

논문 2005-42SD-1-5

파장 고정된 Fabry-Perot 레이저를 사용한 고밀도 파장분할 다중방식 수동형 광통신망

(Dense Wavelength-Division Multiplexed Passive Optical Network
Employing Wavelength-Locked Fabry-Perot Lasers)

김 현 덕*

(Hyun Deok Kim)

요 약

파장 고정된 Fabry-Perot 레이저를 사용하여 경제적인 고밀도 WDM-PON의 구현 가능성을 검증하였다. 중앙기지국에서 주입된 비간섭성광에 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저를 이용하여 50 GHz 채널 간격의 파장분할 다중화된 4×622 Mb/s 상향신호를 30 km의 광섬유를 통해 성공적으로 전송하였다. 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저 출력의 비팅 잡음 특성을 분석하여 Fabry-Perot 레이저가 주입되는 비간섭성 광의 강도 잡음을 억제함을 보였고, 이로 인해 50 GHz 채널 간격의 고밀도 WDM 전송이 가능함을 보였다.

Abstract

A cost-effective dense WDM-PON employing wavelength-locked Fabry-Perot lasers has been demonstrated. We have successfully demonstrated a dense WDM transmission of 4×622 Mb/s upstream signal with 50-GHz channel spacing over 30-km conventional single mode fiber. We have also investigated the beating noise characteristics of a wavelength-locked Fabry-Perot laser and showed the wavelength-locked Fabry-Perot laser suppresses the intensity noise of the incoherent light injected, which enables a dense WDM transmission with a channels spacing of 50 GHz.

Keywords : Fabry-Perot laser, Wavelength Division Multiplexing, Wavelength-locking

I. 서 론

파장분할 다중방식 수동형 광통신망(WDM-PON: Wavelength-Division Multiplexed Passive Optical Network)은 차세대 광대역 가입자망 인프라 구축을 위한 유력한 방안으로 인식되고 있다^{[1]-[2]}. WDM-PON은 중앙기지국(CO: Central Office)과 수동형 원격노드(RN: Remote Node) 그리고 가입자단(ONU: Optical Network Unit)으로 구성되며, 가입자단별로 별도의 파

장을 할당하여 연결경로를 설정하도록 한다. 따라서 광섬유를 일부 공유하지만 중앙기지국과 각 가입자단 사이에는 가상의 점-대-점(virtual point-to-point) 연결경로가 제공된다. 이러한 특징으로 인해 기존의 시분할 다중방식(TDM: Time-Division Multiplexed) 수동형 광통신망에 비해 WDM-PON은 보안성이 우수하고, 가입자당 전송용량이 큰 장점이 있다.

WDM-PON을 구현하기 위해서는 중앙기지국과 각 가입자단에 반드시 미리 정해진 특정 파장을 출력하는 광원들을 사용하여야 하며, 이러한 광원들이 WDM-PON 구현의 핵심 소자 중 하나이다.

기존의 파장분할 다중방식 광전송 장치에서는 DFB(Distributed Feed-Back) 레이저와 같은 고가의 광원을 사용하여 왔다. 하지만, 가입자망인 WDM-PON은

* 정회원, 경북대학교 전자전기컴퓨터학부
(School of Electrical Engineering and Computer
Science, Kyungpook National University)
※ 본 연구는 국가 지정 연구실사업(NRL) 지원으로 수행되었습니다.
접수일자: 2004년11월19일, 수정완료일: 2004년1월3일

가격이 중요한 선택 요인이기 때문에 우수한 성능을 나타내는 DFB 레이저와 같은 고가의 광원을 사용하기에는 많은 제약이 따른다. 특히, 수동형 가입자망에서는 원격노드에 전원이 공급되지 않기 때문에 원격노드에 사용되는 소자들이 외부 온도의 변화에 따라 특성이 변하게 되고, 이로 인해 가입자단과 중앙기지국에 사용되는 광원의 출력 파장을 복잡한 과정을 통해 제어해야 하는 문제점이 있다. 따라서 기존의 장거리 광전송 장치에 주로 사용된 DFB 레이저와는 다른 광원을 사용하고자 하는 시도가 많았다.

