하도록 최적화하였다. 그림 2는 이 SOA를 이용하여 측정된 이득과 잡음지수 특성을 보여준다. 그래프 사이에 삽입된 그림은 측정을 위해서 사용된 광신호의 스펙트럼의 예로 아래쪽 곡선이 입력이며 위쪽 곡선이 증폭된 출력 스펙트럼이다. 이들을 0.8 nm 파장 범위에서 보여주고 있다. 이러한 입력과 출력을 비교하여 얻어진 이득결과는 소신호 입력구간에서는 목표로 한 25 dB를 잘 만족시키고 있음을 알 수 있다. 잡음지수(noise figure; NF)는 7 전후 값을 가지는데 EDFA를 사용한 경우보다는 큰 값이지만 SOA에서는 전형적인 값임을 알 수 있다. 그러나 입력신호가 -20 dBm보다 커지면 이득 포화가 발생하기 시작하고 잡음지수도 증가하는 것을 볼 수 있다. 이득포화가 일어나는 -15 dBm 근처에서 잡음지수가 약간 좋아지는 현상은 소신호이득 값과 포화이득 값의 급격한 변화에 기인한 것이다^[16].

이 증폭기를 적용한 링크에 사용한 신호의 비트들의 흐름을 그림 3에서 보여 주어져 있다. 그림에서 아래쪽 그래프는 OLT의 수신기에서 측정되어 전기신호로 변환된 신호로, 이는 각 ONU에서 출발한 신호들이 1:64 분할기와 다시 1:4 분할기를 거쳐 시분할 다중화된 상태다. 각 ONU 신호들은 54개의 데이터 비트를 가지며 각각의 TDM 신호들은 8개의 가드비트들로 구분되어 있다. 그림에서 중간 중간에 펄스가 없는 구간을 볼 수 있는데 이는 가드비트들에 해당되는 시간구간이다. 이 신호들이 OLT 내에서 시분할 역다중화 회로에 의해서 각각의 ONU에 해당되는 신호 별로 분리된다. 그림에서 위쪽 그래프는 이렇게 분리된 신호를 보여주고 있으며 이 신호는 특정 시간대에만 존재하는 것을 알 수 있다. 이렇게 추출된 신호를 BERT로 처리하여 신호성능을 측정하였다.

SOA 증폭기를 링크 확장기로 적용시킨 그림 2의 TDM-PON 시스템에서 먼저 시도된 실험은 제안된 시스템의 시뮬레이션 신뢰성을 확인하는 것이다. 이를 위해 시간에 따른 이득 변화를 최소화한 조건, 즉 버스트 효과가 최소화된 조건에서, 링크 신호의 성능 실험을 실시하였다. 그 결과가 그림 4에 주어지는데, 여기서 상향신호 신호는 원형 점으로 하향신호는 삼각형 점으로 BER 곡선이 주어져 있다. 하향신호는 단 하나만 있지만, 상향신호는 시스템에서 256개를 가지도록 되어 있는데 단순성을 위해서 1번, 128번, 192번, 256번의 ONU들이 대표로 이용되어서 측정되었다. 각 신호들이 SOA의 입력단에 도착할 때 광세기는 모두 같이 -30 dBm 이다. 그림 4에는 이 4개의 ONU 신호 중에 128번의 성능을 대표 값으로 보여주고 있는데 그 이유는 각 신호들은 서로간에는 10^{-9} BER을 기준으로 측정하였을 때 수신감도가 최고 0.2 dB 밖에는 차이가 없었기 때문이다. 결과적으로 상향신호는 10^{-9} BER을 위해서 -25 dBm 수신 광세기 값을 필요로 하며 이는 우

리의 하드웨어 링크 실험 결과와 잘 부합하였다^[13]. 함께 측정된 하향신호는 상향신호에 비해서 수신감도가 훨씬 좋지 않는데 이는 당연히 10 Gb/s의 전송속도 때문이다. 특히 50 km의 전송거리는 10 Gb/s의 신호에 분산으로 인한 왜곡을 크게 발생시키게 된다. 그 결과 그래프에서, 하향신호의 경우 10^{-12} BER 근처에서 에러 플로어가 형성되었다. FEC 가 시스템에 함께 사용된다면, 이 같은 에러 플로어는 완전히 제거될 수 있다.

