

# WDM-PON에서 원격으로 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저를 사용한 Gigabit Ethernet 상향 신호 전송

## Gigabit Ethernet Upstream Transmission over WDM-PON Employing Remotely Wavelength-Locked Fabry-Perot Lasers

김 현 덕

Hyun Deok Kim

### 요 약

중앙기지국에서 주입된 비간섭성 광에 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저를 사용하여 Gigabit Ethernet 상향 신호 전송 가능성을 검증하였다. WDM-PON에서 원격으로 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저를 이용하여 100 GHz 채널 간격의 파장분할 다중화된 4채널의 Gigabit Ethernet 신호를 30 km 광섬유를 통해 성공적으로 전송하였으며, 수신된 신호의 Q 값은 17.1 dB 이상이었다. 또, 원격으로 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저의 잡음 특성을 분석하였으며, 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저가 비간섭 광의 강도 잡음을 억제하므로 기존의 스펙트럼 분할방식 광송신기보다 약 6.3 dB의 SNR 개선이 가능함을 보였다.

### Abstract

A Gigabit Ethernet upstream transmission over a WDM-PON employing remotely wavelength-locked Fabry-Perot lasers has been demonstrated. We have successfully demonstrated a WDM transmission of four Gigabit Ethernet channels with 100 GHz channel spacing over 30 km conventional single mode fiber. The measured Q-factor was larger than 17.1 dB. We have also investigated the beating noise characteristics of a wavelength-locked Fabry-Perot laser and showed the remotely wavelength-locked Fabry-Perot laser suppresses the intensity noise of the incoherent light injected, which cause a 6.3 dB SNR improvement compared with that of the conventional spectrum-sliced light source.

Key words : Wavelength-Locking, Fabry-Perot Laser, Wavelength-Division Multiplexing, Optical Amplifier, Passive Optical Network

### I. 서 론

Internet의 급격한 확산과 함께 Ethernet이 통신망의 주요한 인프라가 되었으며, 최근에는 광대역 서비스 제공을 위해 Gigabit Ethernet에 관한 연구와 함께 가입자망에서 기존의 광통신 기술과 Gigabit Ethernet 기술을 결합하려는 다양한 시도가 전개되고 있다. 특히, 수동형 광통신망(PON: Passive Optical

Network)을 통해 Gigabit Ethernet을 수용하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 수동형 광통신망은 중앙기지국(CO: Central Office)과 수동형 원격노드(RN: Remote Node) 그리고 가입자단(ONU: Optical Network Unit)으로 구성되며, 원격노드에 전원을 공급하지 않으므로 망의 관리 및 유지보수가 용이한 장점이 있다.

수동형 광통신망은 크게 파장분할 다중방식

「본 연구는 국가지정연구실사업(NRL) 지원으로 수행되었음.」

경북대학교 전자전기컴퓨터학부(School of Electrical Engineering and Computer Science, Kyungpook National University)

· 논문 번호 : 20041124-151

· 수정완료일자 : 2004년 12월 7일

(WDM: Wavelength-Division Multiplexing) 수동형 광통신망과 시분할 다중방식(TDM: Time-Division Multiplexing) 수동형 광통신망으로 구분할 수 있는데, WDM-PON은 TDM-PON에 비해 여러 가지 장점을 제공한다<sup>[1],[2]</sup>. WDM-PON에서는 중앙기지국과 각 가입자단별로 별도의 파장을 할당하여 가상의 점-대-점(virtual point-to-point) 연결경로를 제공하므로 TDM-PON보다 보안성이 우수하다. 또, 광대역 전송이 가능하며 가입자당 수백 Mb/s~수 Gb/s의 대역폭을 제공할 수 있는 장점이 있으므로 Gigabit Ethernet 서비스를 수용하기에 적합하다.

여러 가지 장점에도 불구하고 WDM-PON을 구현하기 위해서는 중앙기지국과 각 가입자단에 반드시 미리 정해진 특정 파장을 출력하는 광원들을 사용해야 하므로 TDM-PON에 비해 광원에 소요되는 비용이 증가하여 초기 구축비용이 비싼 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 기존의 파장분할 다중방식 광전송 장치에 일반적으로 사용되었던 DFB(Distributed Feed-Back) 레이저 대신 저가의 광원을 사용하여 WDM-PON을 구현하는 방안에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

대표적인 예로 LED(Light Emitting Diode)나 EDFA(Erbium-Doped Fiber Amplifier)의 자연방출광을 이용하는 ASE(Amplified Spontaneous Emission) 광원 등 광대역 광원을 사용하는 스펙트럼 분할방식(spectrum-sliced) 광송신기들이 많은 관심을 끌어 왔다<sup>[2]</sup>. 하지만, LED의 경우 출력 파워가 충분하지 않고, ASE 광원의 경우 값비싼 외부 변조기를 추가로 필요로 하므로 WDM-PON에 적용하기에는 많은 제한이 있다. 특히, 이러한 광원들은 비간섭성(incoherent) 광을 출력하기 때문에 본질적으로 비팅 잡음(beat noise)에 의해 신호 품질이 저하되는 문제가 있다<sup>[3]</sup>.