대표적으로 예로 LED(Light Emitting Diode)나 EDFA(Erbium-Doped Fiber Amplifier)의 자연방출광을 이용하는 ASE(Amplified Spontaneous Emission) 광원 등 광대역광원을 사용하는 스펙트럼 분할방식(spectrum-sliced) 광송신기들이 많은 관심을 끌어 왔다^[2]. 하지만, LED의 경우 출력 파워가 충분하지 않고, ASE 광원의 경우 값비싼 외부변조기를 필요로 하므로 WDM-PON에 적용하기에는 많은 제한이 있다. 특히, 이러한 광원들은 비간섭성(incoherent) 광을 출력하기 때문에 본질적으로 강도 잡음(intensity noise)에 의해 신호 품질이 제한되는 문제가 있다^[3].

최근에는 반사형(reflective) 반도체 광증폭기를 이용한 WDM-PON 광송신기 구현 기술이 제안되었다^{[4]-[5]}. 하지만, 반사형 반도체 광증폭기의 경우, 한 단면에 high reflection 코팅을 해야 할 뿐만 아니라 다른 한 단면에는 반사를 방지하기 위해 AR(anti-reflection) 코팅을 필요로 하는 문제점이 있다. 반사형 반도체 광증폭기에 필요한 AR 코팅의 반사율은 기존의 일반적인 레이저 다이오드 표면 반사율의 1 ~ 10 % 이하 수준이 되어야 하므로 제작 공정이 복잡해지고, 수율(yield)이 떨어지므로 광송신기의 구현 가격을 낮추는데 장애로 작용한다.

이러한 문제점을 극복하기 위해 Fabry-Perot 레이저에 비간섭성 광을 주입하여 출력 파장을 고정하여 광송신기를 구현하는 기술이 제안되었다^[6]. 또, 제안된 방법을 이용하여 155 Mb/s 전송 실험을 성공적으로 수행하였다.

본 논문에서는 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저를 이용하여 대용량 WDM-PON의 구현 가능성을 실험적으로 검증한다. 채널당 622 Mb/s의 고속 신호 전송과 채널 간격을 50 GHz로 줄여 하나의 ASE 광원을 이용하여 80 가입자 이상을 수용하기 위한 기술적 가능성을 검토한다. 또, 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저를 이용

한 송신기의 잡음특성을 분석하여, 고밀도 파장분할 다중방식 전송을 가능케 하는 요인에 대해서 분석한다.

II. 실험 및 실험결과

파장 고정된 Fabry-Perot 레이저를 사용한 WDM-PON 실험 장치의 구성도는 그림 1과 같다. 그림에 나타난 WDM-PON에서는 상향신호 전송만을 고려하였으나, 동일한 방법으로 파장 고정된 Fabry-Perot를 이용하여 WDM-PON에서 하향신호 전송에도 이용할 수 있다^[7].

파장 고정된 Fabry-Perot는 외부에서 주입되는 비간섭성 광의 파장에 출력 파장이 고정되는데, 외부에서 주입될 비간섭성 광을 생성하기 위해 중앙기지국에 EDFA를 이용한 ASE 광원을 사용하였다. EDFA에서 출력된 ASE의 파워는 광가변감쇄기(VOA)를 이용하여 조절하였다. 중앙기지국에서 생성된 ASE는 원격노드로 전달되는데, 광회전기(optical circulator)를 사용하여 원격노드로 전달될 ASE와 원격노드에서 전달되어 온 신호를 결합하였다. 원격노드에서 전달되어 온 광신호를 역다중화하기 위해 채널 간격이 50 GHz인 도파관열 격자 라우터(AWG: Arrayed Waveguide Grating router)를 사용하였으며, 도파관열 격자 라우터의 각 출력단자에는 광수신기를 연결하였다.

