

논문 2006-43TC-5-8

장거리 전송 파장분할 다중방식 수동형 광가입자망을 이용한 메트로망과 가입자망 통합 방안

(Consolidation of Metro Networks and Access Networks by using
Long-reach WDM-PON)

이 상 목*, 문 실 구*, 김 민 환*, 이 창 희**

(Sang-Mook Lee, Sil-Gu Mun, Min-Hwan Kim, and Chang-Hee Lee)

요 약

외부에서 주입된 비간섭성 광원 (BLS: Broadband Light Source)에 파장 잠김된 패브리 페롯 레이저 다이오드 (wavelength-locked F-P LD: wavelength-locked Fabry-Perot Laser Diode)를 광원으로 사용해서 50 GHz의 채널 간격을 갖는 양방향 장거리 전송 35 채널 고밀도 파장분할 다중방식 수동형 광 가입자망 (DWDM-PON: Dense Wavelength Division Multiplexing-Passive Optical Network)을 구현한다. 장거리 전송을 위해 F-P LD의 발진 모드를 제어하여 F-P LD에 주입이 요구되는 BLS 파워를 감소시키면서 출력 파워를 높인다. 결과적으로 광 증폭기의 사용 없이 70 km 단일 모드 광섬유를 통해 가입자당 100 Mb/s 이상의 대역폭을 제공하면서 모든 상하향 70 채널에서 손실 없이 이더넷 패킷을 전송하였다. 구현된 장거리 전송 DWDM-PON은 다수의 중앙국을 바이패스(Bypass)함으로써 메트로망과 가입자망을 통합할 수 있다. 또한, 구현된 DWDM-PON은 상용의 어븀 첨가 광섬유 증폭기를 광대역 광원으로 사용하여 80 가입자를 수용할 수 있으며, 반도체 광대역 광원을 사용하면, 100 가입자 이상의 수용이 가능하다.

Abstract

We demonstrate bidirectional long-reach 35-channel dense wavelength division multiplexing-passive optical network (DWDM-PON) based on wavelength-locked Fabry-Perot laser diodes (F-P LDs). The mode control of F-P LD enhances output power at decreased the required injection power. We show packet-loss-free transmission in all 70 channels at 125 Mb/s per channel line rate through 70 km of single mode fiber without optical amplifier. The DWDM-PON can consolidate a metro network into an access network by bypassing the central offices within its reach. The proposed DWDM-PON can accommodate about 80 subscribers with an EDFA-based broadband light source. Further expansion up to 100 subscribers is possible with a semiconductor-based BLS.

Keywords: Wavelength division multiplexing (WDM), passive optical network (PON), long-reach transmission, wavelength locking.

I. 서 론

오늘날 인터넷의 급속한 확산으로 기존의 음성 전화

와 텍스트 중심의 서비스가 영상 및 화상 중심의 멀티 미디어 서비스로 빠르게 전환되면서 음성 전화와 데이터 통신, 그리고 고품질 영상 서비스가 하나로 융합된 서비스 (TPS: Triple Play Service)를 하나의 네트워크 인프라를 통해 공급하기 위해서 가입자망의 고도화에 박차를 가하고 있다. 차세대 가입자망에서는 HDTV와 VoD (Video on Demand), EoD (Education on Demand), GoD (Game on Demand) 등과 같은 고품질 스트리밍 서비스와 화상 회의, 인터넷, 영상 전화, 기타

* 학생회원, ** 정회원, 한국과학기술원 전자전산학과 (Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, Korea Advanced Institute of Science and Technology)

※ 본 연구는 과학기술부의 국가지정 연구실 사업으로 지원되었음.

접수일자: 2006년4월8일, 수정완료일: 2006년5월15일

원격 제어 등을 효과적으로 수용하고 앞으로 예측되는 새로운 서비스까지 고려하면, 상하향 모두 100 Mb/s 이상의 대역폭을 제공할 수 있어야 할 것이다^[1]. 또한, 고화질 영상 중심의 서비스에서는 TV의 경우처럼 많은 가입자가 동시에 서비스를 요구하고 시청 시간도 길기 때문에 장시간 동안 대역폭을 보장받아야 한다. 그러므로 현재의 동축케이블이나 구리선을 이용한 가입자망에서 이용되는 통계적인 다중화 (Statistical Multiplexing)로 인한 대역폭 이득을 거의 얻을 수 없다. 그러므로 차세대 가입자망에서는 최대 대역폭이 중요한 것이 아니라, 가입자에게 제공되는 보장 대역폭만이 큰 의미를 가지게 된다.

이러한 넓은 대역폭의 TPS를 안정적으로 제공하기 위한 방안으로는 가입자까지 단일 모드 광섬유를 포설하여 서비스를 제공하는 FTTH (Fiber to the Home)가 많이 연구되고 있다^[2,3]. 여러 기술들 중에서도 경제적이면서 유지 보수가 쉬운 PON에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 WDM-PON은 넓은 대역폭, 높은 QoS (Quality of Service), 높은 보안성, 쉬운 확장성, 그리고 전송 속도와 프로토콜에 대한 투명성 등의 장점들을 갖고 있기 때문에 궁극의 광대역 광가입자망으로 인식되고 있다^[2].

일반적으로 PON에서는 중앙국 (CO: Central Office)

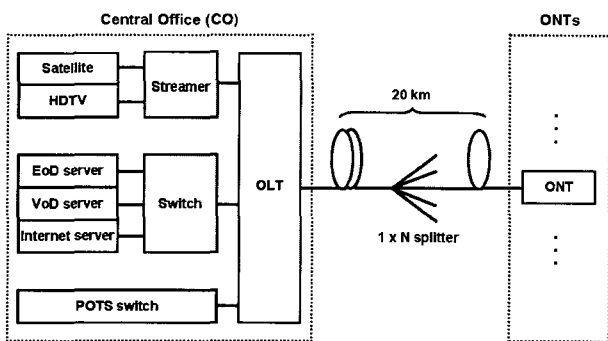


그림 1. 일반적인 PON의 구성도
Fig. 1. Schematic diagram of conventional PON.