TDM-PON 시스템에서 상향신호는 하향신호와 달리 연속적으로 존재하는 것이 아니라 주기적인 특정 시간 간격 내에만 존재하는 버스트 특성을 갖는다. 그래서 링크 확장기인 SOA가 이 같은 버스트 신호에 어떻게 반응하는지를 조사하였고 그 결과가 그림 5에 주어져 있다. 다양한 입력신호 패턴에 대한 반응을 조사하기 위해서, 입력신호의 펄스 패턴은 여덟 개의 '1' 비트 패턴들이 한 개, 두 개, 네 개, 여덟 개의 신호 끼친 비트들(실제로는 신호 소강비가 60 dB인 '0' 비트들이 사용되었다) 간격 사이에 배열된 구조를 가졌고 이 전체 펄스 패턴이 그림 5의 제일 위 그래프에 숫자로 표시되어 있다. 처음 여덟 개의 '1' 비트들의 앞에는 육십네 개의 비트에 해당되는 시간 동안 신호가 꺼져 있다. 이는 '1' 신호가 있기 전에 입력신호가 없는 시간을 충분히 확보하기 위함인데, 이를 통해 비트들의 통과 후 일정 시간 동안 유지되는 SOA의 신호 메모리 효과에 해당되는 펄스 패턴 효과(pulse pattern effect)를 분명히 제거하기 위함이다^[14]. 또한, 버스트 신호에 의한 증폭기의 이득 과도응답(gain transient)은 입력신호의 세기에 영향을 받으므로, 다른 실험 조건은 고정시킨 상태에서 ONU의 출력신호의 세기를 조정하여 SOA로 입력되는 입력신호의 세기를 -30 dBm에서 -10 dBm까지 증가시

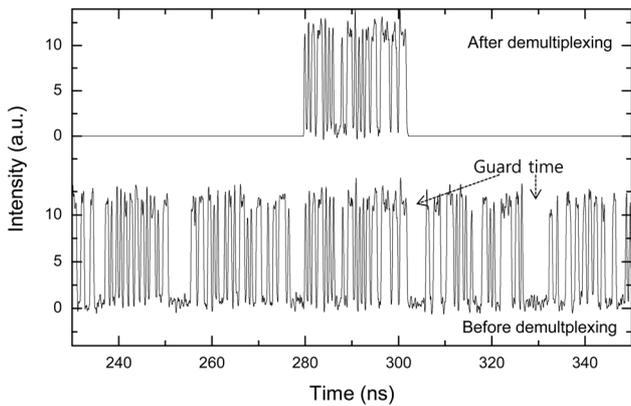


FIG. 3. Bit streams before (bottom graph) and after (top graph) demultiplexing.

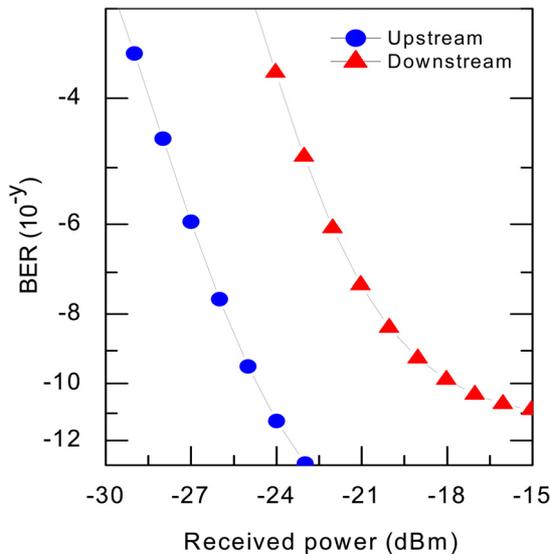


FIG. 4. BER curves for upstream (circular points) and downstream (triangular points) signals in the link without gain transient.