최근에는 반사형 반도체 광증폭기(reflective semiconductor optical amplifier)를 이용한 WDM-PON 광송신기 구현 기술이 제안되었다<sup>[4],[5]</sup>. 하지만, 반사형 반도체 광증폭기의 경우, 한 단면에 high reflection 코팅이 필요할 뿐만 아니라 다른 한 단면에는 반사를 방지하기 위해 AR(anti-reflection) 코팅을 필요로 하는 문제점이 있다. 반사형 광증폭기에 필요한 반사율은 기존의 일반적인 레이저 다이오드 표면 반사율의 10~1% 이하 수준이 되어야 하므로 제작 공정이

복잡해지고, 수율(yield)이 떨어지므로 광송신기의 구현 가격을 낮추는데 장애로 작용한다<sup>[5]</sup>.

이러한 문제점을 극복하기 위해 Fabry-Perot 레이저에 비간섭성을 주입하여 출력 파장을 고정하여 광송신기를 구현하는 기술이 제안되었으며, 또, 제안된 방법을 이용하여 155 Mb/s 전송 실험이 성공적으로 수행되었다<sup>[6]</sup>. 이 기술을 이용하면 중앙기지국에서 비간섭성 광을 주입하여 각 가입자단(Fabry-Perot)의 출력 파장을 원격으로 제어할 수 있으므로 WDM-PON에서 상향신호 전송에 효과적으로 이용할 수 있다.

본 논문에서는 WDM-PON에서 중앙기지국에서 주입되는 비간섭성 광에 출력 파장이 고정된 Fabry-Perot 레이저를 이용하여 Gigabit Ethernet 상향 신호 전송 가능성을 실험적으로 검증한다. 또, 원격으로 출력 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저를 이용한 송신기의 잡음 특성을 분석하여, WDM-PON에서 Gigabit Ethernet 상향신호 전송을 가능케 하는 요인에 대해서 분석한다.

## II. 실험 및 실험결과

중앙기지국에서 비간섭성 광을 주입하여 Fabry-Perot 레이저의 출력 파장을 원격적으로 고정된 Gigabit Ethernet 상향 신호 전송 실험 장치의 구성도는 그림 1과 같다. 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저는 중앙기지국에서 주입되는 비간섭성 광의 파장에 출력 파장이 고정되는데, 주입될 비간섭성 광을 생성하기 위해 중앙기지국에 ASE 광원을 사용하였다. ASE 광원은 EDFA를 이용하여 구현되었으며, ASE 광원의 출력은 광가변감쇄기(VOA)를 이용하여 조절하였다. 중앙기지국에서 생성된 ASE는 원격노드로 전달되는데, 광회전기(optical circulator)를 사용하여 원격노드로 전달될 ASE와 원격노드에서 전달되어온 신호를 분리/결합하였다. 원격노드에서 전달되어온 광신호를 역다중화 하기 위해 채널 간격이 100 GHz인 도파관열 격자 라우터(AWG: Arrayed Waveguide Grating router)를 사용하였으며, 도파관열 격자 라우터의 각 출력단자에는 광수신기를 연결하였다.

중앙기지국에서 생성된 ASE는 광섬유를 거쳐 원

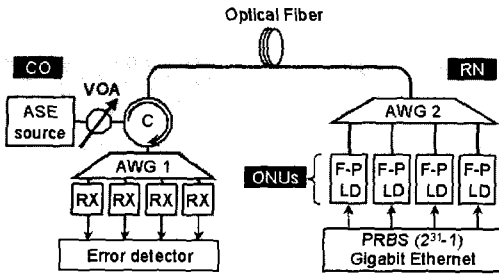


그림 1. WDM-PON에서 원격으로 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저를 이용한 Gigabit Ethernet 상향 신호 전송 실험 장치 구성도

Fig. 1. The experimental setup of Gigabit Ethernet upstream transmission over WDM-PON by using remotely wavelength-locked Fabry-Perot laser.

