

# WDM-PON 기술

Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network Technology

## 광대역통합망기술 특집

박만용 (M.Y. Park)	WPON기술팀 선임연구원
김태연 (T.Y. Kim)	WPON기술팀 선임연구원
정의석 (E.S. Jung)	WPON기술팀 선임연구원
유정주 (J.J. Yoo)	WPON기술팀 책임연구원
김병휘 (B.W. Kim)	WPON기술팀 팀장
김봉태 (B.T. Kim)	광통신연구센터 센터장

## 목 차

- .....
- I . 서론
  - II . WDM-PON 광가입자망 광원
  - III . 광가입자망 구성
  - IV . 결론

WDM-PON은 가입자별로 파장을 독립적으로 할당하여 전송로를 구성하는 방식으로 전송 프로토콜에 관계없이 전송이 가능하고, 전용선 수준의 대역폭 제공, 전송속도의 제한이 없으며, 서비스 품질을 보장하고, 보안성이 뛰어난 차세대 FTTH 기술로 평가 받고 있다. 특히 고성능, 저가인 광소자를 포함한 광모듈의 조기 개발이 FTTH 네트워크 초기 시장 및 서비스를 선점하게 될 것으로 예상된다. 본 논문은 WDM 기반 수동형 광가입자망용 광원, 이러한 광원과 다중화 기술에 따른 WDM-PON, WDM/TDM, WDM/SCM 등 다양한 수동형 광가입자망 구성 기술을 소개한다.

## I. 서론

인터넷 이용자 수의 급증, 속도의 고속화, 그리고 서비스형태가 단순한 인터넷 접속에서 콘텐츠 전달망(CDN), 멀티미디어 웹호스팅 등 새로운 통신사업의 출현으로 통신 트래픽은 가입자망에 집중될 것으로 예상된다. 국간망에서는 하나의 광섬유에 여러 파장의 광신호를 동시에 전송하여 용량을 증대하는 WDM 등의 기술을 이용해 테라급까지 증가하고 있고, LAN 전송속도도 10Mbps 혹은 100Mbps급에서 출발하여 Gbps급까지 향상되고 있다[1]-[3]. 반면, xDSL 및 케이블 모뎀 기반의 가입자망은 고품격의 화질과 실시간으로 제공되는 다양한 멀티미디어 서비스들을 위한, 그리고 가입자망에 집중되는 트래픽을 위한 충분한 대역 및 전송거리를 제공하는 데 한계를 보이고 있다.

사용자 계층에 따라 다양한 대역폭 수요가 발생함에 따라 현재의 Mbps급의 가입자망을 가입자 당 10Mbps~10Gbps로 확대함으로써 넓은 범위에서 사용자의 요구에 따라 적절한 대역폭을 제공할 수 있는 가입자망 구축이 요구된다. 이에 가입자망의 병목 현상을 해소하고, 다양한 서비스 품질을 지원하면서 고속화된 데이터 전송을 위해 새로운 WDM 기반 광가입자 액세스망에 대한 망 구성과 광소자에 대한 지대한 관심과 집중적인 연구 개발이 추진되고 있다.

FTTH 구축을 위한 일반적인 PON은 전화국(CO) 측에 위치하는 OLT, 사용자 측내 장치 혹은 그 주변에 위치하는 ONU 및 ONT, 그리고 이들은 통상 tree topology로 형성되어 한 개의 OLT와 다수 개의 ONU/ONT를 연결하는 광섬유 및 cascade로 연결된 한 개 이상의 스플리터로 구성된다. 특히 PON의 수동 소자 부분은 스플리터와 광섬유로서, 이는 OLT와 사용자 영역인 ONU와 ONT에 위치하는 상대적으로 복잡한 능동 소자 부분과 구별된다. 즉 optical splitter를 사용함으로써 광섬유 및 유지 보수비용의 절감, 무급전, 소형의 설치 공간, 그리고 설치비용이 저렴한 장점이 있다. PON은 다양한

다중화 기술을 통해 OLT와 ONU/ONT간 연결이 설정되며, 몇 가닥의 광섬유 또는 어떤 광섬유로 전송되느냐에 따른 공간 도메인, 어떤 파장의 빛을 사용하는지에 따른 주파수 도메인, 그리고 패킷 전송 시간구간 제어와 패킷선택 방식의 시간 도메인의 조합이라 할 수 있다[4].

시간 도메인 방식의 TDM 기반 PON이 갖는 전송 용량의 확장 한계와 가입자 수의 제한을 극복하고, 가입자 당 독립 파장을 할당함으로써 가입자의 대역폭에 제한을 받지 않으며, 보안성이 우수하고, 각 가정까지 광파이버를 연결하는 차세대 광가입자망인 WDM-PON에 대해 미국, 유럽, 일본 등을 중심으로 연구 개발이 진행되고 있다. 또한 WDM-PON은 탁월한 광 전송 특성 및 다중화 기술을 이용함으로써 기존의 sites 수를 줄여 단순화하고 한 개 site가 커버하는 서비스 영역을 광역화하고, 수익을 창출하는 다양한 애플리케이션 및 서비스를 탑재한 가입자 망의 기술로 진화되고 있다.

본 고의 II장에서 wavelength-locked FP-LD, reflective semiconductor optical amplifier, 그리고 tunable LD 등의 WDM 광가입자망용 광원을 살펴 본다. 이어 III장에서는 WDM-PON 망, WDM과 TDM을 조합한 hybrid PON 망, WDM/SCM PON 망 등 WDM 기반의 다양한 가입자망 구성 기술을 소개한다. 마지막으로 본 논문의 요약 및 현안 제시를 통해 결론을 맺는다.