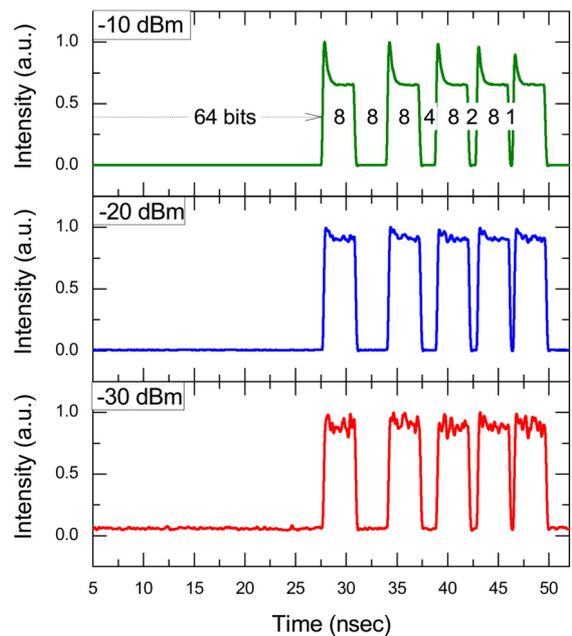


FIG. 5. Output pulse pattern of the SOA link extender in the input powers of -10, 20, and -30 dBm.

켰다. 이러한 입력 신호의 세기 변화는 실제 시스템의 사용 현장에서는 일반적으로 발생하는 일이므로, 링크 확장기가 버스트 신호가 주는 펄스 왜곡을 견디며 요구되는 신호 성능을 유지할 수 있는 입력신호 범위를 조사하는 것은 필수적이다¹⁵⁾. 그 결과인 그림 5는 입력신호에 따른 큰 차이를 보여준다. -10 dBm 입력세기 조건에서 여덟 개의 ‘1’ 비트 중에 초기 비트들에 초과펄스왜곡(overshooting)이 크게 발생했는데, 그 크기 변화는 펄스왜곡이 없는 경우의 세기와 비교할 때 최고 45%의 증가를 보였다. ‘1’ 비트들의 패킷 사이에 신호 꺼짐 비트들의 수가 여덟 비트에서 한 비트로 감소할수록, 즉 버스트 효과가 줄어들수록 이 초과펄스왜곡 정도는 줄어들었다. 이는 신호 꺼짐 비트의 수가 작을수록 SOA의 레이저 에너지준위 사이에 발생하는 밀도반전(population inversion) 비율의 변화가 약하기 때문이다¹⁵⁾. 하지만 입력신호가 -20 dBm이었을 때는 버스트 신호에 의한 펄스 왜곡이 현저히 줄어들었고 -30 dBm의 입력세기에서는 펄스왜곡이 무시할 수 있는 수준임을 알 수 있다.

그림 5의 결과는 버스트 신호에 의한 펄스신호왜곡 현상을 잘 보여주고 있지만, 이 왜곡 정도를 BER 측정에서 신호세기의 패널티로 정량화하는 것이 필요하다. 이를 정량화하기 위해서는 버스트 효과가 있는 경우와 없는 경우를 비교하는 것이 핵심이며 이 비교에서 가능한 다른 조건은 동일하게 유지하는 것이 필수적이다. 이를 위해 버스트 신호의 비트들 앞에 프리엠블 비트(preamble bit)를 첨가했다. 이 프리엠블 비트들이 많으면, 그림 5에서 여덟개의 ‘1’ 비트 패킷 중에 시간적으로 뒤에 있는 패킷들과 같이, 초과펄스왜곡에서 자유로와 버스트 효과가 없는 경우가 될 것이고, 프리엠블이 없으면 버스트 효과가 극대화될 것이다. 즉 프리엠블 비트의 유무를 통해 버스트 효과가 있는 경우와 없는 경우의 신호성능을 비교하게 된다. 그 결과가 그림 6에 주어진다. 입력신호의 평균 광세기는 -10 dBm 이었고, 데이터 비트 앞의 프리엠블 비트의 개수를 영(zero)에서 한 개씩 증가시키면서 결과를 측정했을 때 네 비트 이상에서는 프리엠블의 비트 수를 증가시켜도 신호 성능에 차가 없었다. 따라서 그림은 버스트 효과가 가장 큰 상태인 프리엠블이 없는 경우(삼각형 점)와 프리엠블이 네 비트가 들어가서 버스트 효과가 최대한 상쇄된 경우(사각형 점)의 BER 곡선을 비교하고 있다. 10^{-9} BER 값에서 버스트 효과에 의한 신호 악화 정도는 0.67 dB 신호 페널티(a 점)를 주고 있으며, 10^{-12} BER 값에서의 1.55 dB의 신호 세기 페널티(b 점)가 버스트 효과에 의해 발생한 것을 확인하였다.