격노드로 전달되며, 원격노드에 설치된 또 다른 도파관열 격자 라우터(AWG2)에 의해서 파장별로 분리되었다. 원격노드에서 파장별로 분리된 ASE 성분들은 가입자단에 설치된 Fabry-Perot 레이저에 주입되었으며, Fabry-Perot 레이저에 ASE 성분이 주입되면 Fabry-Perot 레이저의 출력 파장이 ASE 성분과 동일한 파장에 고정된다. 따라서 중앙기지국에서 주입된 ASE 성분에 의해 출력 파장이 원격으로 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 문턱전류 값은 약 8~11 mA였다. 가입자단의 Fabry-Perot 레이저들은 의사랜덤부호(PRBS)를 사용하여 Gigabit Ethernet 전송속도, 즉 1.25 Gb/s로 직접 변조되었으며, 레이저에 변조신호로 인가된 의사랜덤부호의 부호 길이는  $2^{31}-1$ 이었다.

실험에서는 4개의 가입단을 가정하였으므로  $4 \times 1.25$  Gb/s의 파장분할 다중화된 상향 신호가 중앙기지국으로 전송된다. 파장분할 다중화된 상향 신호의 채널 간격은 100 GHz(0.8 nm)이고 각 채널은 ITU-T 표준 파장으로 설정하였는데, 첫번째 채널(ch.1)의 파장은 1551.72 nm였고, 네번째 채널(ch.4)의 파장은 1554.12 nm였다. 중앙기지국과 원격노드에 각각 사용된 도파관열 격자 라우터의 3 dB 대역폭은 약 38

GHz였고, 삽입손실은 약 4.1 dB였다. 중앙기지국과 원격노드를 연결하는 광섬유의 길이는 최대 30 km였고, 이 경우 광섬유의 손실은 약 6.1 dB였다. 중앙기지국에 사용된 광가변감쇄기를 이용하여 각 가입자단의 Fabry-Perot 레이저에 주입되는 ASE 파워가 약 -8 dBm이 되도록 조절하였다.

파장 고정된 Fabry-Perot를 사용한 광송신기의 성능은 레이저 전면(front facet)의 반사도(reflectivity)에 영향을 받는다<sup>6)</sup>. 즉, 레이저 전면의 반사도를 낮추면 ASE 주입 효과를 높일 수 있고, 주입되는 ASE가 반사되어 발생하는 비팅 잡음도 감소시킬 수 있다. 실험에서는 제작 공정의 복잡도 및 비용 증가를 최소화하면서도 송신기 성능 향상을 위해 전면에 단층 역반사 코팅(single layer anti-reflection coating)을 한 레이저를 사용하였다. 단층 역반사 코팅은 기존의 레이저 제작 공정에서 출력 파워를 증가시키기 위해 일반적으로 사용되는 방법으로 레이저 제작 공정의 복잡도, 비용 그리고 수율에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있다. 실험에 사용한 레이저의 전면 반사도는 모두 10% 미만이었다.

파장 고정된 Fabry-Perot 레이저에서 소광비와 인접모드 억제율 등은 레이저에 인가되는 직류 바이어스 전류와 변조 전류에 의해 영향을 받으며, 레이저 출력의 잡음 특성도 바이어스 전류와 변조 전류에 따라 달라진다. 특히, 신호의 전송 속도가 증가할수록 잡음 특성이 중요해지므로 실험에서는 레이저 출력의 잡음 성분이 최소가 되도록 각 Fabry-Perot 레이저에 인가되는 직류 바이어스 전류와 변조 전류의 크기를 개별적으로 조절하였다. 이 경우 가입자단 출력의 소광비는 모두 8.7 dB 이상이었으며, 출력 파워는 모두 -8 dBm 이상이었다.

그림 2는 중앙기지국에서 광회전기의 출력단에서 측정된 광스펙트럼이다. 점선은 ASE의 주입이 없는 상태에서 Fabry-Perot 레이저들 자체의 출력을 나타내고, 실선은 ASE의 주입에 의해 가입자단에 있는 Fabry-Perot 레이저들이 원격으로 주입된 비간섭성 광에 출력 파장이 고정된 상태에서 측정된 것이다. 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 계속적

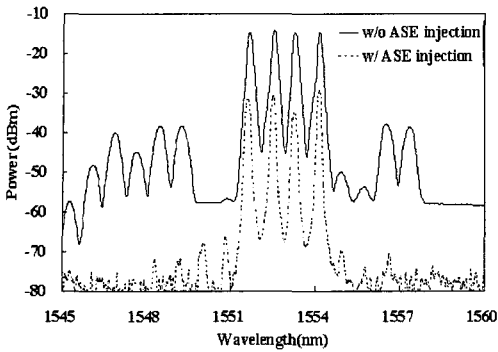


그림 2. 중앙기지국의 광회전기 출력단에서 측정된 광스펙트럼  
 Fig. 2. Optical spectra measured at the output port of the optical circulator in the central office.