중앙기지국에서 생성된 ASE는 30 km의 광섬유를 거쳐 원격노드로 전달되며, 원격노드에 설치된 또 다른 도파관열 격자 라우터(AWG2)에 의해서 파장별로 분리되었다. 원격노드에서 파장별로 분리된 ASE는 가입자단에 설치된 Fabry-Perot 레이저에 주입되었으며, Fabry-Perot 레이저에 ASE 성분이 주입되면 Fabry-Perot 레이저의 출력 파장이 ASE 성분과 동일한 파장

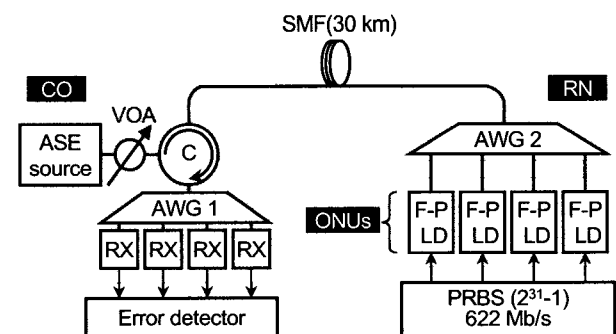


그림 1. 파장 고정된 Fabry-perot 레이저를 이용한 고밀도 WDM-PON 실험 장치 구성도

Fig. 1. Schematic diagram of a dense WDM-PON employing wavelength-locked Fabry-Perot lasers.

에 고정된다. 따라서 파장이 고정된 Fabry-Perot의 출력은 원격노드의 도파관열 격자 라우터(AWG2)를 통해 다중화 되어 중앙기지국으로 전달된다.

각 가입자단에는 내부에 광단향관(optical isolator)이 없는 일반적인 Fabry-Perot 레이저를 사용하였으며, Fabry-Perot 레이저들의 문턱전류값은 약 8 ~ 11 mA 였다. 가입자단의 Fabry-Perot 레이저들은 의사랜덤부호(PRBS)를 사용하여 622 Mb/s로 직접 변조되었으며, 의사랜덤부호의 부호 길이는 $2^{31}-1$ 이었다.

실험에서는 4개의 가입단을 가정하였으므로 4×622 Mb/s 의 파장분할 다중화된 광신호가 중앙기지국으로 전달되었다. 고밀도 파장분할 다중방식 광전송 장치를 가정하기 위해 채널 간격은 50 GHz (약 0.4 nm)로 설정하였으며, 첫번째 채널(ch.1)의 파장은 1552.52 nm 였고, 네번째 채널(ch.4)의 파장은 1553.72 nm 였다. 중앙기지국과 원격노드에 각각 사용된 50 GHz 채널 간격을 가진 도파관열 격자 라우터의 3-dB 대역폭은 약 22 GHz 였고, 삽입손실은 모두 약 6.2 dB 였다.

중앙기지국과 원격노드를 연결하는 광섬유의 손실은 약 6.1 dB 였고, 중앙기지국에 사용된 광가변감쇄기를 이용하여 각 가입자단의 Fabry-Perot 레이저에 주입되는 ASE 파워가 약 -12 dBm이 되도록 조절하였다. 각 Fabry-Perot 레이저에 인가되는 직류 바이어스 전류와 변조전류의 크기는 비트오율이 최소가 되도록 개별적으로 조절하였다. 가입자단 출력의 소광비는 모두 9.5 dB 이상이였으며, 출력파워는 모두 -11 dBm 이상이였다.

그림 2는 중앙기지국에서 도파관열 격자 라우터의 입력단에서 측정된 광스펙트럼이며, 점선은 ASE의 주입이 없는 상태에서 Fabry-Perot 레이저들의 자체의 출력을 나타내고, 실선은 ASE의 주입에 의해 가입자단에 있는 Fabry-Perot 레이저들이 주입된 비간섭성 광에 출력 파장이 고정된 상태에서 측정된 것이다.