## II. WDM-PON 광가입자망 광원

경제적인 WDM 가입자망 시스템을 구현하기 위해서는 안정적이고 가격효율적인 광원의 개발이 필수적이다. 특히, WDM 가입자망 시스템은 가입자마다 특정 파장이 지정되어 통신이 이루어지기 때문에 지정된 파장에 무관하게 가입자마다 동일한 광원을 제공할 수 있는 wavelength-independent 광원에 대한 연구가 이루어져야 한다. 이러한 colorless 광원 연구의 일환으로 최근 WL FP-LD, RSOA, PLC-ECL에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본

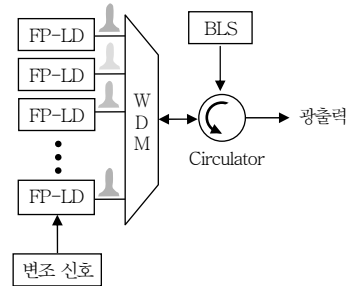
장에서는 이러한 광원들의 특징과 성능, 앞으로 해결해야 할 과제에 대해 살펴본다.

### 1. Wavelength-locked FP-LD

기존의 장거리 WDM 망에서 사용되었던 DFB-LD는 정밀한 온도제어가 필요하고 고가의 패키징이 요구되므로, 저가의 TO-CAN 타입의 FP-LD를 WDM 가입자망의 광원으로 사용하기 위한 연구가 진행되고 있다. 하지만, FP-LD를 WDM 가입자망에 사용할 경우 모드분할잡음(mode partition noise)으로 인해 전송 특성이 저하되는 단점이 있다[4]. 이러한 모드분할잡음을 억제하기 위해, FP-LD에 외부 광원을 주입시켜 DFB-LD와 같은 단일 모드 광원으로 동작시키려는 연구가 이루어지고 있으며, WL FP-LD 구조가 가장 관심을 모으고 있다[5]. 기존의 injection-locked FP-LD의 주입광원은 DFB-LD와 같은 단일 모드 광원인데 비해, 이 구조의 특징은 주입광원이 중앙기지국에 위치한 EDFA나 SLED와 같은 incoherent한 특성의 broadband 광원(BLS)이라는 것이다. 기존의 injection-locking의 구조에서는 여러 개의 FP-LD를 운영하기 위해 그와 동일한 개수의 주입할 DFB-LD가 필요하고, injection-locking의 성능이 DFB-LD에서 출력된 광신호의 편광에 따라 민감한 단점이 있었다. 하지만, WL FP-LD의 구조에서는 여러 개의 FP-LD를 운영하기 위해 단지 한 개의 BLS를 필요로 하며, BLS의 출력광의 특성은 incoherent 하기 때문에 편광에 무관한 장점이 있다.

(그림 1)은 wavelength-locked FP-LD의 구조를 보여주고 있다. BLS에서 나온 넓은 스펙트럼의 빛은 circulator와 WDM을 통해 spectrum-spliced 되어 각각의 FP-LD에 입력된다. FP-LD에 입력된 spectrum-sliced BLS에 가장 가까운 모드로 FP-LD의 전체 파워가 집중되어 마치 DFB-LD와 같은 단일 모드 광원으로 동작하게 된다.

이러한 WL FP-LD의 구조를 사용하여 전송 가능한 최대 데이터 레이트는 FP-LD로 주입되는 파



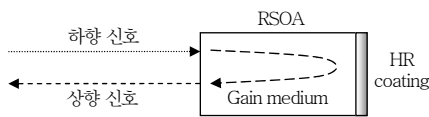
(그림 1) Wavelength-locked FP-LD의 구조

워와 FP-LD의 AR 코팅 비율에 의해 결정된다. 예를 들어, 1Gb/s의 데이터를 전송하기 위해 0.1%의 AR 코팅된 FP-LD에 주입되어야 하는 파워가 -8 dBm이라면, 0.01%의 AR 코팅된 FP-LD의 경우는 주입되어야 하는 파워가 좀더 감소할 것이다. 이러한 목적으로 기존의 FP-LD 대신 RSOA를 사용한 구조도 발표되었다. 하지만, bulk-type RSOA를 사용할 경우 MQW 방식의 FP-LD를 사용할 경우보다 온도에 대해 민감하기 때문에 현재까지는 FP-LD가 선호되고 있다. 이 때, FP-LD는 특별한 온도 제어 없이(uncooled condition) 넓은 범위의 파장에 대해 발전할 수 있도록 넓은 gain 선포를 가져야 한다. 최근 WL FP-LD를 사용하여 uncooled 조건으로 70도의 온도의 범위에 대해 155Mb/s 데이터를 사용하여 에러 없이 전송이 가능하다고 보고되었다[6]. 또한 높은 데이터 레이트의 신호를 전송하려면 FP-LD에서 모드 분할 잡음을 더욱 억제하여 전체 잡음 레벨을 낮춰야 하므로 더 많은 주입파워를 필요로 한다. 예를 들어, 155Mb/s를 전송할 때 -20dBm 정도의 주입파워가 필요하다면, 1.25Gb/s를 전송할 때에는 -10dBm 이상의 주입파워가 필요할 것이다. 이와 같이 전송 데이터 레이트와 AR 코팅 비율에 따라 결정되는 FP-LD에 주입되는 입력 파워의 조건에 의해 망의 전체 전력 예산이 결정된다. 또한, FP-LD에 주입되는 BLS의 잡음 특성에 의해 WL FP-LD의 잡음특성이 좌우되는 것을 관찰할 수 있다. 그래서, 최근 기존의 EDFA에서 출력된 BLS 대신 두 개의 FP-LD를 이용한 BLS를 사용하여 WL FP-LD의 잡음 특성을 개선시킨 구조가 제안되었다

[7],[8]. 하지만, 현재까지 WL FP-LD를 사용하여 전송 가능한 최대 데이터 레이트는 실험적으로 1.25Gb/s라 알려져 있으며 정확한 분석은 이루어져 있지 않다. 따라서, 향후 WL FP-LD의 잡음 특성 및 직접 변조 특성과 그에 따른 전송특성의 한계에 대한 체계적이고도 이론적인 접근이 이루어져야 할 것이다[9].