으로 변동하였다. 이것은 Fabry-Perot 레이저에서 모드 경쟁(mode competition) 또는 모드 분할(mode partition) 효과 때문이다. 하지만, ASE를 주입하여 Fabry-Perot 레이저의 출력 파장이 주입된 비간섭성 광에 고정된 상태에서 측정된 광스펙트럼은 매우 안정되어 있었으며, 측정된 파워도 ASE 주입 전에 비해 채널별로 15~20 dB 이상 증가하였다. 또 채널 사이의 파워 차이도 1 dB 이내로 균일하였다. 이것은 Fabry-Perot 레이저에 ASE를 주입하여 출력 파장을 고정하면 거의 단일 모드 레이저와 유사한 출력을 나타내기 때문이다.

원격으로 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저를 이용한 Gigabit Ethernet 상향 신호 전송 실험 장치에서 측정된 각 채널별 eye diagram을 그림 3에 나타내었다.

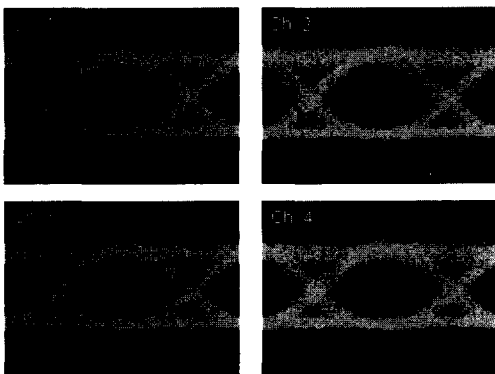


그림 3. 전송거리가 30 km일 때 eye diagram 측정 결과  
 Fig. 3. Eye diagram after 30 km transmission.

이 경우 광섬유의 길이는 30 km였고, 중앙기지국의 수신단에서 대역폭이 약 870 MHz인 PIN photo-diode를 사용하여 측정된 결과이다. 각 채널의 eye diagram은 충분히 열려 있었으며, 모든 채널에서 비슷한 특성을 관찰할 수 있었다.

상향 신호 전송 장치의 성능을 자세히 분석하기 위해 수신기의 decision threshold를 조절하여 광통신 시스템의 Margin을 측정하는 방법을 이용하여 각 채널별 Q 값을 측정하였으며<sup>[7]</sup>, 이때 Q 값은 다음과 같이 정의된다.

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (1)$$

여기서  $I_1$ 과  $I_0$ 는 각각 "1" 레벨과 "0" 레벨의 평균 신호 파워를 나타내며,  $\sigma_1$ 과  $\sigma_0$ 는 각각 "1" 레벨과 "0" 레벨의 표준편차(standard deviation)를 나타내는데, 수신된 신호의 잡음 성분에 의해 결정된다. 만약 Q 값이 3보다 크고, 잡음 성분이 Gaussian 분포를 나타낼 경우, Q 값과 비트 오류(BER: Bit Error Rate)은 다음과 같은 관계를 가진다<sup>[8]</sup>.

$$BER = \frac{1}{2Q\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{Q^2}{2}} \quad (2)$$

그림 4는 각 채널별 Q 값 측정 결과를 나타낸다. Q 값은 가입자단이 중앙기지국에 직접 연결된 경우(back-to-back), 중앙기지국과 가입자단의 거리가 15 km인 경우, 그리고 중앙기지국과 가입자단의 거리가 30 km인 경우에 대해서 각각 측정하였다. Back-to-back에서 측정된 각 채널의 Q 값은 최소 약 18.1 dB 이상이었으며, 중앙기지국과 가입자단의 전송거리가 15 km인 경우 각 채널의 Q 값은 최소 약 18.0 dB 이상이었다. 또, 중앙기지국과 가입자단의 전송거리가 30 km로 증가할 경우 각 채널별 Q 값은 약 17.1 ~ 17.5 dB로 약간 감소하였다. Q 값이 감소한 이유는 광섬유의 색분산 효과에 의한 것이며, 채널별로 Q 값의 감소 정도가 다른 것은 각 채널별 Fabry-Perot 레이저에 인가되는 직류 바이어스 전류와 변조 전류의 크기에 따라 chirping parameter가 다르기 때문이다.

그림 4에 나타낸 Q 값을 비트 오류로 환산하면 Back-to-back에서는 모든 채널의 비트 오류율은 약 2.5

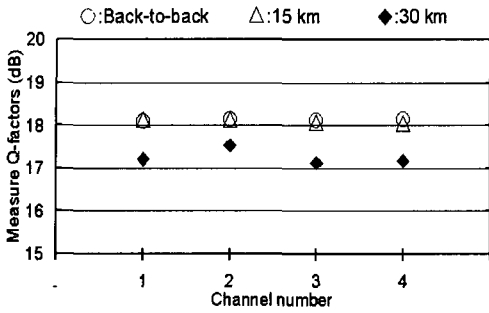


그림 4. 채널별 Q 값 측정 결과  
Fig. 4. Measured Q-parameters.