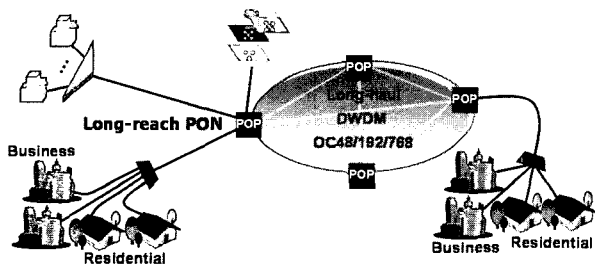


그림 2. 장거리 전송 PON을 이용한 광통신망의 구성도
Fig. 2. Evolution of optical transport networks using long-reach PON.

에서 가입자까지의 최대 전송 거리를 20 km로 규정하고 있다^[4]. 통신과 방송이 융합된 TPS를 가입자에게 제공하기 위한 CO의 구조와 일반적인 PON의 구성도를 그림 1에 나타내었다. CO에는 음성 전화와 인터넷, 주문형 영상 서비스 (EoD, VoD), 위성 방송과 HD 방송 등의 다양한 서비스를 제공하기 위한 많은 장비들이 놓이게 되며, CO들이 서로 연결되어 메트로망 (Metro Network)을 구성한다. 메트로망은 여러 단계의 집선 스위치 (Aggregated Switch)를 거쳐 백본망의 에지 스위치에 연결된다. 이러한 망에서는 신호가 다단계의 스위치를 거쳐야 하기 때문에 QoS가 저하된다.

PON에서 CO의 수를 줄여 경제성을 제고하고, 신호의 QoS를 확보하기 위해서 광섬유의 전송 특성을 충분히 활용하여 CO로부터 가입자까지 장거리 전송이 가능한 PON 기술에 대한 연구가 이루어지고 있다^[5-8]. 최대 전송 거리가 20 km인 PON을 사용해서 어떤 지역을 서비스하기 위해서 9 개의 CO가 필요하다고 가정할 때, PON의 최대 전송 거리를 60 km로 늘리게 되면 같은 서비스 영역을 제공하기 위해서 하나의 CO만 있으면 충분하다. 즉, 장거리 전송이 가능한 PON은 필요한 CO와 장비를 줄임으로써 초기 설비비용과 관리비용을 줄일 수 있다. 기존의 광통신망에서 장거리 전송 PON을 사용해서 가입자망에서 발생한 트래픽을 메트로망을 거치지 않고 바로 기간망의 에지 스위치에 연결할 수 있다. 또한, 도시의 경우에는 밀집되어 있는 도심에 CO를 설치할 필요 없이 도시 외곽지역에 CO를 설치하여 도시 내부에 위치한 각 가입자까지 장거리 전송 PON을 통해 연결함으로써 넓은 대역폭의 서비스를 안정적으로 제공할 수 있다.

그림 2에서와 같이 장거리 전송 PON을 이용해서 메트로망과 가입자망을 통합시킴으로써 네트워크를 단순화하여 경제적이고, 신호가 거쳐야 하는 홉의 수를 줄임으로써 QoS가 보장되는 광통신망을 구현할 수 있다. 하지만, 시간분할 다중방식 PON (TDM-PON: Time Division Multiplexing-PON)을 이용한 장거리 전송 PON에서는 광 분배기의 분배 손실(Splitting loss)과 장거리 광섬유의 손실을 보상하기 위해 CO과 가입자 사이에 광 증폭기 (Optical Amplifier)의 사용이 불가피하다^[7,8]. 또한, 가입자당 넓은 대역폭을 보장하기 위해 전송 속도를 증가시켜야 하고, 이로 인해 장거리 전송을 위해서는 광섬유의 색분산을 보상하기 위한 장치가 필요하게 된다. 이러한 광 증폭기와 색분산 보상 장치의 사용은 PON에서 비용을 증가시키고 시스템의 신뢰도

를 감소시키며, 많은 가입자들이 대역폭을 공유하므로 보안성과 QoS의 보장이 어렵다.

본 논문에서는 파장 잠김된 F-P LD를 광원으로 사용하는 DWDM-PON을 이용해서 장거리 전송 35 채널 PON을 구현한다. 먼저 장거리 전송의 가능성을 조사하기 위해서 F-P LD의 파장 잠김 특성을 실험적으로 분석한다. 그리고 색분산 보상 장치나 광 증폭기의 사용 없이 파장 잠김된 F-P LD를 이용한 DWDM-PON에서 장거리 전송 실험을 수행한다. 장거리 전송을 위해 F-P LD의 발진 모드를 제어함으로써 출력 파워는 증가하고 F-P LD에 주입이 요구되는 BLS 파워는 감소한다. 변조 신호로는 100 Base 이더넷 패킷을 사용한다. 구현된 장거리 전송 DWDM-PON은 BLS로써 어븀 첨가 광섬유 증폭기 (EDFA: Erbium Doped Fiber Amplifier)를 사용할 경우에 80 명의 가입자를 수용할 수 있다. 또한, SLD (Superluminescent diode)와 같이 더 넓은 대역폭을 가지는 BLS를 사용하면 100 가입자 이상 수용이 가능하다. 마지막으로 본 논문 내용에 대해 토의하고, 결론을 맺도록 한다.