그림 6과 같은 비교 실험을 입력 신호의 세기를 -30 dBm에서 5 dB씩 올리면서 실시하여 입력신호의 세기에 따른 버스트 효과에 의한 신호 성능 왜곡을 정량화 하였다. 그 결과가 그림 7에 정리되어 있는데 원형 점은 10^{-12} BER 값에서의 페널티를, 삼각형은 10^{-9} BER 값에서의 페널티를 나타낸 것이며 수평축에서 -10 dBm에 대응되는 값은 그림 6에서 얻어진 값이 표시된 것으로 a점과 b점은 두 그림에서 이 점이 서로 같은 상태를 나타내는 것이다. 결과는 SOA라는 링크 확장기로 입력되는 신호의 세기가 -30 dBm 부터 -15 dBm까지

는 실험오차 범위 내에서는 버스트 신호에 의한 성능악화는 없다는 것을 확인할 수 있다. 그러나 입력신호가 -10 dBm인 경우는 급격히 커지고 그 이상에서는 버스트 효과가 있는 경우, 10^{-12} 의 BER값을 측정할 수 없었다. 이 그래프의 의미는 제안된 구조의 링크 확장된 TDM-POM 시스템에서 버스트 신호를 위한 이득 과도응답(gain transient)을 억제하는 장치가 없다 하더라도 신호성능이 일정하게 유지되는 입력신호의 다이내믹 범위가 최소한 -15 dBm 까지는 보장된다는 것을 의미한다. 그리고 이러한 다이내믹 범위는 상업적인 GPON (Giga-bit PON) 시스템에서 일반적으로 요구되는 요구사항과 만족시키는 것을 의미한다¹⁴⁾. 따라서 링크 증폭기가 사용

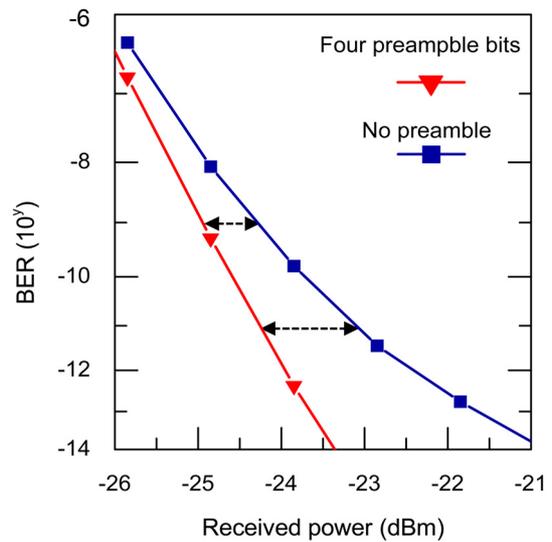


FIG. 6. BER curves (inset) caused by the burst effect with and without preamble bits when SOA was used as a link extender and input signal power was -10 dBm.

