

WDM-PON 기술

한국과학기술원 이창희

목 차

I. 서 론

II. WDM-PON의 구성

III. WDM-PON용 광원

IV. TDM-PON의 고속화

V. 결 론

I. 서 론

인터넷의 급속한 확산으로 기존의 음성, 텍스트 중심의 서비스가 영상 및 화상중심의 서비스로 전환되면서 가입자망의 고속화에 대한 요구가 급격히 증가하고 있다. 특히, CATV 사업자가 인터넷 서비스를 시작하고, 통신사업자는 방송서비스에 커다란 관심을 보이면서, 기존의 방송과 통신이라는 영역이 불분명해지고 있다. 따라서, 통신사업자나 CATV 사업자 모두 영상, 데이터, 음성을 통합한 서비스를 하나의 네트워크 인프라를 통해서 공급하는 것을 목표로 각자의 가입자망 고도화에 박차를 가하고 있다. 이러한 추세와 정보인식의 용이성으로 인하여, 앞으로 개발될 모든 서비스는 영상 중심의 서비스가 될 것이므로, 미래의 가입자망도 영상, 화상 중심으로 데이터와 음성이 융합된 서비스를 효율적으로 수용할 수 있는 구조가 되어야 한다.

기존의 아날로그 TV는 빠르게 디지털화 되고 있으며, TV 수상기의 대형화 및 고화질에 대한 욕구로 HD(High Definition)급 서비스는 머지않아 영상 서비스의 표준이 될 것이다. 각 가정에 3대의 TV를 가정하면(미국의 경우 가정집당 평균 2.5대 TV 보유) 제공해야 하는 대역폭은 60 Mb/s 이다.

여기에 인터넷, 영상전화, 기타 원격제어 등을 포함하면, 가입자당 요구되는 하향 대역폭은 73 Mb/s 이상이다. 또한, 가입자가 상향으로 보내는 대역폭은, EoD (Education on Demand), GoD (Game on Demand)를 위한 HD 급 1 채널, 영상전화, 양방향 인터넷 등을 고려할 때 32 Mb/s 로 예측된다.

〈표 1〉은 이를 정리한 것이다. 따라서, 앞으로 예측되는 새로운 서비스까지 고려하면, 미래의 가입자망에서는 상하향 모두 100 Mb/s 대역폭을 가입자에게 제공할 수 있어야 할 것이다[1].

이러한 서비스모델은 모든 채널을 가입자에게 방

〈표 1〉 가입자 당 요구되는 통신 대역폭

Services	Bandwidth	Remarks
Streaming Video (HD) Broadcasting Video on demand (VoD) or Home shopping Education/Game on demand (EoD/GoD)	Total 60 M 20 M/service 20 M/service 20 M/service	EoD and GoD requires symmetric bandwidth
Internet	10 M	PtP service requires symmetric bandwidth
Video conference or Video Phone	2 M	Requires symmetric bandwidth
Remote control & sensing, etc.	1 M	
Total	73 M	Downstream : 73 M Upstream : 32 M

송형태로 제공하고 가입자가 원하는 채널을 방송시간에 맞추어 선택하는 방송서비스가 아니라, 사용자가 원하는 서비스를 원하는 시간에 시청할 수 있는 개인화된 TV를 제공하는 IPTV를 기본으로 하고 있다. 〈표 1〉에서 알 수 있듯이 거의 모든 서비스가 영상 중심이고, 이는 서비스의 특성상 기존의 인터넷과는 가입자 망에 요구하는 특성이 현격히 다르다. 즉, 영상 중심의 서비스는 넓은 대역폭을 요구할 뿐만 아니라, 높은 QoS (Quality of Service)를 요구하고, 가입자들이 동시에 서비스를 요구한다 (TV의 경우는 저녁시간 대에 집중되어 있음). 그러므로 이러한 망에서는 기존의 데이터 중심의 망에서처럼 통계적인 다중화로 인한 대역폭 이득이 거의 없다. 따라서, 미래의 가입자망에서는 최대 대역폭은 의미가 없으며, 가입자에게 보장할 수 있는 대역폭(양방향으로 100 Mb/s 이상)만이 의미를 가진다. 또한, 전송거리는 전화국에서 가입자까지의 거리를 바탕으로 선정할 국제 규격인 20 km 이상을 만족하여야 한다.

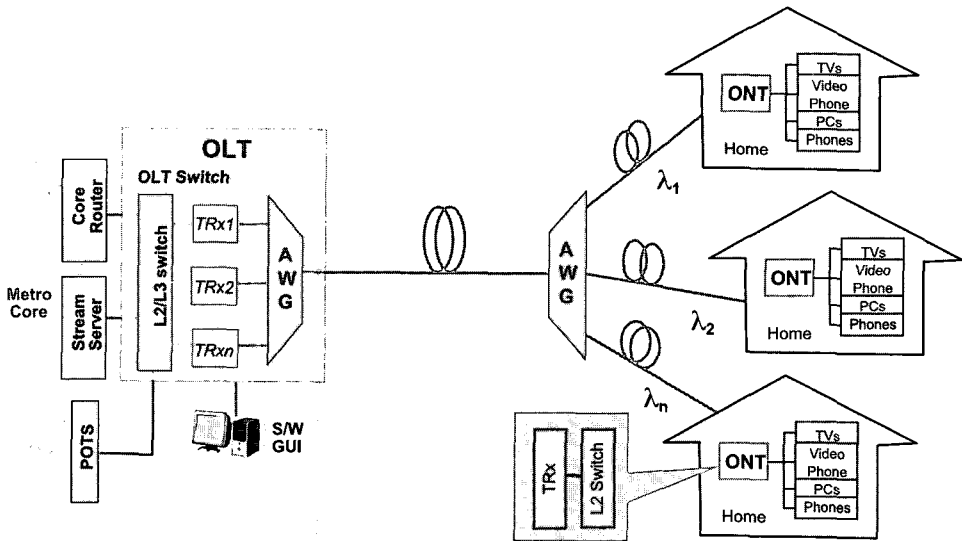
이러한 조건을 만족하기 위해서는 가정집까지 단 일모드 광섬유를 포설하여 서비스를 제공하는 FTTH