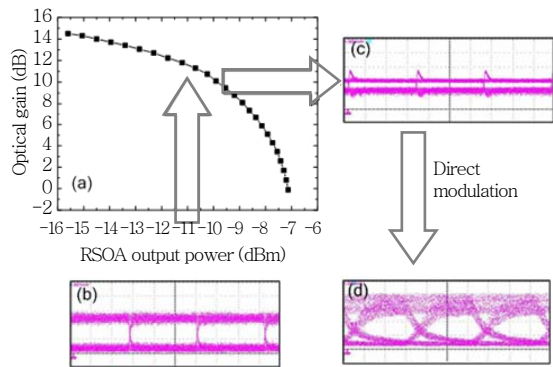
## 2. Re-modulation Scheme

앞에서 살펴보았던 WL FP-LD와 같이 추가의 BLS를 사용하지 않고, 하향에서 내려온 광신호를 직접 재변조하여 사용하는 loop-back형 WDM-PON을 위한 RSOA가 활발히 연구되고 있다. (그림 2)는 이러한 RSOA의 구조를 설명하고 있다. 현재 개발되는 RSOA는 active region과 passive waveguide로 구성된다. Active region은 InGaAsP bulk type으로 제작되었으며, active waveguide의 길이는  $400\mu\text{m}$ , passive waveguide의 길이는  $500\mu\text{m}$ 이다. Passive waveguide는 anti-reflection coating( $<10^{-4}$ )을 위해 광출력면과 7도 정도 기울어진 waveguide와 spot-size converter로 이루어져 있다. RSOA는 경제적인 TO-CAN type의 패키징을 이용하기 위해 전체 칩 길이는  $1000\mu\text{m}$  이하로 만들어져 있다.



(그림 2) RSOA의 구조

(그림 3)은 RSOA에서 gain-saturation 특성을 이용하여 상향신호로 재변조되는 과정을 보여주고 있다. (그림 3a)와 같이 RSOA gain은 RSOA에 입력되는 파워가 커질수록 감소하게 된다. 우리가 이러한 saturation 영역에서 RSOA를 동작시키게 된다면 입력 광신호가 1-level일 때 갖는 gain 보다 0-level 일 때 갖는 gain이 더 크게 된다. 따라서, 결과적으로 (그림 3b)와 같은 광신호가 RSOA에 입력되면 (그림 3c)와 같이 소광비가 감소된 광신호가



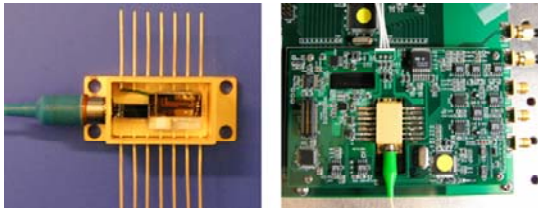
(그림 3) RSOA의 Gain-saturation 특성과 재변조 결과

출력된다. 이를 상향 신호로 직접 변조하게 되면 최종적으로 (그림 3d)와 같은 형태의 eye diagram을 가지게 된다.

WDM 광가입자망용으로 제작된 RSOA의 경우 gain이 3dB 감소하는 입력파워의 크기(input saturation power)는 입력 파장과 편광, RSOA의 gain peak에 따라 다르지만, 보통  $-15\text{dBm}$ 에서  $-20\text{dBm}$  사이의 값을 갖게 된다. 하지만, RSOA의 경우 bulk 타입을 사용함으로써 편광 특성을 향상시킨 반면, 고온에 따른 온도 특성이 좋지 않아 TEC를 통해 온도 제어를 해주어야 한다는 단점이 있다. 또한 RSOA의 input saturation 파워의 크기는 RSOA의 ASE 출력에 반비례하는 특성을 가지고 있기 때문에 파장에 대해 폭넓게 사용될 수 있는 RSOA를 개발하기 위해서는 파장에 따라 gain이 일정한 넓은 gain-bandwidth를 가지는 RSOA에 대한 연구도 시급하다.

## 3. Tunable Source

지금까지 기술한 WL FP-LD와 re-modulation을 위한 RSOA의 성능은 주입되는 광원의 특성에 의해 좌우될 뿐만 아니라, 직접 변조가 가능한 데이터 레이트가 1.25Gb/s로 제한되는 단점이 있었다. 이러한 점에서 궁극적인 WDM 광가입자망의 광원은 경제적이면서 2.5Gb/s 이상의 직접변조가 가능한 파장가변레이저라고 할 수 있다. 이러한 연구의



(그림 4) Prototype의 PLC-ECL와 Evaluation Board

일환으로 양산성이 우수한 PLC 기반의 파장 가변형 레이저에 대한 연구가 진행되고 있다. 이 레이저는 기존의 광원이 능동 정렬을 통해 패키징하는 반면 수동 정렬을 통해 양산을 용이하게 하여 광학적 특성과 저가격이라는 두 가지 목적을 동시에 달성하는 것을 목표로 하고 있다. 이러한 prototype의 저가형 파장 가변 레이저는 (그림 4)와 같은 형태를 가진다.

이 레이저는 기본적으로 LD가 gain medium의 역할을 하고, 파장 가변 폴리머 WBG이 파장 선택 feedback mirror로 동작하는 external cavity 방식이다. 발진 파장은 폴리머 물질의 thermo-optic 특성을 사용하여 조정하며, 최근 논문에서는 100GHz 간격의 32개의 채널을 포함할 수 있는 26nm 범위에 대해 파장 가변 특성을 보이고 각각의 채널에 대해 1.25Gb/s로 직접 변조가 가능하다고 보고하였다 [10]. 이러한 가변 레이저의 장기간의 신뢰성을 보장하기 위해 고가의 wavelength locker를 사용하지 않고, 패키지의 구조를 최적화하는 방법 외에도 폴리머 물질과 WBG의 특성을 안정화하는 것에 연구의 초점을 맞추어야 할 것이다.

### Ⅲ. 광가입자망 구성

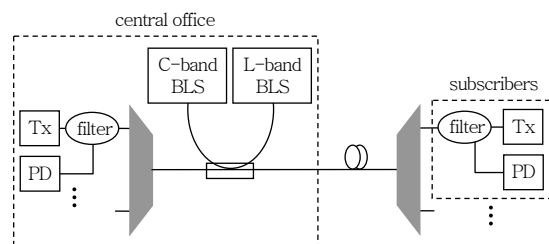
가입자망에서의 망 구성 요소는 크게 OLT, RN 및 ONT로 나눌 수 있다. OLT는 전화국 내의 국사나 MSO의 운용국에 해당하는 CO에 설치되며, 외부의 유무선망과 연동되어 가입자에게 필요한 정보를 제공하고, 전체 가입자망의 유지 보수, 감시 제어 및 운용에 관한 전반적인 역할을 담당한다. RN은 가입자 부근의 외부(전주, 옥외 단자함)나 맨홀 또는 건

물 내에 위치하며, 망의 구성 형태에 따라 수동 또는 능동 소자나 장비들이 위치한다. ONT는 가입자 맥 내에 위치하며 가입자 단말이 여기에 연결된다. 이하 WDM 기반의 광가입자망을 WDM-PON 망, WDM/TDM 망, WDM/SCM-PON 망으로 대별하여 각각의 특성을 상술한다.