$\times 10^{-16}$  이하이고, 중앙기지국과 가입자단의 전송거리가 15 km인 경우 모든 채널의 비트 오류율은 약  $3.5 \times 10^{-16}$  이하이며, 중앙기지국과 가입자단의 전송거리가 30 km로 증가할 경우 모든 채널의 비트 오류율은 약  $1.0 \times 10^{-13}$  이하로 일반적인 Gigabit Ethernet 전송 시스템에 요구되는 비트 오류율보다 매우 낮은 값이다. 따라서 중앙기지국에서 비간섭성 광을 주입하여 원격으로 출력 파장을 고정된 Fabry-Perot 레이저를 사용한 WDM-PON에서 Gigabit Ethernet 상향 신호 전송이 가능함을 알 수 있다.

### III. 분석 및 고찰

본 논문에서 제안한 바와 같이 외부에서 주입된 비간섭성 광에 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저를 이용하여 파장분할 다중방식 광송신기를 구현하면 채널 간격과 전송속도가 신호 품질에 영향을 미치게 된다. 일반적으로 DFB 레이저와 같은 단일모드 광원을 사용하는 파장분할 다중방식 광송신기의 특성은 채널 간격에 무관하고, 다만 채널 간격이 좁아지면 광섬유의 비선형성이 전체 전송장치의 성능에 결정적인 영향을 미치게 된다. 하지만, 비간섭성 광이 관련된 광송신기에서는 송신기 자체의 성능이 채널 간격에 직접적으로 영향을 받으며, 신호의 전송속도가 증가하면 비간섭성 광에 의한 비팅 잡음의 효과도 증가한다. 따라서 광가입자망에서 DFB 레이저 대신 비간섭성 광을 사용하여 Gigabit Ethernet과 같은 광대역 서비스를 수용하기 위해서는 비팅 잡음에 대한 분석이 필요하다.

대표적인 예로 ASE 광원을 사용한 스펙트럼 분할

방식 통신 시스템은 ASE-ASE 비팅 잡음에 의해 성능이 제한되며, 채널 간격이 좁아지거나 전송속도가 증가하면 상대적으로 ASE-ASE 비팅잡음의 영향이 증가한다<sup>[3]</sup>. 스펙트럼 분할방식 통신 시스템에서와 같이 ASE-ASE 비팅 잡음이 우세하면 수신기에서 열잡음, 산탄잡음 등의 효과를 무시할 수 있으며, 이 경우 수신기의 총 잡음 파워는 다음과 같이 근사화할 수 있다<sup>[9]</sup>.

$$\sigma^2 \approx \frac{I_{ASE}^2 B_e}{B_o} (2B_o - B_e) \approx \frac{2I_{ASE}^2 B_e}{B_o} \quad (3)$$

여기서  $I_{ASE}$ 는 수신기에 출력되는 ASE 신호 전류 크기,  $B_e$ 는 수신기 대역폭,  $B_o$ 는 광필터 대역폭을 각각 나타내며, 수신기 대역폭은 신호의 전송속도와 관련이 있고, 광필터 대역폭은 채널 간격과 관련이 있다. 식 (3)에서는 수신기의 대역폭이 광필터의 대역폭에 비해 무시할 수 있을 정도로 작은 경우, 즉  $B_e \ll B_o$ 인 경우를 가정하였다.

식 (3)에 나타난 비팅 잡음의 파워는 광필터와 수신기의 주파수 응답 특성이 이상적인 구형파(rectangular) 형태인 경우를 가정한 것이다. 하지만, 실제 광필터와 수신기의 주파수 응답 특성은 이상적인 구형파 형태가 아니므로 power spectral density를 이용하여 주파수 응답 특성의 차이를 보정할 필요가 있다. 이상적인 구형파 형태 필터의 대역폭(B)은 power spectral density를 이용하여 다음과 같이 정의된다<sup>[10]</sup>.

$$B = \frac{\left[ \int_{-\infty}^{\infty} P(f) df \right]^2}{\int_{-\infty}^{\infty} P^2(f) df} \quad (4)$$

여기서  $P(f)$ 는 power spectral density를 나타내며, 광필터나 수신기의 주파수 응답 특성에 따라 결정된다. 따라서 실제 주파수 응답 특성을 대입하여 이상적인 구형파 형태를 가정한 경우의 대역폭(B)과 광필터나 수신기의 대역폭( $\Delta f$ )을 계산하면  $B = k \Delta f$ 의 관계가 성립한다. 여기서  $k$ 는 상수로서 광필터나 수신기의 주파수 응답 특성에 따라 달라지는데, 대표적으로 광필터나 수신기가 Gaussian 형태의 주파수 응답 특성을 갖는 경우  $k$  값은 1.5이고, one-pole 저대역 통과 필터 형태의 주파수 응답을 갖는 경우  $k$  값은  $\pi/2$ 이다<sup>[11]</sup>.