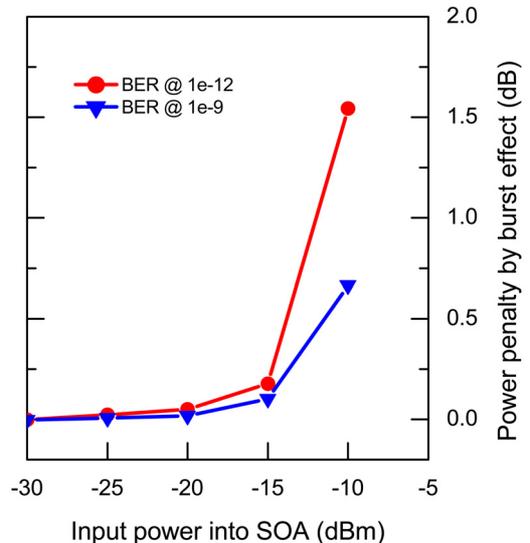


FIG. 7. The power penalties caused by the burst effect according to input power variation.

된 차세대 TDM-PON 시스템에서 증폭기의 이득 자동조정기의 사용이 필수적인 것은 아니며, 링크의 적절한 설계를 통해서 버스트 효과는 무시될 수 있음을 의미한다. 덧붙여 끝으로, 이 결론은 전송속도의 차이에 따라 영향을 받으리라 예상된다. 예를 들어 차세대 10 Gb/s 상향 버스트 신호의 경우, 증폭기의 이득 과도응답에 의한 신호 왜곡은 더 많이 악화되어 이득 자동조정 장치의 필요성은 커지리라 생각되지만 보다 구체적인 것은 다음 논문을 통해 발표하게 된다.

III. 결 론

각 2.5 Gb/s 대역폭인 256개의 ONU 로부터 나온 시분할 다중화된 신호들로 이루어진 상향신호와 10 Gb/s의 하향신호를 지원하며 50 km 이상의 긴 전송거리가 가능하도록, 링크 확장이 적용된 양방향 시분할 수동광망(TDM-PON) 링크가 고려되었다. 이 링크의 광신호 세기 범위는 하향신호에는 55 dB, 상향신호에 대해서는 58dB였다. 상향 신호 링크 확장기로는 25 dB 이득의 반도체광증폭기(SOA)가 사용되었다. SOA로의 입력세기가 버스트 효과가 무시될 수 있는 -30 dBm 입력조건에서 10^{-9} BER을 위한 수신감도는 -25 dBm 였다. SOA로의 입력 신호세기가 -10 dBm인 경우 버스트 신호로 인한 증폭기의 이득 과도응답(gain transient) 효과로 인해 최대 45%의 초과펄스왜곡(overshooting)이 발생했다. 그러나 입력신호가 -20 dBm 이하에서는 급격히 줄어들었다. 이 펄스 왜곡에 의한 신호성능의 악화는 10^{-9} BER을 위해서는 0.67 dB, 그리고 10-12 BER 을 위해서는 1.55 dB의 신호 세기 페널티를 발생시켰다. 그러나 입력신호가 -10 dBm 이하에서는 이 페널티가 급격히 줄어들어서 -15 dBm에서는 최고 0.2 dB 미만 이고 그 이하로는 버스트 신호에 의한 신호 왜곡은 없었다. 이는 제안된 구조의 링크 확장된 TDM-POM 시스템에서 버스트 신호를 위한 이득 과도응답(gain transient) 을 억제하는 장치가 없다 하더라도 신호성능이 일정하게 유지되는 입력신호의 다이내믹 범위가 최소한 -15 dBm 까지는 보장된다는 것을 의미한다.

감사의 글

본 논문은 한국학술연구재단의 연구비 지원 (2010-0007718)에 의하여 연구되었음.