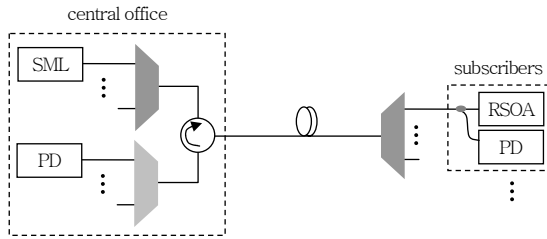
#### 1. WDM-PON 망

기존의 (그림 5)는 WL FP-LD가 양방향 WDM 광가입자망에 사용된 예를 보여준다. 중앙기지국의 BLS에서 출력된 빛은 MUX/DMUX로 사용되는 WDM 필터를 통과하면서 필터의 통과대역만큼 선폭이 제한된 후 각각의 FP-LD에 주입된다. 여러 개의 모드로 발진하던 FP-LD의 모드는 주입된 파장에 가장 가까운 모드로 전체 파워가 집중되어 DFB-LD와 같은 단일 모드 광원으로 동작하게 된다[4]. 이러한 WL FP-LD는 (그림 5)와 같이 양방향 WDM 광가입자망에 쉽게 적용될 수 있다. 중앙기지국의 광원을 위해서는 L-band BLS를 사용하고, 가입자단의 광원을 위해서는 C-band BLS를 사용하여 중앙기지국의 FP-LD는 L-band로, 가입자단의 FP-LD는 C-band로 발진하게 하였다. 최근에는 가입자의 수를 늘리기 위해 채널 당 파장 간격을 좁히거나, 기존의 WDM-PON 망에 TDM과 SCMA를 hybrid한 형태의 망이 제안되었다[11]-[13].

앞에서 설명한 WL FP-LD의 경우 중앙기지국과 가입자단의 광원 외에 추가적으로 BLS가 필요하고, BLS를 구성하는 EDFA 또한 고가의 소자이다. 이러한 추가적인 광원을 제거하여 망의 구조를 간단하게 하고 경제성을 높인 구조가 RSOA 기반의 re-



(그림 5) WL FP-LD 기반의 양방향 WDM 광가입자망



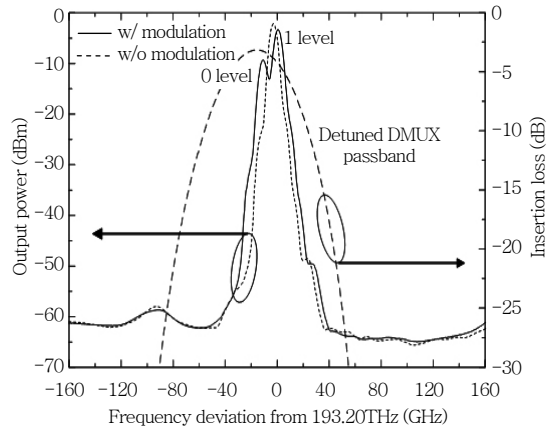
(그림 6) Re-modulation 방식의 WDM 광가입자망

modulation 방식 WDM 광가입자망이다. (그림 6)은 이러한 re-modulation 방식의 WDM 광가입자망의 구조를 보여주고 있다.

중앙기지국에서 하향 신호로 직접 변조된 빛은 MUX와 circulator, 광섬유를 지나 다시 DMUX를 통과한 후 가입자단의 RSOA와 하향 신호 복원을 위한 수신기로 입력된다. RSOA로 입력된 빛은 상향 신호로 직접 변조되어 중앙기지국의 수신기로 전송된다. 이 때, 상향 신호의 전송특성을 보장하기 위해서는 RSOA에서 출력된 빛에 포함되어 있는 하향 신호의 성분을 제거해야 한다. 이를 위해 RSOA의 gain-saturation을 통한 amplitude-squeezing 효과를 이용하는 구조가 제안되었다.

이러한 방법을 사용하여 최근 하향 2.5Gb/s, 상향 1.25Gb/s의 데이터를 전송할 수 있는 양방향 WDM 광가입자망이 보고된 바 있다[14]. 이와 같은 양방향 구조에서는 망의 전송 특성이 링크에서의 광섬유 접합부분의 반사나 rayleigh backscattering에 의해 저하될 수 있으나, RSOA를 통해 변조뿐만 아니라 신호의 증폭도 함께 이루어지기 때문에 보상이 가능하였다. 하지만, 이와 같이 gain-saturation에 의해 하향 신호의 소광비를 억제하는 방법은 입력되는 광신호의 소광비와 파워에 대해 한계를 가지고 있다는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해, 망에서 MUX/DMUX로 사용되는 WDM 필터의 중심파장을 장파장으로 미세하게 이동한 후 RSOA에 입력되는 빛과 출력되는 빛을 spectral filtering하여 하향 신호를 억제하는 방안이 제안되었다[15].