II. 장거리 전송 DWDM-PON 구현

광가입자망에서 저가의 WDM 광원으로 외부에서 주입되는 스펙트럼 분할된 BLS에 파장 잠김된 F-P LD가 제안되었다^[9]. 이는 경제적이고 실용적인 방안으로 인식되어 WDM-PON을 구현하기 위한 광원으로 많이 사용되어 왔다^[10,11]. 이러한 파장 잠김된 F-P LD를 광원으로 이용한 DWDM-PON의 장거리 전송 실험 구성도를 그림 3에 나타내었다. 이는 크게 CO에 위치하는 광 종단 장치 (OLT: Optical Line Termination), 원격 노드 (RN: Remote Node), 그리고 가입자에 놓이는 광 종단 장치 (ONT: Optical Network Termination)로 구

성되어 있다. BLS로는 EDFA에서 발생하는 증폭된 자연 방출광 (ASE: Amplified Spontaneous Emission)을 사용하였다. 하나의 단일 모드 광섬유를 통해 상하향 신호를 양방향 전송하기 위해서 OLT에 서로 다른 밴드 (C-밴드와 L-밴드)의 출력을 갖는 두 종류의 BLS를 사용하였다. 서로 다른 파장의 광신호들을 다중화 및 역다중화하고 BLS의 스펙트럼을 분할하기 위해서 도파로 배열 격자 (AWG: Arrayed Waveguide Grating)를 OLT와 RN에 사용하였다. 사용된 AWG의 채널 간격과 3-dB 대역폭은 각각 50 GHz와 34 GHz이다. 한 가닥의 광섬유를 이용한 양방향 전송을 위해서는 하나의 AWG가 어느 하나의 밴드를 다중화 하면서 동시에 다른 밴드를 역다중화할 수 있어야 한다. 이를 위해 OLT와 원격 노드에 사용된 AWG는 C-밴드와 L-밴드에서의 주기적인 통과 특성을 이용해서 C-밴드 신호와 L-밴드 신호를 동시에 다중화 및 역다중화 하였다.

OLT와 ONT에 놓이는 각각의 광송수신기는 C/L 밴드 분리 파장분할 다중화기 (C/L WDM: C/L Wavelength Division Multiplexer/demultiplexer), F-P LD, 수신기, 그리고 미디어 컨버터 (M/C: Media Converter)로 구성되어 있다. C/L WDM은 서로 다른 밴드를 사용하는 상하향 신호들의 밴드를 분리하기 위해서 사용되고, 미디어 컨버터는 100 Base-Tx 이더넷 패킷과 100 Base-Fx 이더넷 패킷 사이의 인터페이스를 담당한다. OLT와 ONT 송수신기 사이의 링크 손실은 2개의 AWG 삽입 손실 10 dB와 나머지 소자들의 삽입 손실 3 dB, 그리고 60 km 단일 모드 광섬유의 손실 약 13 dB를 포함해서 약 26 dB 정도이다. 여기서, 광송수신기를 구성하는 F-P LD, 수신기, 그리고 C/L WDM은 작은 부피의 양방향 모듈 (BiDi module)로 패키징하거나 단일 플랫폼에 혼성 집적 (Hybrid Integration) 할 수 있다.

상향 채널의 경우, C-밴드 BLS에서 나온 광대역 광원은 광섬유를 지나 RN에 위치한 AWG2에서 스펙트럼 분할된다. 스펙트럼 분할된 광원은 각 가입자들에 놓이는 F-P LD에 주입된다. 주입되는 스펙트럼 분할된 BLS의 중심 파장에서 가장 가까운 F-P LD의 발진 모드가 파장 잠김되기 때문에, 각 가입자들의 상향 신호 파장은 주입되는 스펙트럼 분할된 BLS의 파장에 의해서 결정된다. 각각의 파장 잠김된 F-P LD는 상향 100 Base 이더넷 패킷으로 직접 변조 된다. 이러한 상향 신호들은 AWG2에서 다중화되고, 광섬유를 지나 CO에

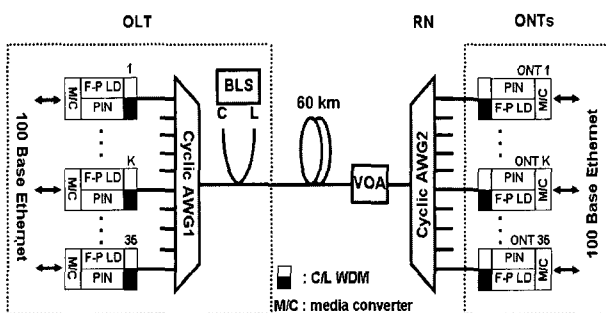


그림 3. 장거리 전송 DWDM-PON의 실험 구성도
Fig. 3. Experimental setup of long-reach 35-channel DWDM-PON.

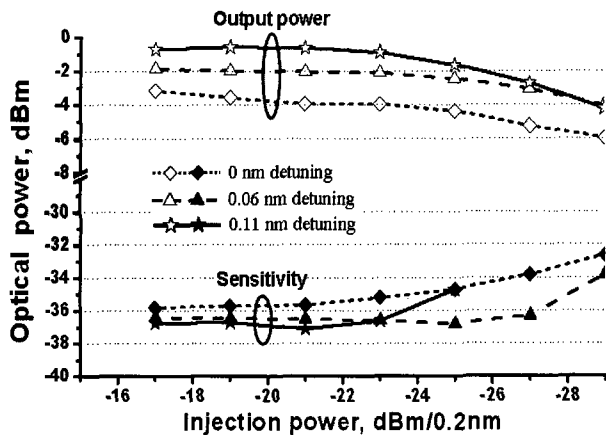


그림 4. BLS 주입파워에 따른 파장 잠김된 F-P LD의 출력 파워와 수신기의 민감도

Fig. 4. Output power of wavelength-locked F-P LD and receiver sensitivity as a function of BLS injection power.

위치한 AWG1에서 역다중화된 후, 각 가입자에 대응하는 OLT의 광송수신기에서 수신된다. 이와 유사하게 하향 채널의 경우는 L-밴드 BLS가 AWG1에서 스펙트럼 분할되어 OLT에 위치한 각각의 F-P LD에 주입된다. 주입된 BLS에 파장 잠김된 L-밴드 하향 신호들은 AWG1에서 다중화되어 ONT로 전송된다.