(Fiber-to-the-Home)가 유일한 대안이다. 여러 가지 FTTH 구축 방안 중에서도(자세한 내용은 참고 문헌 1 참조) 광섬유를 절약하면서, 점대점 연결과 동일하게 가입자에게 100 Mb/s 이상 대역폭을 제공하여 높은 QoS(Quality of Service)를 보장할 수 있는 WDM-PON (Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network)이 미래의 가입자망으로 최적의 구조이다. 본 고에서는 이러한 WDM-PON의 여러 가지 특성을 자세히 기술하였다.

II. WDM-PON의 구성

2.1 WDM-PON의 구조

WDM-PON은 WDMA(Wavelength Division Multiple Access) 방식을 이용하여 광섬유를 공유하는 수동 광네트워크로, TDM-PON처럼 전화국에 설치되는 OLT(Optical Line Termination)와 AWG(Arrayed Waveguide Grating)로 구현되는



(그림 1) WDM-PON의 구성도

RN(Remote Node), 그리고 가입자택내에 설치되는 ONT(Optical Network Termination)로 구성되어 있다. (그림 1)에 WDM-PON의 구조를 나타내었다. OLT와 RN은 하나의 광섬유를 사용하여 연결된다. RN은 가입자 밀집지역의 맨홀이나 전주 위에 설치되며, 주로 AWG로 구성되나, 파장분할 다중/역다중화기를 이용하여 구현할 수도 있다. RN에서 가입자택내에 설치되는 ONT까지는 하나의 광섬유를 이용하여 연결된다[2,3].

이러한 구조에서 OLT와 ONT가 통신을 하기 위해서 각각의 ONT에는 광송수신기가 필요하며, OLT에도 이에 상응하는 광송수신기가 필요하다. 이 때 RN에서 OLT까지의 한 가닥의 광섬유를 공유하기 위해서 각각의 ONT로 보내는 하향 신호 및 OLT로 보내는 상향 신호는 파장분할 다중화된다. 즉 OLT와 ONT는 독립된 광송수신기 쌍을 통해서 독립된 파장으로 통신을 하기 때문에 OLT와 ONT는 점대점으로 연결된 것과 같으며, QoS가 보장되며, 각각의 가입자는 서로 다른 프로토콜을 사용할 수 있다. 또한 각

각의 가입자에게 보장되는 대역폭이 매우 넓으므로, (그림 1)에서 보인 바와 같이 TV(IPTV), 전화, 화상 전화, 인터넷 등과 같은 서비스를 통합할 수 있다. 그림 1에서는 인터넷 프로토콜(IP)을 사용하는 경우의 WDM-PON의 예를 나타내었다. WDM-PON의 OLT에는 상단장치에 연결하기 위해서 트래픽을 서비스별로 분리하기 위한 L2/L3 스위치가 필요하다.

RN에 설치된 수동소자인 AWG는 OLT에서 보내는 파장분할 다중화된 신호를 역다중화하여 각각의 ONT로 보내는 역할과, 각각의 ONT에서 오는 신호를 파장분할 다중화하여 OLT로 보내는 역할을 수행한다. 유사하게 OLT에 있는 AWG는 OLT에서 각각의 ONT로 보내는 신호를 파장분할 다중화하는 역할과, ONT에서 OLT로 보내는 신호를 파장분할 역다중화하는 기능을 수행한다. 따라서, OLT에 있는 AWG와 RN의 AWG의 특성이 동일하여야 한다. 즉, 각각의 대응되는 단자의 투과 파장이 같아야 한다. 또한, 온도가 변해도 이러한 특성이 변화하지 말아야 한다. 최근에 개발된 Athermal AWG는 온도에 의한

통과파장의 변화가 매우 적어서 이러한 특성을 만족한다.

WDM-PON에서 각각의 가입자에게 할당되는 파장은 AWG의 어떠한 출력 단자를 사용하느냐에 따라 결정된다. WDM-PON의 이러한 특성으로 인하여 가입자에게는 할당된 파장의 신호만 전달되므로 가입자 정보의 보안성은 완벽하게 보장된다.

2.2 신호 전송 대역

상하향 신호를 하나의 광섬유를 통해서 전송하기 위해서는 같은 파장(혹은 주파수)을 사용하는데 많은 어려움이 있다. 따라서, 양방향 전송에서는 상하향 신호를 서로 다른 파장을 사용하여 전송하는 것이 일반적이다. 예를 들어 TDM-PON에서는 상향신호는 $1.3 \mu\text{m}$ 대역이고, 하향은 $1.49 \mu\text{m}$ 대역이며, TV신호는 $1.55 \mu\text{m}$ 대역을 이용하여 전송한다.