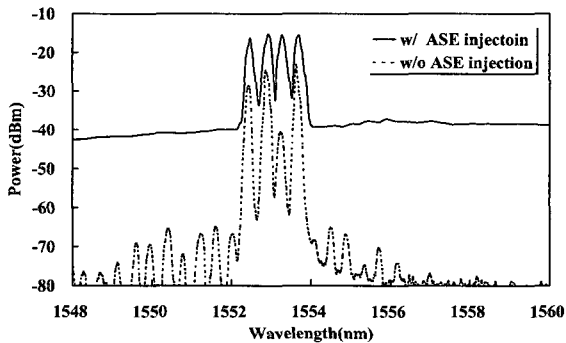


그림 2. 중앙기지국에서 측정된 광스펙트럼
Fig. 2. Measured Optical spectra at central office.

ASE 주입이 없는 상태에서도 Fabry-Perot 레이저들의 출력 중 원격노드의 도파관열 격자 라우터를 통과한 통과대역 내의 성분들이 관찰되었지만, 파워가 작을 뿐만 아니라 광스펙트럼이 시간에 따라 계속적으로 변동하였다. 이것은 Fabry-Perot 레이저에서 모드 경쟁(mode competition) 또는 모드 분할(mode partition) 효과 때문이다. 이러한 모드 분할 잡음(mode partition noise) 때문에 일반적으로 Fabry-Perot 레이저는 파장분할 다중방식 광전송 장치에 사용할 수 없는 것으로 알려져 있다. 하지만, ASE를 주입하여 Fabry-Perot 레이저의 출력 파장이 주입된 비간섭성 광에 고정된 상태에서 측정된 광스펙트럼은 매우 안정되어 있었으며, 측정된 파워도 각 채널별로 적어도 8 dB 이상 증가하였다. 이것은 Fabry-Perot 레이저에 ASE를 주입하여 출력 파장을 고정하면 거의 단일 모드 레이저와 유사한 출력을 나타내기 때문이다.

WDM-PON 실험 장치에서 측정된 비트오율(BER: Bit Error Rate) 측정 결과를 그림 3에 나타내었다. 광섬유를 통한 신호 전달 효과를 분석하기 위해 중앙기지국과 원격노드를 직접 연결한 경우(back-to-back)와 30 km의 광섬유를 통해 연결한 경우에 대해 각각 비트오율을 측정하였다. 두 경우 모두 가입자단의 Fabry-Perot 레이저에 입력되는 ASE 파워가 일정하도록 광가변감쇄기를 사용하여 ASE 파워를 조절하였다. 두 경우 모두 10^{-9} 비트오율에서 수신기 감도는 약 -30.4 dBm 이하였으며, 광섬유에 의한 수신기 감도 저하는 채널별로 차이가 있었지만, 비트오율 10^{-9} 에서 최대 1 dB 이하였다.

또 파장분할 다중방식 전송 시 인접 채널에 의한 crosstalk 효과를 분석하기 위해 인접 채널들을 제거한 상태에서 각 채널별로 비트오율 측정하였는데, 수신기

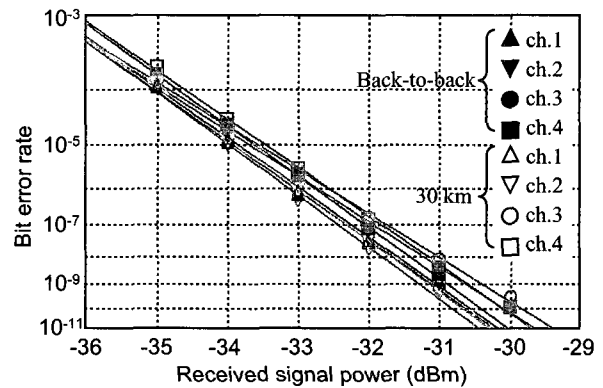


그림 3. 비트오율 측정 결과
Fig. 3. Measured bit error rate curves.