F-P LD의 파장 잠김 특성은 주입되는 BLS의 파워와 스펙트럼 분할된 BLS의 파장과 F-P LD의 발진 모드 파장 사이의 파장 디튜닝 (Wavelength Detuning)에 크게 의존한다^[11]. 그래서 시스템을 구현하기 전에, 장거리 전송의 가능성을 알아보기 위해서 디튜닝과 BLS의 주입 파워에 따른 파장 잠김 특성을 분석하였다. 그림 4는 전면 반사율 (Front-facet Reflectivity)이 0.1 %인 F-P LD의 경우에 BLS 주입 파워에 따른 파장 잠김된 F-P LD의 출력 파워와 10^{-10} BER을 만족하는 수신기의 민감도 (Sensitivity)를 도시한 그래프이다. 여기서, 디튜닝은 주입되는 스펙트럼 분할된 BLS의 파장에서 이에 가장 인접한 F-P LD 발진 모드의 중심 파장을 뺀 값으로 $\lambda_{BLS} - \lambda_{F-P LD}$ 로 정의한다. F-P LD는 155 Mb/s에서 $2^{31}-1$ 길이의 PRBS (Pseudo Random Bit Sequence)로 직접 변조 되었다. 그래프에서 파장 잠김된 F-P LD의 출력 파워와 수신기 민감도 사이의 차이가 시스템의 링크 budget이 된다. 그림 4에서 BLS의 주입 파워가 줄어들면, 출력 파워는 감소하고 민감도는 나빠져서 link budget이 줄어든다. 링크 budget과 링크 손실이 같아질 때 최대 전송 거리가 되기 때문에 파장 잠김 광원을 이용하는 DWDM-PON은 가입자에 위치하는 F-P LD에 주입이 요구되는 BLS 파워에 의해서

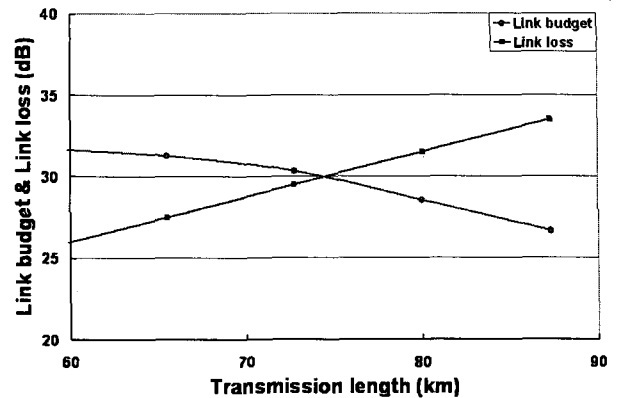


그림 5. 전송 거리에 따른 링크 budget과 링크 손실

Fig. 5. Link budget & link loss as a function of transmission length.

전송 거리가 제한된다. 이는 광섬유가 길어질수록 ONT의 F-P LD에 주입되는 C-밴드 BLS가 겪는 광섬유의 손실이 증가하게 되고, 이로 인해 파장 잠김 효과는 점점 감소하기 때문이다.

그림 5는 파장 잠김된 F-P LD의 출력 파워와 수신기의 민감도로부터 측정된 링크 budget과 광송수신기 사이의 링크 손실을 전송 거리에 따라 도시한 그래프이다. 그래프에서 링크 budget과 링크 손실이 같아지는 최대 전송 거리는 약 75 km 정도임을 알 수 있다.

보다 큰 출력을 갖는 BLS를 사용하면 그림 4에서 출력 파워는 -4 dBm으로 saturation 되고, 수신기의 민감도는 향상되어 링크 budget이 32 dB가 된다. 그림 3에서 광섬유를 제외한 송수신기 사이의 링크 손실이 약 13 dB 정도이므로 광섬유의 손실을 위한 링크 budget은 약 19 dB가 된다. 즉, 충분히 높은 출력을 갖는 BLS를 사용하게 되면 약 80 km의 단일 모드 광섬유를 전송 할 수 있다. 하지만, 고출력 BLS는 상당히 고가일 뿐만 아니라 구현에 있어서 기술적인 면에서도 많은 어려움이 따른다.

따라서 파장 잠김 광원을 이용하는 DWDM-PON에서 경제적으로 장거리 전송을 구현하기 위한 방안으로, 파장 잠김된 F-P LD의 출력 파워를 증가시키기 위해서 TEC (Thermo Electric Cooler)를 사용해 F-P LD의 발진 모드 중심 파장을 주입되는 스펙트럼 분할된 BLS의 파장 근처로 제어함으로써 파장 잠김 효과를 극대화하였고, 요구되는 BLS의 주입 파워를 줄이기 위해서 전면이 비반사 코팅되어 반사율이 0.1 %인 F-P LD를 사용함으로써 BLS의 주입 효율을 높였다. 그림 4에서 허용 디튜닝 범위는 약 0.1 nm이다. 디튜닝이 허용 범위를 넘어서면 링크 budget이 급격하게 줄어든다. 0.1

표 1. 장거리 전송 DWDM-PON 규격
Table 1. Long-reach DWDM-PON specification.

Channel spacing	50 GHz (0.4 nm)
Number of channels	35 channels
Wavelength range	Downstream: 1570.9 ~ 1684.7 nm Upstream : 1540 ~ 1553.6 nm
F-P LD mode spacing	0.6 nm
Front facet reflectivity	0.23 % ~ 0.07 %
BLS injection power	-16 dBm/0.2 nm for downstream -21.5 dBm/0.2 nm for upstream
TEC setting temp.	45 °C ~ 53 °C
Distance from CO to RN	60 km SMF
Bit rate	125 Mb/s (100BASE Ethernet)

nm 디튜닝 범위는 F-P LD의 약 1 °C 온도 변화에 해당하며, 이는 저가의 TEC를 사용해서 쉽게 제어가 가능하다.