TDM-PON에서는 정확하게 파장을 정의할 필요가 없어서 대역만을 정의하고 있다. 그러나, WDM-PON에서는 파장분할 다중화를 위해 각각의 ONT 및 OLT의 광송신기 파장(혹은 주파수)이 명확하게 정의되어 있다. 채널간의 주파수 간격은 얼마나 많은 채널을 하나의 광섬유에 수용하느냐를 결정하는 것이므로 좁을수록 좋으나, 발전 가능한 레이저의 파장 분해도, 광소자의 파장응답특성 등을 종합적으로 고려하여야 한다. 또한, 상향과 하향의 효율적 분리를 위하여 상하향의 전송대역을 정하는 것이 편리하다. WDM-PON에서 전송 가능한 대역으로는 국제 표준화 기구인 ITU-T에서 영상신호 전송을 위한 확보하고 있는 $1.55 \mu\text{m}$ 대역(O-band), 이보다 장파장 영역인 $1.8 \mu\text{m}$ 대역(L-band), 그리고 단 파장 영역으로 S-band, E-band가 있다. 또한, 기존의 TDM-PON에서 사용하고 있는 $1.3 \mu\text{m}$ 대역(O-band)도 있다. (그림 2)는 ITU-T에서 정의한 광가입자망에서

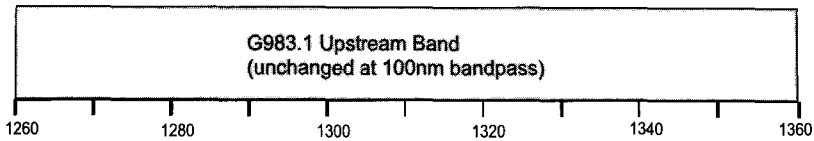
의 파장 이용 계획이다.

전송대역의 선정은 광섬유의 손실 및 색분산을 고려하여야 함은 물론이고, 소자의 가격에 많은 영향을 미치므로, 경제성을 고려하여 선택하여야 한다. 즉, 상향과 하향의 파장간격이 좁으면, 광송수신기 앞단에서 서로 다른 대역의 광신호를 분리하는 비용이 증가한다. 이는 전자회로에서 주파수 간격이 좁은 두 신호를 분리하는 것이 어려운 것과 유사하다. 그러나, 파장 간격이 너무 넓으면, AWG와 같은 소자가 넓은 파장영역에서 특성이 보장되어야 하는 어려움이 생긴다. 따라서, 파장대역은 이러한 모든 특성을 고려하여 선정하여야 한다.

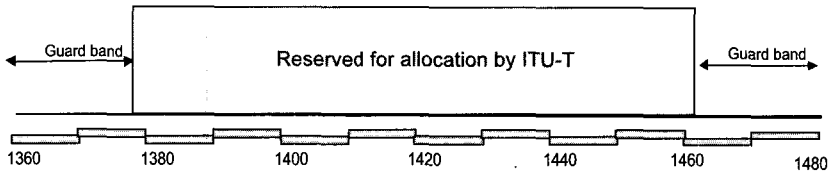
2.3 WDM-PON의 장점

WDM-PON에서는 앞에서 설명한 바와 같이 OLT에서 RN 사이를 하나의 광섬유로 연결함으로써, 전화국에서 가입자까지 점 대 점(Point-to-point)으로 광섬유를 연결하는 경우보다 광섬유를 크게 절약하면서 동일한 효과를 낼 수 있다. 즉, 모든 가입자는 자기에게 할당된 독립된 별도의 상하향 파장으로 전화국과 통신한다. 따라서, 어떠한 가입자도 다른 가입자의 존재 유무에 상관없이 항상 전화국과 통신이 가능하므로, 전화국에서 가입자 맥내 사이의 QoS를 완벽하게 보장한다. 또한, 모든 가입자에게는 전달되는 정보는 AWG의 투과특성으로 인하여 각각의 가입자에게 할당된 정보만이 전달되므로 보안성 및 프라이버시는 네트워크 자체에서 완벽하게 보장한다. 더욱이, WDM-PON에서는 TDM-PON에서 사용하는 광분배기(광신호의 파워를 나누는 소자) 대신 AWG와 같은 파장분기 결합기(WDM MUX)를 사용하므로 파워 손실이 크게 감소되어 사실상 대역폭의 제한이 거의 없이 다양한 프로토콜을 수용할 수 있다. 이러한 WDM-PON의 특징은 다음과 같다.

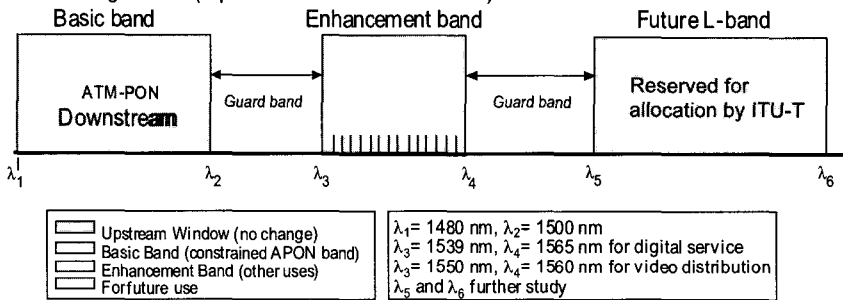
1.3 μm wavelength band(Upstream)



Intermediate wavelength band(Upstream and/or Downstream)



1.5 μm wavelength band (Upstream and/or Downstream)



(그림 2) ITU-T의 엑세스망 파장운용 계획

- 프로토콜 및 전송 속도에 대한 투명성 보장
- 점 대 점 연결과 동일한 완벽한 QoS 보장
- 높은 보안성, 프라이버시 보장
- 다양한 서비스를 수용할 수 있는 유연성 및 높은 망 확장성
- 각각의 가입자마다 독립된 상하향 파장 사용

또한, TDM-PON과 같이 버스트 모드 광송수신기나 시간영역에서 다중 액세스 제어에 위한 MAC IC 및 복잡한 소프트웨어가 필요 없어, ONT 및 OLT가 간단하여 제품의 신뢰성이 높을 뿐만 아니라, 잠재적인 경제성 면에서 우월하다. 따라서, WDM-PON은 가입자당 100 Mb/s 이상 대역폭 보장이 가능한 이상

적인 가입자망 기술이며, 미국, 일본 등에서도 가입자망을 WDM-PON으로 구축하기 위해 많은 연구개발을 하고 있다.