감도 저하는 발생하지 않았다. 이것은 비간섭성 광에 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저가 적어도 25 dB 이상의 인접모드억제율(side mode suppression ratio)을 가지고 있어 인접 채널의 특성에 거의 영향을 미치지 않기 때문이다.

본 실험에서와 달리 간섭성광(coherent light)을 Fabry-Perot 레이저에 주입할 경우, Fabry-Perot 레이저는 단일모드 출력을 나타내지만, 일반적으로 그 출력이 불안정한 것으로 알려져 있다^[8]. 이것은 injection-locking 기술로 알려져 있으며, 그 불안정성 때문에 실제 시스템에는 잘 적용되지 않고 있다. 하지만, 본 실험에서는 Fabry-Perot 레이저에 비간섭성 광을 주입하기 때문에 간섭성광을 주입한 경우와 달리 매우 안정된 특성을 나타내었다. 즉, 측정된 출력 광스펙트럼이 안정되어 있었을 뿐만 아니라 12시간 동안 연속적으로 비트오율을 측정한 결과 모든 채널(4채널)에 대해서 error free 전송을 달성할 수 있었다.

III. 분석 및 고찰

WDM-PON에서 수용 가능한 가입자수는 사용 가능한 파장의 수에 의해 결정된다. 제안된 바와 같이 Fabry-Perot 레이저에 비간섭성 광을 주입하여 출력 파장을 고정하여 사용하는 경우, 사용 가능한 파장대역은 비간섭성 광의 대역에 따라 결정된다. 현재 고출력 비간섭성 광을 제공할 수 있는 광원으로는 광섬유 증폭기 특히, EDFA가 주로 사용된다. 따라서 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저를 사용하는 WDM-PON에서 이용 가능한 파장대역은 EDFA의 이득대역에 의해서 제한된다.

이처럼 이용 가능한 파장대역이 제한될 경우 가입자수를 늘리기 위해서는 채널 간격을 줄여서 동일한 대역에서 더 많은 채널을 제공할 수 있도록 하여야 한다. 일반적으로 DFB 레이저와 같은 단일모드 광원을 사용하는 광전송 장치에서는 송신기의 자체 특성은 채널 간격에 무관하고, 채널간격이 좁아지면 광섬유의 비선형성이 전체 전송장치의 성능에 결정적인 영향을 미치게 된다. 하지만, 제안된 것과 같이 비간섭성 광이 관련된 송신기에서는 송신기의 자체 성능이 채널 간격에 직접적으로 영향을 받는다.

대표적인 예로 LED나 ASE 광원을 사용한 스펙트럼 분할 통신시스템은 채널 간격이 좁아지면 신호 채널의 스펙트럼폭도 좁아져서 신호 대 잡음비가 감소한다. 이

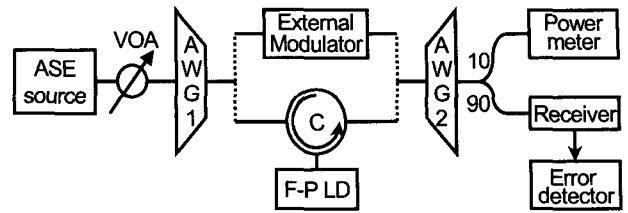


그림 4. 일반적인 스펙트럼 분할방식 광송신기와 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저를 사용한 광송신기의 비팅 잡음 특성 비교를 위한 실험 장치도

Fig. 4. Experimental setup to compare the beating noise characteristics of the transmitters with a conventional spectrum-sliced light source and a wavelength-locked Fabry-Perot laser.

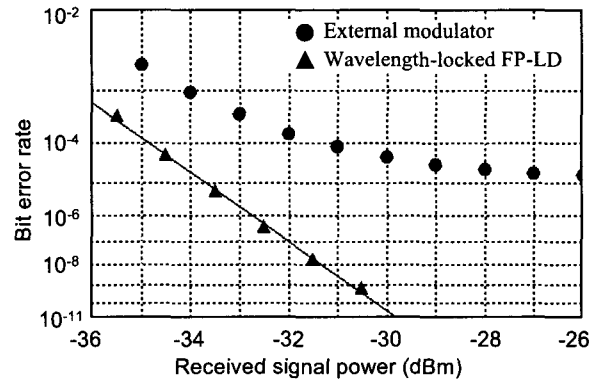


그림 5. 비트오율 측정 결과 비교

Fig. 5. Comparison of measured bit error rate curves.