과장 잠김된 F-P LD는 AWG에서 다중화 될 때 필터링을 거치기 때문에, 이의 최대 선폭 (Linewidth)은 AWG의 3-dB 대역폭과 같은 0.27 nm가 된다. 이 때, 단일 모드 광섬유를 사용하는 DWDM-PON 시스템의 전송 속도와 전송 거리의 곱 (BL product)은 54 Gb/s • km가 된다. 실험에서 100 Base 이더넷 패킷을 전송할 경우 (전송 속도: 125 Mb/s)에는 $L < 435$ km가 되어, 구현된 시스템에서 색분산에 의한 페널티는 무시할 수 있다.

BLS의 결합 효율을 높이기 위해 전면이 비반사 코팅된 F-P LD를 사용하고 과장 잠김된 출력 파워를 유지하기 위해 TEC를 사용해서 그림 3에 도시된 장거리 전송 DWDM-PON을 구현하였고, 그 규격을 표 1에 나타내었다. 상향 채널과 하향 채널로는 50 GHz의 채널 간격으로 35 채널 C-밴드와 L-밴드를 사용하였다. 광원으로 사용된 과장 잠김된 F-P LD의 전면 반사율은 비반사 코팅되어 0.23 % ~ 0.07 %에 분포한다. OLT와 RN에 사용된 AWG는 모두 50 GHz 채널 간격으로 34 GHz의 대역폭을 가지면서 C-밴드와 L-밴드에서 주기적인 통과 특성을 갖는 것을 사용하였다. OLT에서 RN까지는 양방향 장거리 전송을 위해서 한 가닥의 60 km 단일 모드 광섬유를 사용하였다. 실험에서 사용된 C-밴드 BLS의 최대 출력 파워는 23 dBm이었고, 이 때 60 km 광섬유와 RN를 거쳐 ONT에 위치한 F-P LD에 주입되는 BLS의 파워는 -21.5 dBm/0.2 nm였다.

100 Base 이더넷 패킷을 사용해서 모든 채널들을 직접 변조한 후, 램 커플러를 사용해서 AWG의 입력에서 측정된 상하향 스펙트럼은 그림 6과 같다. 상향 신호

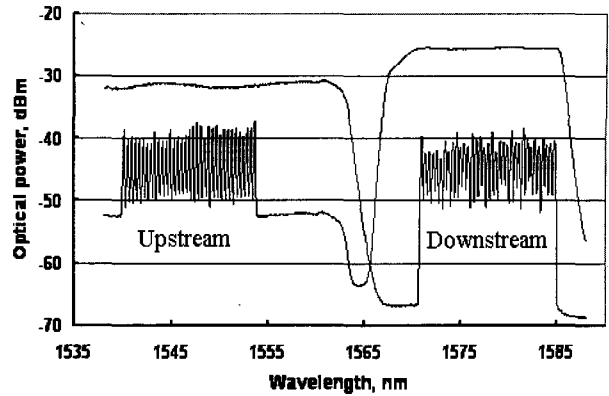


그림 6. 측정된 상하향 스펙트럼
Fig. 6. Measured upstream and downstream spectra.

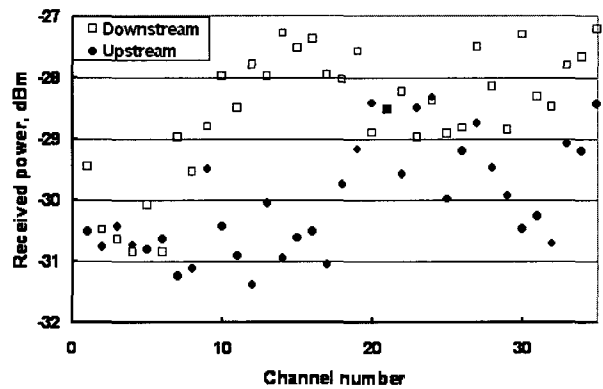


그림 7. 측정된 채널별 수신 파워
Fig. 7. Measured received power.

(Upstream) 스펙트럼은 다중화된 35채널 C-밴드 신호와 하향 채널 주입을 위한 L-밴드 BLS로 구성되고, 하향 신호 (Downstream) 스펙트럼은 다중화된 35채널 L-밴드 신호와 상향 채널 주입을 위한 C-밴드 BLS로 구성되어 있다.

장거리 전송 DWDM-PON의 채널별 수신기에서 측정된 모든 상하향 채널들의 수신 파워는 그림 7과 같다. 하향 채널들의 수신 파워는 -27.2 dBm ~ -30.8 dBm이고, 상향 채널들의 수신 파워는 -28.3 dBm ~ -31.4 dBm으로 최대 수신 파워 차이는 약 3 dB 정도이다. 채널들간의 파워가 다른 이유는 채널마다 과장 디튜닝이 조금씩 다르고 사용된 F-P LD의 전면 반사율에 차이가 있어 BLS 결합 효율이 다를 뿐만 아니라, 사용된 AWG의 채널별 삽입 손실에도 차이가 있기 때문이다.