2.4 WDM-PON 현안들

앞에서 설명한 WDM-PON의 장점들은 가입자마다 별도의 파장으로 전화국과 통신을 하기 때문에 얻어지는 것이다. 그러나 이를 위해서는 각각의 가입자 및 전화국에서는 정해진 파장에서 빛을 내는 광원을 가지고 있어야 한다. 즉, 전화국에는 하향 신호전송을 위한 n개 (n은 하나의 광섬유에 연결된 가입자 수)의 서로 다른 파장에서 발진하는 레이저가 필요하

고, 각각의 가입자 맥내에 설치되는 ONT에서 상하향 통신을 위한 할당된 특정 파장에서 빛을 내는 광원이 필요하다. 따라서, 상하향 통신을 위해서는 서로 다른 파장에서 빛을 내는 $2n$ 개의 광원이 필요하다.

WDM-PON은 TDM-PON과 비교하여 OLT에서 $(n-1)$ 개의 광원이 더 필요하게 된다. 즉, WDM-PON은 OLT에 각각의 가입자마다 광원을 포함하는 별도의 광송수신기를 사용하여, 점 대 점 연결성을 보장하므로, 2.3에 기술한 장점들이 확보되지만, 별도의 광원 사용으로 인하여 WDM-PON의 경제성은 TDM-PON보다 떨어진다. 반면에 TDM-PON에서는 OLT에서 하나의 광송수신기를 사용하기 때문에 시간영역에서 광송수신기 및 광섬유를 공유하기 위한 MAC(Media Access Control) IC가 OLT 및 모든 ONT에서 필요하게 된다. 이는 TDM-PON의 여러 가지 단점들의 원인이기도 하다 [1].

독립된 파장의 광원을 ONT 및 OLT에서 사용해야 하는 WDM-PON은 가입자별로 할당된 파장을 유지해야 하는 문제를 안고 있다. 즉, OLT에 있는 광원의 파장과 OLT의 AWG 투과 파장, 그리고 RN에 있는 AWG의 투과 파장이 일치하여야 하며, ONT 광원의 파장이 상기한 AWG의 투과 파장과도 일치하여야 한다. 그러나, 주위 온도가 변하면, ONT 및 OLT에 있는 광원의 파장도 변화하게 된다. 불행히도 이들의 설치 위치가 서로 다르므로 각각의 광원은 다른 온도 변화를 갖는다(AWG의 경우는 Athermal AWG를 사용하면 온도 변화에 의한 영향을 무시할 수 있다.). 따라서, WDM-PON에서는 온도에 민감한 광원과 광부품들 간의 파장 정렬을 위한 모니터링, 제어 및 이의 관리 등과 같은 문제가 있다.

또한, WDM-PON 설치시에 각각의 가입자에게 할당된 파장을 측정하고, AWG의 출력 포트별로 할당된 파장과 맞는지 확인하기 위해서 고가의 측정기와 숙련된 기술자들이 요구된다. 더욱이 각각의 가입

자가 독립된 광원을 가지고 있으므로 ONT간에 상호 호환이 되지 않아서 각각의 가입자용으로 별도의 재고를 가지고 있어야 한다. 이러한 단점들은 WDM-PON 상용화의 장애요인이다.

III. WDM-PON용 광원

WDM-PON의 상용화에 장애가 되는 2.4에 기술한 문제들의 근본을 고찰해 보면, 각각의 가입자에게 독립된 파장을 할당하기 때문인 것을 알 수 있다. 따라서, 상기한 문제들을 해결하기 위해서는 ONT가 할당된 독립된 파장에서 동작하면서도 파장에 무관하게 동작하여야 한다는 다소 모순되는 결론에 도달하게 된다. 그러나, 만약에 ONT가 이러한 특성을 만족하게 되면, WDM-PON의 ONT도 TDM-PON처럼 ONT간에 상호교환이 가능하게 되고, 각각의 ONT는 사용하는 파장이 무엇인지를 몰라도 된다. 즉, WDM-PON 구현을 위한 핵심기술은 경제적인 파장에 무관한 ONT 혹은 colorless ONT의 구현이다 [3]. 만약 파장에 무관한 경제적인 ONT를 구현할 수 있다면 같은 기술을 OLT에 적용하여 것은 당연하다. 본 절에서는 WDM-PON 구현에 사용 가능한 광원들을 검토해 보고 파장에 무관한 ONT 구현 방안에 대해 알아보기로 한다.

3.1 ONT별 개별 광원

3.1.1 파장 고정 광원

WDM-PON 구현의 가장 간단한 방법은 장거리 전송 WDM 시스템에서 사용되는 DFB(Distributed Feedback) 레이저를 사용하는 것이다. 즉, OLT와 ONT에 미리 할당된 파장에서 발진하는 DFB 레이저를 사용하여 전화국과 가입자가 상하향 통신을 할 수

있도록 하는 방법이다. DFB 레이저의 발진 파장은 온도에 따라 변화하므로, 할당된 파장에서 동작시키기 위해서는 레이저의 온도를 제어하여야 한다. 온도를 제어하는 DFB 레이저는 매우 고가이다. 이와 같이 DFB 레이저를 사용하는 WDM-PON은 경제성이 매우 좋지 않으며, 이는 많은 그룹에서 WDM-PON의 장점을 인식하면서도 이를 사용하지 않는 요인이기도 하다.