직접 변조된 DFB-LD의 광출력은 (그림 7)에서 볼 수 있는 것처럼 chirp에 의해 0-level에 대한



(그림 7) 직접 변조된 DFB-LD의 출력 Optical Spectrum과 Detuning된 WDM 필터의 통과 스펙트럼

peak와 1-level에 대한 peak가 일정한 주파수 간격을 두고 분리되어 있는 형태를 가지게 된다. 그리고 이러한 peak power의 차이는 time domain에서 관찰할 수 있는 소광비와 정확히 일치한다. 이러한 형태의 spectrum을 갖는 DFB-LD의 출력을 장파장 쪽으로(주파수가 감소하는 방향으로) detuning된 WDM 필터에 통과시키면, 0-level의 peak에 비해 1-level의 peak는 큰 loss를 겪게 된다. 따라서, 이러한 detuning 값을 적절히 조절한다면, 0-level과 1-level의 peak 파워를 동일하게 만들 수 있을 것이다. 이것은 하향 신호의 소광비가 0dB임을 뜻하는 것이며, 이를 통해 RSOA에 입력되는 파워에 상관없이 하향신호의 소광비를 억제할 수 있다. 하지만, 이 방법의 경우 detuning에 의한 추가적인 손실이 발생하므로 전체 전력 예산에 제한을 가져올 수 있고, WDM 필터의 중심 주파수를 세밀하게 조절해야 하는 단점이 있다.

앞서 살펴본 gain-saturation의 경우, 하향 신호의 입력 파워와 소광비에 의해 제한을 받고 필터 detuning에 의한 방법은 추가적인 삽입 손실에 의해 전력예산이 제한을 받는 단점이 있다. 그러므로, 앞으로의 re-modulation 방식의 WDM 광가입자망의 연구는 입력되는 하향신호의 파워와 소광비에 상관없이 일정 수준 이상의 전송 성능을 가지는 경제

적인 가입자단용 재변조기에 관심이 집중되리라 예상할 수 있다.

## 2. WDM-PON 다중화 기술

WDM-PON 다중화 기술은 앞 절에서와 같이 WDM 필터로 분기 혹은 결합되는 구간에서 하나의 파장을 시간, 주파수 혹은 부호 단위로 다시 다중화하여 WDM 링크의 효율성을 높이거나 서비스의 보안을 강화하기 위한 목적으로 이용된다. 일반적으로 이와 같은 점대점 WDM-PON 구조는 간단하고 운용이 쉽고 가입자에게 충분한 대역을 언제나 제공할 수 있다는 장점을 가지는 반면, 수용할 수 있는 가입자 수에 비하여 고비용이며, 정적인 구조로 인해 망의 효율성이 떨어진다는 단점을 가지고 있다.

따라서 파장 자원을 다수의 가입자가 공유하여 비용을 절감하고, 가입자망의 효율성을 높이기 위해 TDM, SCM 등의 다중화 기술이 복합적으로 사용되고 있다.

### 가. WDM/TDM

TDM-PON은 Ethernet-PON을 중심으로 IEEE 802.3ah EFM에서 국제표준화가 이루어지고 있다. TDM-PON은 WDM-PON과 달리 가입자간의 load balancing이 유연하지만, 파장의 활용도가 극히 낮으므로 광링크의 물리적인 활용도가 떨어진다는 약점을 가지며, WDM-PON은 다중 파장을 이용하여 광링크의 활용을 극대화 할 수 있는 반면, 가입자마다 파장이 고정되므로 동적대역할당과 같은 유연한 서비스 제공이 어렵다. 따라서 최근에는 WDM-PON 망에서 성숙된 TDM 기술을 접목하기 위한 여러 가지 시도가 이루어지고 있다[16]-[19]. (그림 8)에서는 WDM/TDM hybrid 기법을 사용하는 다양한 방법을 소개하고 있다.

(그림 8a)의 예에서는 OLT에서 고정파장(F-LD)을 사용하고 여러 파장으로 다중화된 신호가 RN에 있는 WDM 분기기(WDM splitter)와 파워분기기(PS)를 거쳐서 ONT로 분기되는 구조이다.

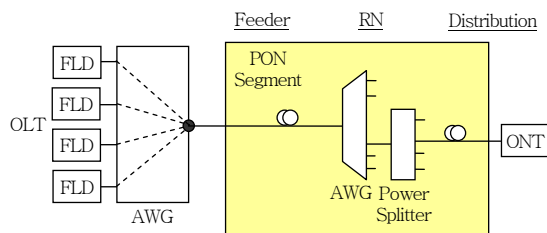
논리적으로는 파장 당 독립적인 TDM 기술이 접목된 방식으로서 파장 내의 가입자들간의 통계적 다중화 효과를 얻을 수 있으며, 기존의 TDM-PON의 field-deployed 망을 변경 없이 그대로 이용할 수 있다는 장점을 가진다. 하지만 고정 파장(F-LD)을 OLT에서 광원으로 사용하는 구조적인 제한으로 인하여 다른 파장 가입자와의 통계적 다중화 효과를 얻을 수 없으므로 점진적 진화를 위한 확장 방안이 요구된다.

(그림 8b)는 OLT에서 F-LD를 사용하고 다중화된 신호가 RN에 있는 PS를 거쳐서 ONT로 분기되는 구조를 가진다. 물리적으로 ONT에서는 OLT의 모든 파장의 수신이 가능하므로 선택적으로 하나 이상의 필터링을 통하여 데이터를 수집할 수 있으며, 또한 하나 이상의 송신용 파장-가변-광송신장치(T-LD)를 가지고 있는 ONT에서 필요 시에 원하는 파장대역에 데이터를 보낼 수 있다. 유연한 구조임에는 틀림이 없으나, ONT에서 T-LD와 WDM 필터를 사용하는 비용 문제가 있으며, 각 ONT 간의 여러 파장간의 송수신 제어를 위한 복잡한 프로토콜을 필요로 한다.

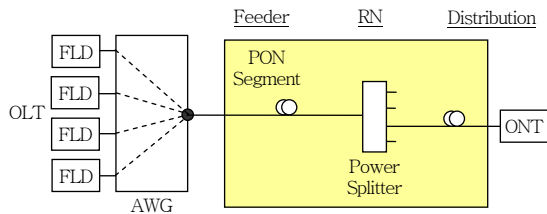
(그림 8c)와 같은 동적파장할당(dynamic wavelength assignment) 방식은 M개의 파장가변 레이저를 입력으로 하여 cyclic AWG의 M개의 출력 포트(PON unit) 각각에 N/M개의 단위로 가입자에게 분배된다. 이는 가입자 장치에서 OLT의 AWG의 FSR 특성에 맞는 필터를 서로 다른 타입별로 가지고 있어야 하므로 ONT inventory 문제가 발생한다.