구현된 장거리 전송 DWDM-PON의 성능을 확인하기 위해서 상하향 신호로써 Anritsu의 데이터 품질 분석기(MD1230A, Data Quality Analyzer)를 이용해서 100 Base 이더넷 패킷을 전송하였다. 다양한 상황을 고려하기 위해서 4개의 64 바이트, 1개의 512 바이트, 1개

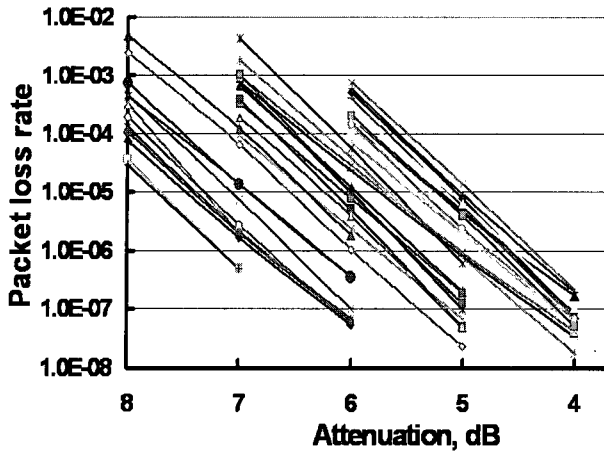


그림 8. VOA 감쇠량에 따른 상향 채널들의 패킷 손실률
 Fig. 8. Measured packet loss rates of upstream channels with respect to VOA attenuation in addition to 60 km fiber.

의 1024 바이트, 4개의 1518 바이트의 패킷들을 반복적으로 전송하였다. 모든 상하향 70 채널들은 이들 패킷을 사용해서 직접 변조 되었다. 패킷 손실률 (PLR: Packet Loss Rate)을 측정된 결과 모든 채널에서 하루 이상 패킷 손실 없는 전송을 확인하였다.

링크 손실에 따른 PLR를 측정하기 위해서 그림 3에 서처럼 광섬유와 RN 사이에 가변 광 감쇠기 (VOA: Variable Optical Attenuator)를 삽입하였다. 상향 채널들에서는 ONT F-P LD에 주입되는 C-밴드 BLS와 파장 잠김된 신호가 모두 VOA의 감쇠를 겪는다. 하지만 하향 채널들에서는 L-밴드 BLS는 감쇠를 겪지 않고 파장 잠김된 하향 신호만이 VOA의 감쇠를 겪는다. 그렇기 때문에 하향 채널의 성능에 비해 상향 채널의 성능이 VOA 감쇠에 의해서 더 심각하게 영향을 받아 모든 상향 채널에서 이에 대응하는 하향 채널에 비해 더 빨리 패킷 손실이 발생한다. 그래서 실험에서는 VOA의 감쇠량에 따라 모든 상향 채널들의 PLR만을 측정하였고, 이를 그림 8에 나타내었다.

시스템의 성능을 판단할 때 일반적으로 많이 사용되는 파라미터인 BER과 PLR는 수식 (1)과 같은 관계를

$$PLR = 1 - (1 - BER)^{N_b} \quad (1)$$

갖고 있다^[12]. 여기서, N_b 는 하나의 패킷 내에 존재하는 평균 비트의 수 있다. 수식 (1)은 데이터 품질 분석기를 이용한 PLR의 측정에 있어서, 하나의 패킷에 존재하는 여러 비트들 중에서 하나의 비트에서라도 에러가 발생하면 그 패킷은 버려짐을 의미한다. 실험에서 전송한 패킷

의 N_b 값은 약 6192이었다. 이로부터 10-10 BER은 약 10⁻⁶ PLR에 해당함을 알 수 있다.

그림 8에서 보는 바와 같이 모든 상향 채널에서 60 km 광섬유에 더해 약 4 dB의 감쇠까지는 10⁻⁶ 이하의 PLR를 얻을 수 있었다. 이러한 결과를 바탕으로 VOA 대신에 10 km의 광섬유를 삽입하여 다시 시스템의 성능을 측정하였다. 총 광섬유의 길이는 70 km가 되고, ONT에 위치한 F-P LD에 주입되는 BLS의 파워는 -24.5 dBm/0.2 nm이다. 이 경우에서도 우리는 모든 상향 채널에서 10⁻⁶ 이하의 PLR를 얻을 수 있었다. 패킷의 형태에 대한 의존도를 조사하기 위해서 64 바이트에서 1518 바이트 사이의 랜덤한 길이를 가지는 패킷을 전송하여 PLR를 측정한 경우에도 전송 성능의 저하는 나타나지 않았다.

III. 토 의

WDM-PON과 TDM-PON의 장거리 전송에서의 성능을 비교하면 표 2와 같다. TDM-PON에서는 많은 수의 가입자를 수용하기 위해서 큰 분기비를 가지는 광 분배기를 사용해야 한다. 광 분배기의 분배율이 높아질 수록 이의 삽입 손실 또한 증가한다. 1 x 64 분기 광 분배기의 삽입 손실은 약 20 dB (18 dB 고유 손실 + 2 dB 추가 손실)정도이다. 이에 비해, WDM-PON에서는 파장분할 다중화기/역다중화기로 도파로 배열 격자가 주로 사용되는데, 이의 삽입 손실은 10 dB (2 AWGs: 2 x 5 dB) 정도이다. 그러므로, 핵심 소자의 손실 차이로부터 WDM-PON은 10 dB의 추가적인 파워 budget을 갖는다.

또한, WDM-PON에서 각 가입자에게 제공되는 대역폭과 같은 대역폭을 TDM-PON에서 제공하기 위해서는 TDM-PON의 전송 속도가 광 분배기의 분기비와

표 2. WDM-PON과 TDM-PON의 장거리 전송 성능 비교

Table 2. Long-reach transmission performance comparison between WDM-PON and TDM-PON.