3.1.2 파장 가변 광원

WDM-PON용 광원으로 원하는 범위 안에서 발진 파장을 변화시킬 수 있는 파장가변 레이저를 생각할 수 있다. 이러한 광원을 사용하는 경우는 파장에 무관한 ONT를 구현할 수 있을 것이다. 즉, 파장 "A"로 할당된 ONT "A"에서는 파장 A로 발진하도록 조정하고, 이를 파장 "B"로 할당된 ONT "B"에서 사용하기 위해서는 발진파장을 파장 "B"로 변경시키면 된다. 그러나, 이렇게 하기 위해서는 ONT는 자신이 어떤 파장의 빛을 출력하여야 되는지를 스스로 알아내야 하기 때문에 별도의 모니터링 혹은 감시장치가 필요할 것이다. 따라서, 파장가변 레이저를 광원으로 사용하는 것은 파장가변 레이저 자체의 경제성(대부분의 파장가변 레이저는 DFB 레이저보다 고가임)도 문제지만, 자기가 발진해야 하는 파장을 알아내야 하는 문제점이 있다.

3.1.3 광대역 광원 (대부분 비간섭성)

광대역 광원이란 원하는 파장범위에서(혹은 불연속적으로 할당된 파장에서만) 빛을 방출하는 광원으로 대표적으로 발광다이오드(LED)나, 광증폭기의 ASE(Amplified Spontaneous Emission), SLD(Super-luminescent Laser Diode)등이 있다. 이러한 광원에서 나오는 빛의 스펙트럼이 WDM-PON에서 상향으로 사용하는 파장대역보다 넓으면, 파장에

무관한 ONT를 구현할 수 있다. 즉, 광원에서는 사용하고자 하는 모든 파장대역에서 빛을 방출하고, RN에 있는 AWG에서 할당된 파장에 해당하는 빛을 필터링하여 OLT로 보내는 것이다.

이 경우는 가입자는 자신에게 할당된 파장이 무엇인지 모르더라도, AWG의 필터링 과정에서 파장이 정해지므로 파장 독립 ONT의 구현이 가능하다. 그러나, 광대역 광원이 AWG를 통과하는 동안에 넓은 파장대역 중에서 각각의 ONT에 할당된 파장대역만이 통과되므로, 빛의 손실이 매우 크다. 따라서 고출력의 광대역 광원이 요구될 수밖에 없다. 한편, 주어진 광원을 이용하여 전화국과 통신하기 위해 신호를 변조시킬 수 있는 방안도 함께 고려되어야 한다. LED나 SLD를 사용하는 경우는 직접 변조가 가능하다는 장점이 있는 반면, 충분한 출력을 얻을 수 없다. 이러한 소자는 고출력인 경우 가격이 매우 고가이다. 또한, 광증폭기의 ASE를 이용하는 경우(EDFA; Erbium Doped Fiber Amplifier)는 충분한 출력을 얻을 수 있으나, 고가의 외부변조기(EM; External modulator)를 사용해야 한다. 따라서, 광대역 광원을 이용하여 파장에 무관한 ONT를 구현할 수는 있으나 경제성이 떨어진다.

현재까지 Lucent, Nokia, Corning 등 세계적인 몇몇 연구 그룹에서 다양한 파장 무의존성 광원 기술을 제안해 오고 있다. 1995년에 Lucent에서는 광대역 광원(ASE 광원)을 스펙트럼 분할(spectrum-slicing)하는 기술을 이용하여 WDM 광원을 구현하는 기술을 개발하였다[4]. 또한 Nokia에서 고출력 LED와 FEC기술을 이용하여 WDM-PON을 구현한 사례가 발표되었다[5].

3.2 OLT에 집중된 광원

지금까지는 각각의 ONT에 독립된 광원이 존재하

는 경우를 검토해 보았다. 이에 반해, ONT에서는 별도의 광원을 사용하지 않고 모든 광원이 OLT에 집중하는 방법이 있다. 즉, ONT에서는 광원을 사용하지 않고, OLT에 광원에 두고 이를 ONT로 보내며, ONT에서는 OLT에서 오는 광원을 변조하여 다시 OLT로 보내는 방법으로 상향 데이터를 전송하는 방법이다. 이러한 방법에서는 OLT에 별도의 광원을 사용하지 않고 OLT에서 보내는 광원을 이용하므로, ONT에서 광신호를 변조하는 변조기능만 수행하면 된다. 따라서, 근본적으로 파장에 무관한 ONT를 구현할 수 있는 방안이다. 그러나, ONT에서 광변조기를 추가로 사용하므로 경제성에 대한 검토가 필요하다.

3.2.1 상향신호 전송용 OLT의 광원

먼저 OLT에서 ONT로 보내는 광원으로는 다음과 같은 방법이 있다.

- 별도의 상향 신호 전송용 광원
 - 파장고정 광원
 - 광대역 광원
- 하향 데이터 전송용 광원

별도의 상향 신호 전송용 광원을 이용하는 경우는 다시, ONT에서의 3.1.1에서와 같은 파장고정 광원을 사용하는 방법과 3.1.3의 광대역 광원을 사용하는 방법이 있을 수 있다. 파장고정 광원을 사용하는 방법은 광신호의 가간섭성이 높기 때문에 ONT로 보내는 광신호 중에서 반사되는 성분과 ONT에서 변조되어 OLT로 전송되는 신호간에 간섭으로 인하여 단일 광섬유를 사용하는데 어려움이 있다. 따라서 OLT에서 ONT로 광원 전송을 위한 별도의 광섬유를 사용해야 하는 단점이 있다. 그리고, 3.1.1에서 언급한 것처럼 각각의 ONT를 위해 별도의 파장에서 동작하고 온도 제어가 필요한 DFB 레이저를 사용하기 때문에 경제성이 떨어진다. 반면, 3.1.3에서와 같이 광대역

광원을 보내는 경우는 ONT로 보내는 광신호 중에서 반사되는 성분과 ONT에서 변조되어 OLT로 전송되는 신호간에 간섭으로 인한 잡음이 대폭 감소하므로 단일 광섬유를 사용하는 것이 가능하다.