경우 ASE-ASE 비팅 잡음에 의해 성능이 제한되며, 전송속도가 증가할수록 더 넓은 대역폭을 가진 ASE를 사용하여야 하므로 채널 간격을 넓혀야 한다^[3]. 따라서 스펙트럼 분할방식 광통신 장치에서는 특정 전송속도에서 원하는 비트오율을 얻기 위해서는 반드시 채널 간격을 일정 수준이상으로 유지하여야 한다.

비간섭성 광에 의한 비팅 잡음 효과를 분석하기 위해 그림 4와 같은 실험 장치를 구성하였다. 실험에서는 외부변조기를 사용하는 기존의 스펙트럼 분할방식 광송신기와, 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저를 사용하는 송신기에 대해서 비팅 잡음의 효과를 비교/분석하였다. 외부변조기를 제외한 소자들은 그림 1의 장치에서 사용된 소자들과 동일하다.

외부변조기를 사용하는 경우, ASE광원의 출력은 도파관열 격자 라우터를 거쳐 스펙트럼 분할 된 후, 외부변조기로 입력된다. 따라서 외부변조기에 입력되는 ASE의 대역폭은 도파관열 격자 라우터의 3-dB 대역폭과 같은 약 22 GHz 였다.

그림 5는 비트오율 측정결과를 나타낸다. 외부변조기를 사용한 기존의 스펙트럼 분할방식 광송신기의 경우

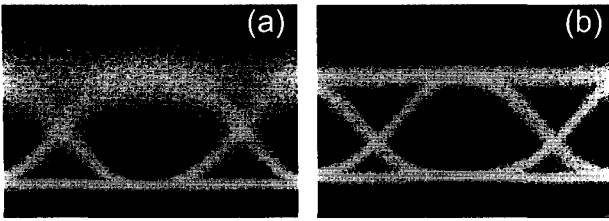


그림 6. Eye diagram 측정 결과 (a)일반적인 스펙트럼 분할방식 광송신기 (b)파장 고정된 Fabry-Perot 레이저 출력

Fig. 6. Measured eye diagram of (a) conventional spectrum-sliced transmitter (b) wavelength-locked Fabry-Perot laser.

10^{-5} 비트오율에서 error floor 가 발생하여 수신 파워를 증가시키더라도 10^{-5} 이하로 비트오율을 개선할 수 없었다. 이와 달리 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저를 사용한 경우에는 error free 전송이 가능하였다.

두 경우를 보다 자세히 분석하기 위해 eye diagram을 측정하고 그 결과를 그림 6에 나타내었다. 외부변조기를 사용한 일반적인 스펙트럼 분할 방식 송신기에 비해 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저를 사용하는 송신기의 비팅잡음이 현저히 감소되었음을 알 수 있다. 즉, 주입된 비간섭성 광에 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저의 출력에서 측정되는 강도 잡음이 현저히 감소하는데, 이것은 Fabry-Perot 레이저에 비간섭성 광이 입력되면 레이저 내부의 gain saturation 효과에 의해 비팅 잡음이 감소하기 때문이다. 따라서 외부변조기를 사용한 스펙트럼 분할방식 송신기와 달리 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저를 사용하면 50 GHz 채널간격으로 622 Mb/s 신호전송이 가능하였다. 수신기에서 발생하는 비간섭성 광에 의한 비팅잡음은 수신기 대역폭에 비례하므로 만약 신호의 전송속도가 622 Mb/s이하로 감소하면 50 GHz이하 채널 간격의 고밀도 파장분할 다중 방식 전송이 가능하다.