	WDM-PON	TDM-PON	Additional power budget
Key device Insertion loss	2 AWGs 10 dB	1 x 64 splitter 20 dB	10 dB
Receiver sensitivity	-30 dBm @ 155 Mb/s	> -21 dBm @ 10 Gb/s	> 10 dB
Long-reach transmission	Don't need optical amplifier and dispersion compensation	Need optical amplifier and dispersion compensation	Total : > 20 dB

WDM-PON의 전송 속도의 곱과 같아야 한다. 이와 같이 TDM-PON의 높은 전송 속도는 수신기의 민감도를 열화 시킨다. 예를 들어, ITU-T 표준에 따르면, 전송 속도를 155 Mb/s에서 2.5 Gb/s로 증가시키면 수신기의 민감도는 9 dB 열화 된다^[4]. 64 분기 TDM-PON의 경우, 요구되는 전송 속도가 10 Gb/s (155 Mb/s x 64 분기)로 증가하게 되고, 수신기 민감도의 열화는 10 dB 이상으로 더욱 심하게 나타난다. TDM-PON에서의 높은 전송 속도에 의한 색분산의 효과를 무시하더라도 TDM-PON에 비해 WDM-PON은 20 dB 이상 파워 budget의 여유를 가지게 된다. 게다가 TDM-PON에서는 경제성 때문에 높은 전송 속도에서도 불구하고 외부 변조보다 직접 변조를 많이 사용한다. 이로 인해 색분산의 영향을 무시할 수 없게 된다. 이처럼 TDM-PON에서는 각 가입자당 넓은 대역폭을 보장하기 위한 높은 전송 속도와 많은 가입자를 수용하기 위한 큰 분기 손실로 인해 장거리 전송을 위해서는 광 증폭기와 색분산 보상 장치가 필수적이다. 하지만, WDM-PON에서는 가입자당 넓은 대역폭을 보장하면서도 상대적으로 낮은 전송 속도를 가지고, 파장분할 다중화기/역다중화기의 낮은 삽입 손실로 인해 장거리 전송의 경우에도 광 증폭기와 색분산 보상이 필요치 않음으로써 시스템의 비용은 줄이고, 신뢰도는 높이는 장점을 가진다.

파장 잠김된 F-P LD를 사용하는 장거리 전송 DWDM-PON의 전송 용량은 BLS의 대역폭에 의해 제한된다. 32 nm 정도의 대역폭을 가지는 EDFA 기반의 BLS를 사용할 경우, 50 GHz의 채널 간격으로 최대 80 명의 가입자까지 수용이 가능하다. 이는 한 방향으로 총 10 Gb/s (125 Mb/s x 80)의 용량을 제공한다. 여기서, SLD와 같이 EDFA 보다 더 넓은 대역폭을 가지는 BLS를 사용하면 가입자 수를 100명 이상으로 확장할 수 있어서 장거리 전송 DWDM-PON의 전송 용량을 개선할 수 있다^[13,14].

20 km의 전송 거리를 가지는 일반적인 PON에 비해서 70 km의 전송 거리를 갖는 구현된 DWDM-PON은 약 12배 넓은 서비스 영역을 갖는다. 이는 12개의 CO중에서 11개를 제거할 수 있다. 그러므로, 하나의 장거리 전송 PON을 이용해서 메트로망과 가입자망을 통합함으로써 전체 전송 네트워크의 구조가 단순화될 것이다. 또한, 광 증폭기가 필요 없는 장거리 전송 DWDM-PON은 시스템의 신뢰성을 높이고 초기 투자비용과 관리비용을 절감할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 파장 잠김된 F-P LD의 출력 파워를

높이기 위해서 TEC를 사용해서 파장을 제어하였다. 하지만 WDM-PON에 있어서 경제성과 플러그 앤 플레이 (Plug and Play)를 위해서는 파장 무의존성을 지닌 ONT (Color-free ONT)의 구현이 중요하다. 이러한 color-free ONT를 구현하는 몇 가지 방법이 있다. 먼저, F-P LD의 발진 모드 간격을 채널 간격 (여기서는 0.4 nm) 보다 줄임으로써, 주입되는 BLS의 대역폭 내에 언제나 하나 이상의 F-P LD 발진 모드가 놓이게 함으로써 가능하다. 또한, 연구실에서 제한된 상호 주입된 F-P LD를 BLS로 사용함으로써 color-free ONT의 구현이 가능하다^[15]. 마지막으로, F-P LD 대신에 발진 모드 특성을 갖지 않는 반도체 광 증폭기 (RSOA: Reflective Optical Amplifier)를 사용함으로써 color-free 특성을 얻을 수 있을 것이다.

IV. 결 론

메트로망과 가입자망을 통합하기 위한 방안으로써 장거리 전송 PON에 관해 살펴보고, 외부에서 주입된 BLS에 파장 잠김된 F-P LD를 광원으로 사용해서 채널 간격이 50 GHz인 양방향 35 채널 장거리 전송 DWDM-PON을 구현하였다. 장거리 전송을 위해 F-P LD의 발진 모드를 제어함으로써 출력 파워를 증가시켰고, 전면이 비반사 코팅된 F-P LD를 사용함으로써 가장 중요한 시스템 제한 요인인 F-P LD에 주입이 요구되는 BLS 파워를 감소시켰다. 광 증폭기와 색분산 보상 장치의 사용 없이 70 km 단일 모드 광섬유를 통해 100 Base 이더넷 패킷을 사용해서 가입자당 100 Mb/s 이상의 대역폭을 제공하였다. PLR 측정에서는 모든 상하향 70 채널에서 10^{-6} 이하의 PLR를 확인하였다. 구현된 장거리 전송 DWDM-PON은 시스템의 서비스 영역 내에 있는 다수의 중앙국을 바이패스 함으로써 신호의 QoS를 향상시키고 메트로망과 가입자망을 통합할 수 있다. 또한, DWDM-PON은 EDFA를 BLS로 사용해서 최대 80 가입자를 수용할 수 있다. 또한, SLD와 같이 더 넓은 대역폭을 가지는 BLS를 사용하면 100 가입자 이상 수용이 가능하다.

참 고 문 헌

- [1] 이창희, 백진석, 박근열, "FTTH 구축방안 분석," *대한전자공학회지, The Magazine of the IEEK*, 1016-9288, 제 32권 4호, pp. 34-46, 2005.