(그림 8d)와 같은 파장 공유 방식은 이러한 FSR inventory 문제를 해결하기 위하여 ONT에서 RSOA 등의 방식을 사용한다. 동적파장할당 방식과 마찬가지로 OLT에서 파장가변 레이저와 M×M cyclic AWG를 사용하였으며, 각 M개의 출력포트와 연결되는 RN에서는 1×N의 AWG를 연결하여 각 파장별로 가입자가 배정되어 있다. 이 방식은 파장가변 레이저와 RSOA 방식을 이용하여 경제적 실용성과 ONT의 inventory 문제를 해결하였지만 네트워크의 진화를 위한 확장성과 서비스의 차별화가 어렵다.

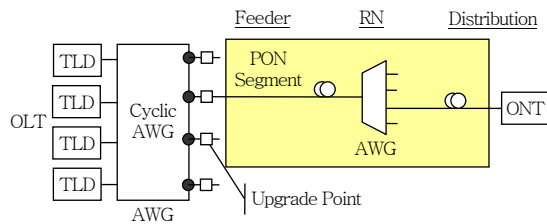
이상과 같이 다양한 구조의 WDM/TDM hybrid PON 방식은 각각의 장단점을 가지고 있기 때문에 가입자 거주 특성이나 사용자로부터 요구되는 서비스의 양과 질에 따라 선택적으로 혹은 혼합적으로 사용이 가능할 것으로 예상이 된다. 하지만 기본적으로 차세대 가입자망의 진화를 위한 확장성 및 FTTH 서비스 보급화를 위한 경제성을 만족하는 네트워크의 구조 및 동작 방식이 적합할 것이다.



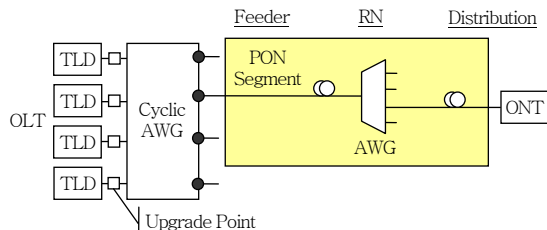
(a) RN에 AWG와 Splitter가 Cascade된 구조



(b) RN에 Splitter가 존재하고 ONT에서 하향 파장을 선택하는 구조



(c) 파장 가변 광원을 이용한 동적 파장 할당 방식을 적용하고 RN에 Cyclic AWG를 사용한 구조

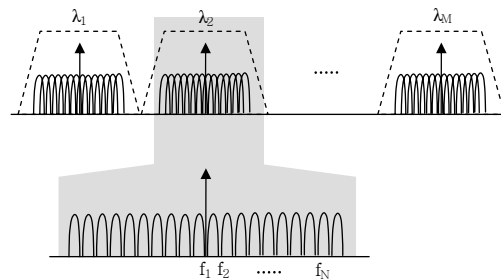


(d) (c)의 구조에서 RN에 1×N AWG를 사용하는 구조

(그림 8) WDM/TDM Hybrid-PON의 구성 예

## 나. WDM/SCM

WDM/SCM 전송 방식은 (그림 9)와 같이 WDM의 광파장 분할 다중화 방식에 파장별 다 채널의 부반송과 다중화 방식을 복합적으로 사용하여 전체 수용 전송 채널의 수를 증가시킨 방법이다.



(그림 9) WDM/SCM 전송 원리

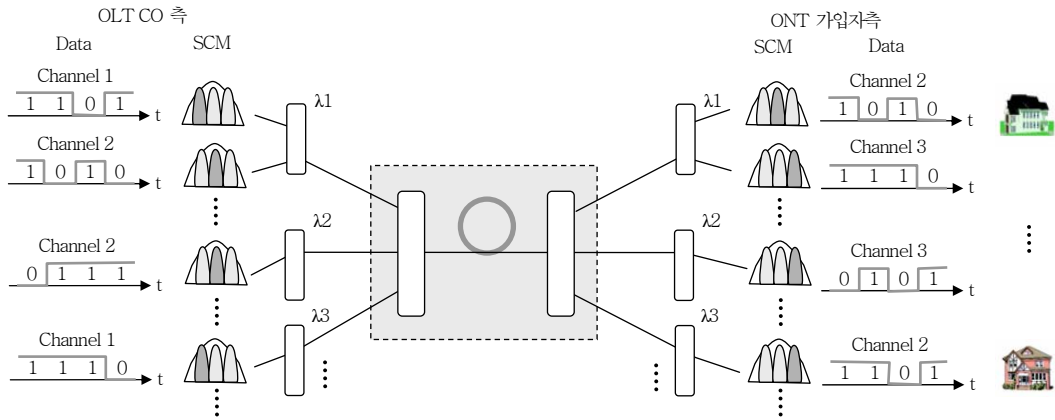
(그림 10)은 이를 망 차원의 구성에 맞춰 재구성한 것이다. OLT 측에서는 송수신 데이터를 각 파장의 가입자별 할당된 SCM 채널을 통해 WDM 광송수신 처리하며, 가입자측 ONT 장비에서는 할당된 파장내 SCM 채널을 통해 데이터를 송수신한다.

WDM/SCM 분배망은 다음과 같은 특징을 갖는다.

- (1) 복합 다중화 전송 기술
  - 총 채널 수:  $M(\lambda \text{ 파장}) \times N(\text{SCM 채널})$
  - 수용 가입자 수 증가
  - 스펙트럼 효율 증가(QPSK, QAM 등)
- (2) Point-to-point 전송
  - OLT SCM ch.: ONT SCM ch.=1:1
  - 점대점 전용선 제공 용이
  - 전송 품질 확보
- (3) 주파수 in-band & overlay 사용 가능
- (4) Protocol & bit rate transparency
  - ranging, burst mode 송수신 추가 기능 불필요
  - 다양한 서비스의 전송속도, 형식에 무관하게 통합 가능

이러한 WDM/SCM 기술을 연구하고 있는 국내 외의 보유 기술 현황은 <표 1>과 같다[20],[21]. 주된 기술 개발 경향은 외국에서는 주로 메트로나