식 (3)에서 계산된 비팅 잡음 파워로부터 수신기 출력의 신호 대 잡음비(SNR)를 구할 수 있다. ASE를 스펙트럼 분할하여 사용하는 경우, ASE 자체가 신호 성분이기 때문에 신호 파워는 수신된 ASE 신호 전류 값의 제공이 되며, SNR은 다음과 같다.

$$SNR = \frac{I_{ASE}^2}{\sigma^2} = \frac{B_o}{2B_e} \quad (5)$$

ASE 광원을 이용한 스펙트럼 분할방식 통신 시스템에서와 같이 ASE-ASE 비팅 잡음이 우세하고, 소광비(extinction ratio)가 이상적으로 무한대라고 가정하면 식 (1)에서 "0" 레벨에서의 열잡음 등을 무시할 수 있으므로  $SNR=Q^2$ 의 관계가 성립한다. 따라서 식 (2)로부터 다음의 관계가 성립한다.

$$BER = \sqrt{\frac{B_e}{\pi B_o}} \exp\left(-\frac{B_o}{4B_e}\right) \quad (6)$$

따라서 스펙트럼 분할방식 통신 시스템의 비트 오류율은 수신기의 대역폭과 광필터의 대역폭에 의해 결정된다. 일반적으로 수신기 대역폭은 ISI(Inter-Symbol Interference)와 잡음 특성을 고려하여 결정되며, 신호의 전송속도에 비례하여 증가한다. 또 광필터의 대역폭은 과장분할 다중방식 통신 시스템의 채널 간격과 연관되어 있으며, 채널 간격이 감소하면 광필터의 대역폭도 비례하여 감소한다. 따라서 특정 전송속도에서 원하는 비트 오류율을 만족시키기 위해서는 광필터 대역폭, 즉 채널 간격을 조절하여야 한다.

식 (6)을 이용하여 광필터의 대역폭에 따른 비트

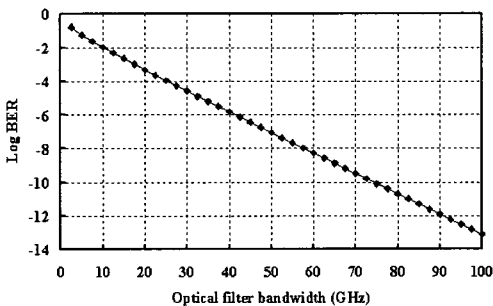


그림 5. 일반적인 스펙트럼 분할방식 통신 시스템에서 광필터의 대역폭에 따른 최소 비트 오류율  
Fig. 5. The minimum bit error rate as a function of optical filter bandwidth of a conventional spectrum-sliced transmission system.

오율을 계산한 결과를 그림 5에 나타내었다. 수신기와 광필터의 주파수 응답 특성은 실제 사용된 광소자의 특성을 고려하여 수신기 대역폭은 전송속도의 약 0.7배인 870 MHz, 수신기의 주파수 응답은 one-pole 저대역 통과 필터, 광필터의 주파수 응답은 Gaussian 형태라고 가정하였다. 또, 신호의 전송속도는 Gigabit Ethernet 전송속도인 1.25 Gb/s였다.

광필터의 대역폭이 감소할수록 비트 오류율이 증가하므로 원하는 비트 오류율을 얻기 위해서는 반드시 채널 간격을 일정 수준 이상으로 유지하여야 한다. 예를 들어 Gigabit Ethernet 전송속도에서  $10^{-10}$  이하의 비트 오류율을 얻기 위해서는 광필터의 대역폭이 75 GHz 이상이 되어야 함을 의미한다. 일반적으로 Gaussian 형태의 주파수 응답을 가진 도파관형 격자 라우터의 대역폭은 채널 간격의 약 0.4배이므로 채널 간격이 187.5 GHz 이상이 되어야 함을 의미한다.

비간섭성 광에 의한 비팅 잡음 효과를 보다 자세히 분석하기 위해 그림 6과 같은 실험 장치를 구성하였다. 실험에서는 외부변조기를 사용하는 기존의 스펙트럼 분할방식 광송신기와 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저를 사용하는 송신기에 대해서 각각 비팅 잡음의 효과를 분석하였다. 외부변조기를 제외한 다른 소자들은 모두 그림 1에서 사용된 소자와 동일하다. 따라서 채널 간격 100 GHz인 도파관형 격자 라우터의 3 dB 대역폭은 약 38 GHz였고, 주파수 응답 특성은 Gaussian 형태며, 수신기의 대역폭은 약 870 MHz였다.