하향 데이터 전송용 광원을 ONT에서 다시 변조하여 상향 데이터 전송용 광원으로 사용하는 경우는 상향 데이터의 전송속도가 하향 데이터 전송속도보다 충분히 낮아야 하고, 선로에서 반사가 있는 경우는 단일 광섬유를 사용하는데 여러 가지 어려움이 따른다[6].

3.2.2 ONT에서의 광변조 방법

ONT에서 사용할 수 있는 광변조기로는 다음과 같은 방법이 있다.

- 외부변조기
- 반도체 광증폭기
- Fabry-Perot 레이저 다이오드 (F-P LD)

이 중에서 외부 변조기는 삽입 손실이 크고, 가격이 고가이므로 광가입자망에 응용하기 위해서는 경제적이며, 삽입손실이 적은 외부 변조기의 구현이 요구된다[4]. 반도체 광증폭기 (Semiconductor Optical Amplifier)를 사용하는 경우는 오히려 이득을 얻을 수 있고 직접 변조가 가능하기 때문에 외부 변조기를 별도로 사용하지 않아도 되는 장점이 있다. 그러나, 이 방법은 경제적인 반도체 광증폭기가 구현되어야 상용화 할 수 있을 것이다.

2001년 영국의 Corning 사에서는 RSOA (Reflective Semiconductor Optical Amplifier)로 외부변조기를 대체하여 colorless ONT를 구현하였으나, RSOA의 단가가 여전히 높아 경제성이 많이 떨어진다. 한편, Fabry-Perot 형태의 광증폭기/레이저를 사용하는 방법은 직접 변조가 가능하고 경제적이라는 장점이 있다. 하지만, OLT에서 ONT로 보내

는 광원이 가간섭성이 높은 파장 고정 광원 일 경우 (Injection locked Fabry-Perot laser diode), 주입되는 광파 F-P LD 모드가 일치하지 않을 때 불안정하게 동작할 수 있고 주입되는 파워에 따라 안정적으로 동작하는 영역이 변화하기 때문에 시스템에 사용할 수준으로 안정화하는데 여러 가지 어려움이 예측된다[8]. 하지만, OLT에서 ONT로 보내는 광원이 광대역 광원일 경우 이러한 문제는 존재하지 않으며 경제적인 파장 무의존 ONT를 구현할 수 있다. 이에 관해서는 다음 절에서 논의하기로 한다. <표 2>는 지금까지 논의한 WDM-PON에 사용 가능한 광원들을 비교한 것이다.

3.3 경제성이 제고된 파장 무의존 ONT

현존하는 광원들 중에서 가장 경제성이 좋은 것은 TDM-PON에서 사용하는 F-P LD 이므로, WDM-PON의 경제성을 제고하기 위해서는 F-P LD를 사용하는 것이 가장 바람직하다. F-P LD는 변조시에 다중모드로 발진하므로 광대역 광원처럼 이를 ONT의 개별 광원으로 사용하고 AWG에서 단일모드만을 필

터링하여 OLT에 보내는 방법을 생각할 수 있다. 그러나, F-P LD의 여러 모드 중에서 단일 모드만을 필터링하면 잘 알려진 모드분할 잡음(mode partition noise)으로 인하여 통신이 불가능하다. 그래서, F-P LD는 경제적임에도 불구하고 WDM-PON용 광원으로 사용하지 못하는 것으로 잘 알려져 있다. 그러나, 다중모드로 발진하는 F-P LD에 저전력의 광대역 비간섭성 광을 파장영역에서 필터링하여 주입 하면 레이저는 주입된 파장에 파장잠김되어 다중모드에서 단일모드로 발진하게 된다. 이러한 특성은 F-P LD를 직접변조 하는 경우도 유지된다. 이와 같이 단일모드로 발진하는 F-P LD는 모드분할잡음이 현격하게 감소되어 F-P LD를 WDM-PON용 광원으로 사용할 수 있다[9].

(그림 3)에 파장 잠김 F-P LD의 구성도를 나타내었다. 광대역 광원 (BLS)은 광증폭기를 이용하여 구현된다. CO(central office)에 위치하는 광대역 비간섭성 광은 RN의 AWG에 의해 필터링 되어 ONT의 F-P LD로 주입된다. 필터링된 비간섭성 광이 F-P LD에 주입되면 다중 모드로 발진하는 F-P LD가 앞에서 설명한 바와 같이 단일 모드로 발진하게 되어

<표 2> WDM-PON에 사용 가능한 광원 비교

구분		파장 제어	변조방식	변조속도	파장 무관 ONT 구현	경제성	비고	
ONT 개별 광원	파장 고정된 광원	필수	직접변조	2.5 Gb/s	불가능	낮음		
	파장 가변 광원	필수	직접변조	2.5 Gb/s	가능	낮음	파장모니터링	
	광대역 광원 (ONT)	LED	불필요	직접변조	< 1 Gb/s	가능	낮음	
		SLD	불필요	직접변조	< 1 Gb/s	가능	낮음	
EDFA BLS		불필요	외부변조	2.5 Gb/s	가능	낮음		
OLT 집중 광원	파장 고정된 광원 (OLT) +	외부변조기	필수	외부변조	2.5 Gb/s	가능	낮음	광원용광섬유필요
		SOA	필수	직접변조	~ 1 Gb/s	가능	낮음	광원용광섬유필요
		F-P LD	필수	직접변조	~ 1 Gb/s	가능	낮음	광원용광섬유필요
	광대역 광원 (OLT) +	외부변조기	필요 없음	외부변조	2.5 Gb/s	가능	낮음	
		SOA	필요 없음	직접변조	~ 1 Gb/s	가능	낮음	
		F-P LD	필요 없음	직접변조	~ 1 Gb/s	가능	높음	
	하향 데이터 재전송 방법 (상향속도 <<하향속도)		필수	외부변조	~ 1 Gb/s	가능	낮음	양방향전송문제