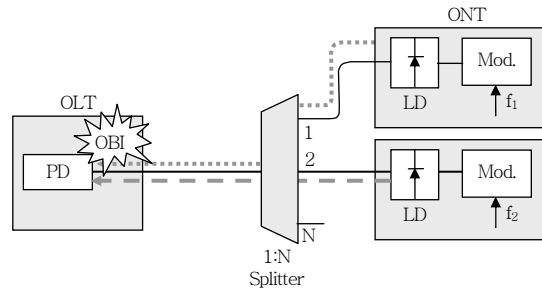




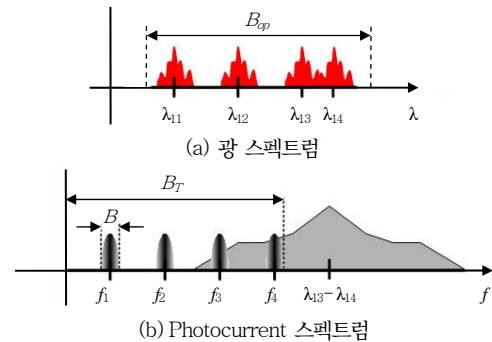
(그림 10) WDM/SCM 전송망 구성도

<표 1> 최근 3년내 WDM/SCM 보유 기술 현황

	일본 NTT	한국 Yonsei univ.	한국 ETRI
Number of $\lambda$	32	-	32
$\lambda$ spacing	100GHz	100GHz	100GHz
Number of SC	310	1	32
Modulation	16QAM	BPSK	16QAM
Bit rate/ch.	20Mbps	100Mbps	120Mbps
Tx distance	20km	20km	20km
오류 정정 부호	Reed Solomon	-	Reed Solomon
반송 주파수 범위	2~3.9GHz	0.9GHz	0.1~1.65GHz
$\lambda$ range	1537~1562nm	-	-
기타	2003년 실험수치	2006년 실험수치	2006년 실험수치



(그림 11) 공간섭 발생 위치



(그림 12) OBI 간섭 결과

백본용 광전송장치에 적용을 주 목적으로 하는데 비해 국내에서는 WDM-PON 개발과 맞물려 광가입자망에 좀 더 중점을 두고 있다.

그러나, 가입자 분배망에 WDM/SCM 적용은 (그림 11)과 같이 다수의 ONT가 상향으로 전송할 때 파장이 OLT 측 수신단에 모이면서 공간섭 현상(OBI)이 발생하여 수용 가입자 수가 제한된다는 문제를 가지고 있다.

이러한 공간섭 현상은 (그림 12)와 같이 광스펙트럼상의  $\lambda_{13}$ 과  $\lambda_{14}$ 와 같이 근접한 파장으로 WDM/SCM을 전송하는 경우 발생하는 간섭으로서 수신단

에서 광전 변환 뒤 (그림 12)의 주파수 영역의 회색 바탕과 같은 OBI 잡음 성분이 신호 대역을 침해하여 신호대 잡음비의 저하로 망 전송 성능이 떨어지게 된다.

따라서, 이를 해결하기 위해 OBI 감소에 대한 기술 연구가 활발하게 진행되어 왔으며, 국내외 기술을 <표 2>에 요약하였다. ETRI WPON기술팀에서

〈표 2〉 OBI 감소 기술 요약

Reducing OBI		Reducing occurrence of OBI
Spread spectrum	Wavelength separation	Time division multiple access
Modulated optical pulse train (Yonsei, 2005. 10.)	Using WDM source (Power, 1996. 4.)	Burst mode Tx (Lucent, 2000. 10.)
Dithering tone (Lucent, 2000. 10.)		
XPM modulator (Toshiba, 1999. 12.)		Varying time duration and interval (Alcatel, 1998. 8.)
LSM method (Yamamoto, 1999. 9.)		

는 SCM 채널 당 100Mbps 전송 품질을 보장할 수 있는 다양한 OBI 해결책에 대한 제안과 구현 완료 를 목표로 현재 시제품에 적용하여 시험중에 있다.

#### IV. 결론

WDM-PON의 가입자용 광원은 종류 및 방식별 로 다양한 특징과 장단점을 지니고 있다. Tunable source는 망의 구조에 상관없이 유연하게 사용이 가능하다는 장점이 있다. 하지만, 이러한 가변 레이 저를 WDM 가입자단에 실제로 장착하기 위해서는 발진 파장이 가입자마다 지정된 파장에 자동으로 정 렬되어야 하며, 앞으로 이러한 알고리즘과 장치에 대 한 연구가 계속되어야 한다. 양산성이 우수한 PLC 기반 파장 가변형 레이저를 통한 저가화 연구에 많은

관심이 집중되고 있다. 광원 방식 역시 저가화를 위 해 외부 변조가 아닌 광원 직접 변조 방식을 택하고 있다.

광가입자망은 WDM-PON 망의 단점을 보완한 다양한 다중화 기술을 활용한 WDM/TDM, WDM/SCM과 같이 다수 가입자가 WDM 파장 자원을 공 유함으로써 망의 효율성을 향상시키고, 비용을 절감 하는 방향으로 구축됨이 바람직하다.

WDM-PON 기술은 가입자마다 독립적인 광 채널을 사용하여, 100M~1G급의 전송대역을 보장하 고, 우수한 보안 특성을 제공할 수 있다. 뿐만 아니 라 전송 및 다중화 특성이 우수하여 가입자 트래픽 증가에 대응하여 망 구성 및 운용이 가능하고, 전송 속도, 모듈레이션 방식 등에 투명한 서비스가 가능 한 차세대 가입자 망 기술이다. 반면 이의 비용은 현 재 채널 당 EPON 기술에 비해 높고, 제공되는 서비 스에 비해 너무 큰 대역을 제공한다. 대용량의 WDM-PON 파장이 보다 효율적으로 사용되고, 상 용화되기 위해서는 hybrid 및 long reach PON에 대한 연구 개발, 저가의 광원 확보 및 이미 개발된 광소자들을 보다 저가로 공급할 수 있어야 한다. 따 라서, WDM-PON 기술을 가입자 망에 도입하기 위 해 국내를 비롯한 세계 각국은 다양한 다중화 기술 개발, 광 소자 제작 및 광 모듈의 저가화 기술 확보 에 주력하고 있다.