References

1. N. Suzuki and J. Nakagawa, "First demonstration of full burst optical amplified GE-PON uplink with extended system budget of up to 128 ONU splits and 58 km reach," in *Proc. ECOC 2005* (Glasgow, UK, 2005), paper Tu 1.3.3.
2. P. Ossieur, C. Antony, A. M. Clarke, A. Naughton, H.-G. Krimmel, Y. Chang, C. Ford, A. Borghesani, D. G. Moodie, A. Poustie, R. Wyatt, B. Harmon, I. Lealman, G. Maxwell,

- D. Rogers, D. W. Smith, D. Nessel, R. P. Davey, and P. D. Townsend, "A 135-km 8192-split carrier distributed DWDM-TDMA PON with 2 32 10 Gb/s capacity," *J. Lightwave Technol.* **29**, 463-474 (2011).
3. T. B. Gibbon and I. T. Monroy, "Multi-level burst power transient suppression using semiconductor optical amplifiers in gigabit access links," in *Proc. ECOC 2008* (Brussels, Belgium, 2008), P.6.13.
4. ITU-T G.984.6, "Gigabit-capable passive optical networks (GPON): reach extension," Mar. 2008.
5. K.-I. Suzuki, Y. Fukada, K. Saito, T. Nakanishi, and Y. Maeda, "Burst-mode optical fiber amplifier for PON application," in *Proc. ECOC* (Glasgow, UK, 2005), Th 2.3.4.
6. M. Rasztoivits-Wiech, A. Stadler, and S. Gianordoli, "Bidirectional EDFA for future extra large passive optical networks," in *Proc. ECOC* (Cannes, France, 2006), Mo4.5.7.
7. C. Antony, G. Talli, and P. D. Townsend, "SOA based upstream packet equalizer in 10Gb/s extended-reach PONs," in *Proc. OFC/NFOEC* (San Diego, USA, 2009), OThA5.
8. S. Pato, R. Meleiro, D. Fonseca, P. André, P. Monteiro, and H. Silva, "All-optical burst-mode power equalizer based on cascaded SOAs for 10-Gb/s EPONs," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20**, 2078-2080 (2008).
9. R. Bonk, R. Brenot, C. Meuer, T. Vallaitis, A. Tussupov, J. C. Rode, S. Sygletos, P. Vorreau, F. Lelarge, G. H. Duan, H.-G. Krimmel, Th. Pfeiffer, D. Bimberg, W. Freude, J. Leuthold, "1.3 / 1.5 μ m QD-SOAs for WDM/TDM GPON with extended reach and large upstream / downstream dynamic range," in *Proc. OFC* (San Diego, USA, 2009), OWQ1.
10. Y. Liu, C. W. Chow, C. H. Kwok, H. K. Tsang, and C. Lin, "Optical burst and transient equalizer for 10Gb/s amplified WDM-PON," in *Proc. OFC* (San Diego, USA, 2009), OThU7.
11. S. Appathurai, D. Nessel, and R. Davey, "Measurement of tolerance to non-uniform burst powers in SOA amplified GPON systems," in *Proc. OFC* (Anaheim, USA, 2007), OWS2.
12. B.-H. Choi and S. S. Lee, "The effect of AWG-filtering on a bidirectional WDM-PON link with spectrum-sliced signals and wavelength-reused signals," *Opt. Comm.* **284**, 5692-5696 (2011).
13. H. H. Lee, S.-H. Cho, and S. S. Lee, "Efficient excess intensity noise suppression of 100-GHz spectrum-sliced WDM-PON with a narrow-bandwidth seed light source," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **22**, 1542-1544 (2010).
14. R. Sato, T. Ito, Y. Shibata, A. Ohki, and Y. Akatsu, "40-Gb/s burst-mode optical 2R regenerator," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17**, 2194-2196 (2005).
15. H. Buchta and E. Patzak, "Analysis of the physical impairments on maximum size and throughput of SOA-based optical burst switching nodes," *J. Lightwave Technol.* **26**, 2821-2830 (2008).
16. J. T. Ahn, H.-S. Seo, W. J. Chung, B. J. Park, and K. H. Kim, "Characterization of an ASE reflector-based gain-clamped erbium-doped fiber amplifier," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17**, 555-557 (2005).