인접 모드 억제율(Side mode suppression ratio)이 증가한다. (그림 3) (b)와 (c)는 비간섭성 광을 주입하기 전과 주입한 후의 발진 스펙트럼과 데이터 전송 시의 아이 다이어그램(eye diagram)을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 비간섭성 광이 주입되기 전에는 다중모드로 발진하고 이중의 한 모드를 필터링하는 경우 모드분할 잡음으로 아이 다이어그램이 매우 나뻐울 수 있다. 그러나, 비간섭성 광을 주입하면 단일모드로 발진하고, 아이 다이어그램도 깨끗하게 된다. 즉, F-P LD의 모드분할 잡음이 현격하게 억제되고, 이 과정에서 F-P LD의 이득 포화(gain saturation)로 인해 필터링된 비간섭성광의 잡음도 감소된다. 주입효율을 높이기 위해 F-P LD의 전면 거울에 비반사 코팅을 하는 것이 바람직하다. 비반사 코팅은 레이저 공진기의 Q(Quality factor)를 감소시키므로, 주입되는 비간섭성 광의 파장과 레이저 공진기 모드가 일치하였을 때와 일치하지 않았을 때의 주입 잠김된 레이저의 특성변화를 감소시킨다. 따라서, F-P LD를 주입되는 파장에 상관없이 항상 WDM-PON용 광원으로 사용할 수 있도록 한다. 즉, F-P LD는 경제적인 파장가변 레이저, 혹은 이득을 갖는 변조기로서 동작하게 되어 파장에 무관한 ONT의 구현을 가능하게 한다. 이 구조에서는 비간섭성 광을 주입하기 때문에 가간섭성 광을 주입할 때 발생하는 여러 가지 불안정성[8] 문제가 없다.

이러한 방법은 KAIST에서 2000년 제시[9]된 이래 많은 연구 개발이 진행되고 있다[10]. 이 방법으로 구현 가능한 가입자당 전송 속도는 1.25Gb/s 이상이다. 또한, EDF (Erbium Doped Fiber) 광증폭기에 기반한 BLS를 사용하면서 채널간격을 50 GHz로 하는 경우 한 가닥의 광섬유에 80 가입자까지 수용이 가능하다. 제안하는 방법을 이용하는 시스템 기술은 현재 KT와 Novera Optics 사가 공동개발하고 있다. 시스템 기술은 2004년 8월에 LG 전자, 로커스 네트워크

스, 삼우 전자, 성화통신에 기술이전 되었다. 한편, LG 전자가 구현한 WDM-PON 시스템은 2005년 2월부터 광주지역에 FTTH 상용 서비스가 진행 중에 있다. 또한, 노베라가 개발한 FTTP(Fiber-to-the-pole)형 시스템은 금년 상반기부터 KT망에 본격 도입 되고 있다.

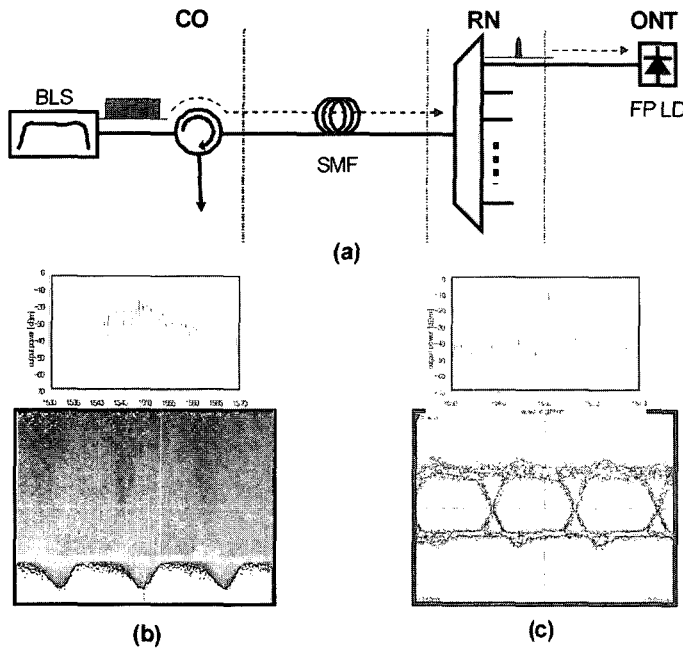
IV. TDM-PON의 고속화

E-PON이나 B-PON과 같은 TDM-PON을 이미 사용하고 있다고 가정하고 다가오는 영상 중심의 서비스를 수용하기 위해서 가입자당 제공하는 대역폭을 높여야 하는 경우의 대안들을 살펴보면 다음과 같다.