본 논문에서는 하나의 C-band(1550 nm 대역) ASE 광원을 사용하여 WDM-PON에서 상향신호만 전송하였지만, 동일한 방법으로 파장 고정된 Fabry-Perot를 사용하여 하향신호 전송도 가능하다. 특히, 광증폭기의 다른 이득대역(L-band: 1580 nm)을 이용하여 하향신호를 전송하면 하나의 광섬유를 이용한 양방향 전송도 가능하다^[7].

IV. 결 론

중앙기저국에서 주입된 비간섭성 광에 원격으로 파장

고정된 Fabry-Perot 레이저를 사용하여 50 GHz 채널 간격의 고밀도 WDM-PON 구현 가능성을 실험적으로 검증하였다. 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저를 이용하여 50 GHz 채널간격의 파장분할 다중화된 4×622 Mb/s의 신호를 30 km 광섬유를 통해 성공적으로 전송하였다. 또, 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저의 비팅 잡음 특성을 분석하여 Fabry-Perot 레이저가 주입되는 비간섭성 광의 강도 잡음을 억제함을 보였고, 이로 인해 622 Mb/s 전송속도에서 채널 간격을 50 GHz까지 줄일 수 있음을 보였다.

실험적으로 검증된 바와 같이 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저를 사용한 WDM-PON의 채널 간격을 50 GHz로 줄일 경우, 현재 사용되고 있는 EDFA 기반 ASE 광원의 기술적 수준을 고려하면 C-band에서만 약 80 개의 채널을 제공할 수 있다. 따라서 기존의 TDM-PON에 비해 가입자당 전송속도를 증가시킬 수 있을 뿐만 아니라 수용 가능한 가입자 수를 약 2배 이상 늘릴 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] R. D. Feldman, E. E. Harstead, S. Jiang, T. H. Wood, and M. Zirngibl, "An evolution of architectures incorporating wavelength division multiplexing for broadband fiber access," *J. Lightwave Technol.*, vol. 16, no. 9, pp. 1546-1559, 1998.
- [2] M. Zirngibl, C. R. Doerr, and L. W. Stulz, "Study of spectral slicing for local access applications," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 8, no. 5, pp. 721-723, 1996.
- [3] J.-S. Lee, "Signal-to-noise ratio measurement of a 2.5-Gb/s spectrum-sliced incoherent light channel," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 1, no. 1, pp. 94-96, 1997.
- [4] N. Buldawoo, S. Mottet, H. Dupont, D. Sigogne, and D. Meichenin, "Transmission experiment using a laser amplifier-reflector DWDM access network," in *Proc. Eur. Conf. Opt. Commun. '98 (ECOC'98)*, pp. 273-274 Madrid, 20-24 September 1998.
- [5] P. Healey, P. Townsend, C. Ford, L. Johnston, P. Townley, I. Lealman, L. Rivers, and R. Moore, "Spectral slicing WDM-PON using wavelength-seeded reflective SOAs," *Electron. Lett.*, vol. 37, no. 19, pp. 1181-1182, 2001.
- [6] H. D. Kim, S.-G. Kang, and C.-H. 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, 2000.
- [7] 이상목, 최기만, 문실구, 문정형, 이창희 "파장 잠김된 F-P LD를 이용한 파장분할다중방식 수동형 광가입자망 구현," *Photonics Conference*, paper F2B5, 2004.
- [8] F. Mogensen, H. Olesen, and G. Jacobsen, "Locking conditions and stability properties for a semiconductor laser with external light injection," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 21, no. 7, pp. 784-793, 1985.

저 자 소 개



김 현 덕(정회원)

1997년 경북대학교 전자공학과 학사 졸업

1999년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사 졸업

2002년 한국과학기술원 전자전산학과 박사 졸업

2002년~2003년 노베라옵티스코리아 선임연구원

2003년 3월~현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 전임강사

<주관심분야: 통신시스템, 광통신, 광네트워크>