#### 약어 정리

● 용어해설 ●

**RSOA:** 반도체 광증폭기의 일종으로서 광 출사면에는 Anti-Reflection (AR) 코팅되고, 후면에는 High Reflection (HR) 코팅된 구조이다. AR 코팅된 면으로 외부에서 광이 주입되고, RSOA 내부에서 증폭되어 후면 HR coating에서 반사되어 다시 AR 코팅된 면으로 광이 출사되는 구조이다.

**PLC-ECL:** 평판형 도파로에 파장 가변 브라그 격자와 반도체 증폭 매질이 동시에 실장된 집적 광학 형태의 소자이다. 반도체 증폭 매질과 브라그 격자에 의하여 외부 공진이 형성되어 광이 출사된다. 출사되는 광 파 장은 브라그 격자의 반사 파장에 의하여 결정된다.

- APD      Avalanche Photo Diode
- AR        Anti-Reflection
- AWG      Arrayed Waveguide Grating
- BLS        Broadband Light Source
- CDN       Contents Delivery Network
- CO        Central Office
- DFB-LD   Distributed-Feedback Laser Diode
- EDFA      Erbium-Doped Fiber Amplifier
- F-LD      Fixed Laser Diodes
- FSR        Free Spectral Range
- MQW      Multi-Quantum-Well
- MSO       Multi System Operator

OBI	Optical Beat Interference
OLT	Optical Line Termination
ONT	Optical Network Termination
ONU	Optical Network Unit
PIN-PD	PIN Photo Diode
PLC-ECL	Planar Lightwave Circuit-based External Cavity Laser
PLC	Planar Lightwave Circuit
PS	Power Splitter
RN	Remote Node
RSOA	Reflective Semiconductor Optical Amplifier
SCM	Sub-Carrier Multiplexing
SCMA	Subcarrier Multiplexing Access
SLED	Super-luminescent Light Emission Diode
SML	Single-Mode Light source
T-LD	Tunable Laser Diodes
TDM	Time Domain Multiplexing
TEC	Thermo-Electric Cooler
TO-CAN	Transistor Outline-CAN
WBG	Waveguide Bragg Grating
WL FP-LD	Wavelength-Locked Fabry-Perot Laser Diode

## 참 고 문 헌

- [1] 박재동 외 5, "WDM-PON 기술," 전자통신동향분석, 제 19권, 제6호, 2004년 12월호, pp.43-54.
- [2] The Passive Optical Networks Forum, <http://www.ponforum.org>.
- [3] GigaPort, "Connecting Homes with Fibre-optics," SURFnet, Aug. 2001.
- [4] L. Woodward et al., "A Spectrally Sliced PON Employing Fabry-Perot Lasers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol.10, No.9, 1998.
- [5] H.D. Kim et al., "A Low-cost WDM Source with an ASE Injected Fabry-Perot Semiconductor Laser," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol.12, No.8, 2000.
- [6] D.J. Shin et al., "155Mb/s Transmission Using ASE-injected Fabry-Perot Laser Diode in WDM-PON over 70°C Temperature Range," *Electron. Lett.*, Vol.39, No.18, Sep. 2003, pp.1331-1332.
- [7] K.M. Choi et al., "Broadband Light Source Using Mutually Injected Fabry-Perot Laser Diodes for WDM-PON," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol.17, No.12, 2005.
- [8] K.M. Choi et al., "Color-free Operation of Dense WDM-PON Based on the Wavelength-locked Fabry-Perot Laser Diode Injecting a Low-noise BLS," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol.18, No.10, 2006.
- [9] K. Park et al., "A Theoretical Model of a Wavelength-Locked Fabry-Perot Laser Diode to the Externally Injected Narrow-Band ASE," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol.17, No.9, 2005.
- [10] G. Jeong et al., "Over 26nm Wavelength Tunable External Cavity Laser Based on Polymer Waveguide Platforms for WDM Access Networks," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, in press, 2006.
- [11] S. Lee et al., "Dense WDM-PON Based on Wavelength-locked Fabry-Perot Laserdiode," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol.17, No.7, 2005.
- [12] J. Baik et al., "Hybrid WDM/SCMA-PON Using Wavelength-locked Fabry-Perot Laser Diode," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol.18, No.10, 2006.
- [13] D.J. Shin et al., OFC2005, paper PDP36, 2005.
- [14] W. Lee et al., "Bidirectional WDM-PON Based on Gain-saturated Reflective Semiconductor Optical Amplifiers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol.17, 2005, pp.2460-2462.
- [15] W. Lee et al., "Frequency Detuning Effects in a Loop-back WDM-PON Employing Gain-saturated RSOAs," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol.18, 2006, pp.1436-1438.
- [16] F. Payoux, P. Chanclou, T. Soret, and N. Genay, "Demonstration of a RSOA-based Wavelength Remodulation Scheme in 1.25Gbit/s Bidirectional Hybrid WDM-TDM PON," OFC, TuC4, 2006.
- [17] F. Clarke, S. Sarkar, and B. Mukherjee, "Simultaneous and Interleaved Polling: An Upstream Protocol for WDM-PON," OFC, 2006.
- [18] Y.L. Hsueh, M.S. Rogge, S. Yamamoto, and L.G. Kazovsky, "A Highly Flexible and Efficient Passive Optical Network Employing Dynamic Wavelength Allocation," *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, Vol. 23, No.1, Jan. 2005, pp.277-286.
- [19] C. Bock, J. Prat, and S.D. Walker, "Hybrid WDM/TDM PON Using the AWG FSR and Featuring Centralized Light Generation and Dynamic Bandwidth Allocation," *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, Vol.23, No.12, Dec. 2005, pp.3981-3988.
- [20] R. Hui, "10-Gb/s SCM Fiber System Using Optical SSB Modulation," *IEEE PTL*, Vol.13, No.8, Aug. 2001.
- [21] M. Ogawara, "Demonstration of 20-Mbit/s 10000-Channel WDM/SCM Broadcast-and-Select System," *IEEE PTL*, Vol.12, No.3, Mar. 2000.