그림 7은 송신기의 출력단에서 측정된 광스펙트

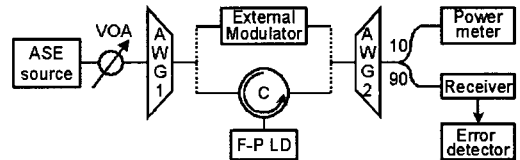


그림 6. 일반적인 스펙트럼 분할방식 광송신기와 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저를 사용한 광송신기에서 비팅 잡음 특성을 분석하기 위한 실험 장치도  
Fig. 6. Experimental setup to compare the beating noise characteristics of a conventional spectrum-sliced light source and a wavelength-locked Fabry-Perot laser.

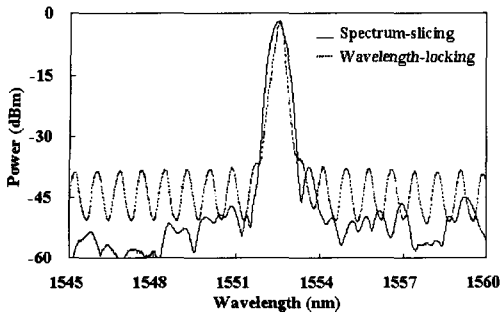


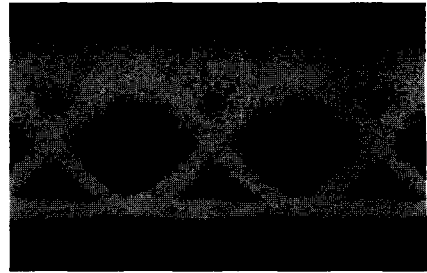
그림 7. 스펙트럼 분할방식 송신기와 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저를 사용한 송신기의 출력 스펙트럼

Fig. 7. Measured output optical spectra of a conventional spectrum-sliced light source and a wavelength-locked Fabry-Perot laser.

럼들이다. 외부 변조기를 사용한 스펙트럼 분할방식 광송신기의 경우, ASE 광원의 출력은 도파관열 격자 라우터를 거쳐 스펙트럼 분할된 후, 외부 변조기를 거쳐 출력되는데, 외부 변조기의 출력단에서 측정된 스펙트럼은 도파관열 격자 라우터의 통과대역 특성과 동일한 스펙트럼폭을 갖는다. 하지만, 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저 송신기 출력의 스펙트럼 폭은 외부에서 주입된 ASE 스펙트럼폭에 비해 약 1/2로 좁아져 출력되었다.

그림 8은 스펙트럼 분할방식 송신기와 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저 송신기의 출력의 eye diagram 측정 결과이다. 외부 변조기를 사용한 스펙트럼 분할방식 송신기의 경우, ASE-ASE 비팅 잡음의 효과에 의해 “1” 레벨에 잡음이 많이 분포하였다. 샘플링 오실로 스코프를 이용한 SNR 측정 결과, SNR은 약 12.2 dB였다. 측정된 SNR 값을 식 (5)에 대입하면 비트 오류율은  $1.2 \times 10^{-5}$ 에 해당한다. 따라서 100 GHz 채널 간격으로 기존의 ASE 광원을 이용한 스펙트럼 분할방식으로 Gigabit Ethernet 신호를 전송할 경우, 비트 오류율을  $1.2 \times 10^{-5}$  이하로 낮출 수 없으므로 Gigabit Ethernet 신호 전송이 불가능하다.

파장 고정된 Fabry-Perot 레이저를 사용하는 송신기의 출력은 스펙트럼 분할방식 송신기의 출력에 비해 비팅 잡음이 현저히 감소되었으며, 측정된 신호 대 잡음비는 약 18.5 dB 이상이었다. 따라서 스펙트럼 분할방식 송신기에 비해 신호 대 잡음비가 6.3 dB



(a) 스펙트럼 분할방식 송신기  
(a) A conventional spectrum-sliced light source



(b) 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저를 사용한 송신기  
(b) A wavelength-locked Fabry-Perot laser

그림 8. Eye diagram 측정 결과

Fig. 8. Measured eye diagram.

이상 개선되었다. 그림 4에 나타난  $Q$  값과 여기서 측정된 SNR 사이의 오차는 수신기의 주파수 응답 특성, 소광비 등의 차이에서 기인한다.

이처럼 주입된 비간섭성 광에 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저의 출력에서 측정되는 비팅 잡음이 현저히 감소하는데, 이것은 Fabry-Perot 레이저에 비간섭성 광이 입력되면 레이저 내부의 이득 매질에서 이득 포화(saturation) 현상에 의해 강도(intensity) 잡음이 감소하기 때문이다. 따라서 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저를 이용한 송신기는 스펙트럼 분할방식 송신기에 비해 출력 스펙트럼폭이 약 1/2로 감소하였기 때문에 광섬유의 색분산에 의한 신호 왜곡도 감소하고, 비팅 잡음도 약 1/2로 감소하였으므로 WDM-PON에서 Gigabit Ethernet과 같은 광대역 서비스를 경제적으로 수용하는데 적합하다.