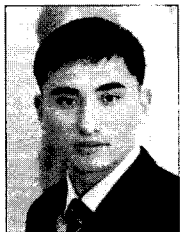
- [2] Soo-Jin Park, Chang-Hee Lee, Ki-Tae Jeong, Hyung-Jin Park, Jeong-Gyun Ahn, and Kil-Ho Song, "Fiber-to-the-Hone Services Based on Wavelength-Division-Multiplexing Passive Optical Network," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 22, no. 11, pp. 2582-2591, Nov. 2004.
- [3] Hiromichi Shinohara, "Broadband Access in Japan: Rapidly Growing FTTH Market," *IEEE Communications Magazine*, vol. 43, no. 9, pp. 72-78, September 2005.
- [4] ITU-T Recommendation G984.2, "Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Physical media dependent (PMD) layer specification", 2003.
- [5] D. B. Payne and R. P. Davey, "The future of fibre access systems?," *BT Technology Journal*, vol. 20, no. 4, pp. 104-114, October 2002.
- [6] Koji Akimoto, Jun-ichi Kani, Mitsuhiro Teshima, and Katsumi Iwatsuki,, "Super-Dense WDM Transmission of Spectrum-Sliced Incoherent Light for Wide-Area Access Network," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 21, no. 11, pp. 2715-2722, 2003.
- [7] Derek Nasset, Mark Scopes, Russell Davey, Darren Shea, Peter Healey, Anna Borghesani, Dave Moodie, Alistair Poustie, and Richard Wyatt, "Demonstration of 100 km Reach Amplified PONs with Upstream Bit-rates of 2.5 Gb/s and 10 Gb/s," in Proc. Of ECOC'2004, paper We2.6.3, 2004.
- [8] Giuseppe Talli and Paul D. Townsend, "Feasibility Demonstration of 100km Reach DWDM SuperPON with Upstream Bit Rates of 2.5Gb/s and 10Gb/s," in Proc. Conf. Optical Fiber Commun. OFC2005, paper OFI1, March 2005.
- [9] Hyun Deok Kim, Seung-Goo Kang, and Chang-Hee Lee, "A low-Cost WDM Source with an ASE Injected Fabry-Perot Semiconductor Laser," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, no. 8, pp. 1067-1069, Aug. 2000.
- [10] D. J. Shin, D. K. Jung, J. K. Lee, Y. K. Oh, J. H. Lee, H. S. Kim, C. H. Lee, S. T. Hwang, J. H. Ko, Y. J. Oh, T. I. Kim, and C. S. Shim, "Transmission of HDTV and Ethernet data over a WDM-PON employing ASE-injected Fabry-Perot laser diodes," in Proc. Conf. Optical Fiber Commun. OFC2004, paper WO3, Los Angeles, USA, Feb. 2004.
- [11] Sang-Mook Lee, Ki-Man Choi, Sil-Gu Mun, Jung-Hyung Moon, and Chang-Hee Lee, "Dense WDM-PON Based on Wavelength-Locked Fabry-Perot Laser Diodes," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, no. 7, pp. 1579-1581, July 2005.
- [12] D. Penninckx, E. Caro, O. Audouin, and M. Khan, "Forward-Error Correction for time-slotted optical packets," in Proc. Conf. Optical Fiber Commun. OFC2002, paper WO5, Mar. 2002.
- [13] Z. Y. Zhang, Z. G. Wang, B. Xu, P. Jin, Z. Z. Sun, and F. Q. Liu, "High-Performance Quantum-Dot Superluminescent Diodes," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 16, no. 1, pp. 27-29, January 2004.
- [14] D. Heo, J. S. Lee, I. K. Yun, H. C. Shin, S. W. Kim, D. K. Jung, D. J. Shin, H. S. Kim, H. S. Shin, S. B. Park, S. T. Hwang, Y. J. Oh, Y. K. Oh, D. H. Jang, and C. S. Shim, "Polarization-independent, high-power, and angle-flared superluminescent diode for WDM-PON applications," Lasers and Electro-Optics Society 2005, LEOS2005, pp. 611-612, October 2005.
- [15] Ki-Man Choi, Jin-Serk Baik, and Chang-Hee Lee, "Broad-band Light Source Using Mutually Injected Fabry-Perot Laser Diodes for WDM-PON," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, no. 12, pp. 2529-2531, December 2005.

저 자 소 개



이 상 목(학생회원)
 2000년 2월 경북대학교
 전자공학과 공학사 졸업.
 2000년~2002 한국과학기술원
 전기및전자공학과
 공학석사.
 2002년~현재 한국과학기술원
 전기및전자공학과
 박사과정 재학 중

<주관심분야 : 광네트워크 시스템과 파장분할 다
 중방식 수동형 광 가입자망>



김 민 환(학생회원)
 2002년 전북대학교 전자공학과
 공학사 졸업.
 2005년~현재 한국과학기술원 전
 기및전자공학과 석사과정
 재학 중

<주관심분야 : 장거리전송 파장분할 다중방식 수
 동형 광 가입자망>

문 실 구(학생회원)

2003년 2월 경북대학교 전자공학과 공학사 졸업.
 2003년~현재 한국과학기술원 전기및전자공학과
 석박사통합과정 재학 중
 <주관심분야 : 광네트워크 시스템과 레이저 모델
 링>



이 창 희(정회원)
 1979년~1983년 한양대학교
 전자공학과 공학사.
 1983년~1985년 한국과학기술원
 전기및전자공학과
 공학석사.
 1985년~1989년 한국과학기술원
 전기및전자공학과
 공학박사

1989년~1990년 Bellcore 연구소(미국) 박사후
 연구원

1990년~1997년 한국전자통신연구원 선임연구원
 1997년~현재 한국과학기술원 전자전산학과
 교수

<주관심분야 : 전광전송망, 광네트워크 시스템,
 반도체 레이저, 광전 소자, 및 광 가입자망>