실험에서는 기존의 155 Mb/s 전송 실험<sup>16)</sup>에 비슷한 파워의 ASE를 주입하였지만, 레이저 전면의 반사도를 낮춤으로써 ASE 주입 효과를 높여 이득 포화에 의한 강도 역제 효과를 증가시켰다. 또 레이저에 인가되는 바이어스 전류와 변조 전류 크기에 따

라 레이저 내부의 이득 특성도 달라지므로 직류 바이어스 전류와 변조 전류 크기를 조절함으로써 강도 잡음을 억제하도록 하였다. 따라서 기존의 레이저 제작 공정에 일반적으로 이용되는 단층 반사 방지 코팅과 레이저에 인가되는 전류의 크기를 조절함으로써 원격으로 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저를 이용하여 Gigabit Ethernet 상향 신호 전송이 가능함을 보였다.

본 논문에서는 하나의 C-band(1,550 nm 대역) ASE 광원을 사용하여 WDM-PON에서 상향신호만 전송하였지만, 동일한 방법으로 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저를 사용하여 하향신호 전송도 가능하다. 특히, 광증폭기의 다른 이득대역(L-band: 1580 nm)을 이용하여 하향신호를 전송하면 하나의 광섬유를 이용한 양 방향 전송도 가능하다<sup>[12]</sup>.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 WDM-PON에서 중앙기지에서 주입된 비간섭성 광의 출력 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저를 사용하여 Gigabit Ethernet 상향신호 전송 가능성을 실험적으로 검증하였다. 원격으로 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저를 이용하여 100 GHz 채널 간격의 파장분할 다중화된 4×1.25 Mb/s의 신호를 30 km 광섬유를 통해 성공적으로 전송하였으며, 수신된 신호의 Q 값은 17.1 dB 이상이였다. 또, 원격으로 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저의 비팅 잡음 특성을 분석하여 Fabry-Perot 레이저가 주입되는 비간섭성 광의 강도 잡음을 억제함을 실험적으로 보였다. 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저는 ASE 광원의 강도 잡음을 약 1/2로 줄일 수 있어 약 6.3 dB의 SNR 개선이 가능케 하였고, 파장 고정 과정에서 스펙트럼 폭도 주입된 ASE에 비해 약 1/2로 감소하였다. 따라서 원격으로 파장 고정된 Fabry-Perot 레이저를 이용하면 Gigabit Ethernet과 같은 광대역 서비스 효과적으로 수용할 수 있으며, 광대역 전송이 가능하므로 FTTH(Fiber-To-The-Home) 뿐만 아니라 보다 넓은 대역폭을 요구하는 FTTC(Fiber-To-The-Curb)나 FTTP(Fiber-To-The-Pole)에도 응용할 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)*, Madrid, pp. 273-274, Sep. 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. 3, 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] N. S. Bergano, W. Kerfoot, and F. W. Davison, "Margin measurements in optical amplifier system", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 5, no. 3, pp. 304-306, 1993.

[8] R. F. Smith, S. D. Personick, "Semiconductor devices for optical communication", *Topics in Applied Physics*, H. Kressel, Ed. Berlin: Springer, vol. 38, pp. 148, 1980.

[9] N. A. Olsson, "Lightwave systems with optical amplifiers", *J. Lightwave Technol.*, vol. 7, no. 7, pp. 1071-1082, 1989.

[10] P. R. Morkel, R. I. Laming, and D. N. Payne, "Noise characteristics of high-power doped-fiber superluminescent sources", *Electron Lett.*, vol. 26, no. 2, pp. 96-98, 1990.



[11] J. S. Lee, Y. C. Chung, T. H. Wood, J. P. Meester, C. H. Joyner, C. A. Burrus, J. Stone, H. M. Presby, and D. J. DiGiovanni, "Spectrum-sliced fiber amplifier light source with a polarization-insensitive electroabsorption modulator", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 6, no. 8, pp. 1035-1037, 1994.

[12] 이상목, 최기만, 문실구, 문정형, 이창희, "파장 잠김된 F-P LD를 이용한 파장분할다중방식 수동형 광 가입자망 구현", *Photonics Conference*, paper F2B5, 2004.

## 김 현 덕



1997년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)

1999년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)

2002년 2월: 한국과학기술원 전자전산학과 (공학박사)

2002년 2월~2003년 2월: Novera

Optics Korea 선임연구원

2003년 3월~현재: 경북대학교 전자전기공학부 전임강사  
[주 관심분야] 통신시스템, 광통신, 대용량 네트워크