- TDM-PON의 속도를 높이는 방법
- WDM-PON으로 진화시키는 방법
- 압축기술을 사용하여 영상서비스가 요구하는 대역폭을 줄이는 방법

먼저 TDM-PON의 속도를 높이는 방법은 고속전송으로 인한 광수신기의 수신감도 저하, 색분산의 영향으로 인한 신호 왜곡의 증가, 버스트 모드 광수신기 구현의 어려움 등 많은 문제점들이 있다. TDM-PON이 저가인 것은 저가 광원인 F-P LD를 사용하기 때문인데, 전송속도가 1 Gb/s 이상이고 전송거리가 20 km 이상이 되면 변조시에도 단일 모드로 발진하는 고가의 DFB 레이저를 채용해야 하기 때문에 경제성이 떨어진다. 특히 전송속도가 2.5 Gb/s인 G-PON의 경우는 고풍력 DFB 레이저와 고감도 광수신기가 필요하므로 경제성이 더 떨어진다.

다음 방법으로는 TDM-PON을 WDM-PON으로 전환하는 것을 생각할 수 있다. 이를 위해서는 TDM-PON에서 사용하는 원격 노드의 광분배기(PS)를 광파장 라우터(AWG)로 교체하고 각 가입자 및 CO의



(그림 3) (a) 파장잠김 F-P LD의 구성도, (b) 비간섭성 광이 주입되기 전의 스펙트럼 및 아이 다이어그램, (c) 비간섭성 광이 주입된 후의 스펙트럼 및 아이 다이어그램

ONT와 OLT의 광원을 WDM용 광원으로 교체해야 하며, 이는 많은 비용을 요구한다. 특히, TDM-PON에 설치된 광분배기가 여러 군데 있는 경우는 원격 노드의 교체가 어려우므로, 광섬유 인프라는 그대로 두고 OLT 및 ONT의 광원을 파장이 고정된 DFB 레이저로 교체하고 광수신기 전단에 광필터를 삽입하는 방안을 고려할 수 있다. 이 경우 광신호가 광분배기로 분배되기 때문에 생기는 높은 손실로 인하여 많은 기술적인 어려움이 예측된다. 따라서, TDM-PON으로 FTTH를 구축하고 차후 WDM-PON으로 고속화하는 것은 처음부터 WDM-PON으로 구축하는 것보다 경제성이 떨어질 것으로 예측된다.

마지막으로 PON의 대역폭을 증가시키는 것이 아니라, 가입자당 대역폭을 압축기술을 이용하여 감소시키는 것이다. 현재 많이 시도되고 있는 방법은

MPEG4 (H.264) 표준에서 제시하는 압축기술을 이용하여 기존의 MPEG2 압축 기술을 이용하는 것보다 영상서비스에 필요한 대역폭을 1/2 정도 줄이는 것이다. 즉, HDTV 경우를 보면 MPEG 2의 20 Mb/s를 MPEG 4 (H.264)에서 8-9 Mb/s 정도로 줄일 수 있다. 그러나 아직 디코딩을 위한 상용화된 IC가 없으며, 기술이 안정화되기까지는 몇 년이 소요될 것으로 예측된다. 그러나, 고비용으로 압축된 신호를 재생하기 위해서 가입자 단말이 복잡해 지고 신호처리 비용이 증가하는 문제점이다.

또한, MPEG4를 사용하더라도 3채널의 HDTV를 제공 해야 하는 경우 요구되는 하향 대역폭은 40

Mb/s 이므로 현재의 TDM-PON으로는 충분한 대역폭을 제공하지 못할 뿐만 아니라, 앞으로 개발될 새로운 영상서비스의 수용에 한계가 있다.

V. 결론

FTTH 가입자가 200 만명을 돌파한 일본에서는 초창기에 AON 이나, B-PON 을 위주로 FTTH를 구축 하였으나, 최근에는 E-PON을 사용하고 있다. 일본은 서비스의 차별화에 의한 경쟁이 아니라 지속되는 속도 경쟁에서 NTT가 다른 사업자를 추월하기 위해서 B-PON에서 E-PON으로 변경하였다. 반면에 미국의 큰 통신회사에서는 장비제조 업체간에 상호 연동이 보장되지 않고 기존의 전화 서비스(POTS)가 어

려운 E-PON은 고려하고 있지 않으며, 상호연동이 보장되고 운용유지 기능이 좋은 B-PON을 사용하기로 결정하였다. 한편 이들 국가에서는 IP 중심으로 모든 서비스를 융합하는데 기존의 E-PON과 B-PON의 한계를 인식하고, 일본은 이미 다음 단계로 WDM-PON을 고려하고 있다고 발표하였으며, 미국의 경우는 B-PON에서 다음 단계로 G-PON을 사용하는 것으로 보도되고 있다.

한국에서는 KT가 파장잠김 F-P LD를 이용한 WDM-PON 기술을 2003년부터 부산지역에 시험 적용하여 실가입자를 중심으로 서비스를 하고 있고, 금년 2월에 광주에서 WDM-PON 기반 FTTH 실가입자를 모집하여 시험 사업을 진행하고 있다. 이와 같이 FTTH 분야에서 우리는 궁극적인 가입자망인 WDM-PON을 세계 최초로 개발하여 이미 상용화 단계에 접어들었다.

가입자마다 독립된 파장을 할당하여 전화국과 통신을 함으로써, 점 대 점 시스템과 동일한 효과를 얻으면서, 광섬유를 절약할 수 있는 WDM-PON이 가장 이상적인 가입자망이라는 데는 재론의 여지가 없다. 하지만, WDM-PON은 구조상으로 OLT에 가입자 수만큼의 광송수신기를 사용하여야 하기 때문에 OLT에서 하나의 광송수신기를 사용하는 TDM-PON보다 경제성에서 불리하다. 그러나, TDM-PON은 OLT에서 하나의 광송수신기를 사용하므로, 가입자당 보장하는 대역폭이 좁고, QoS 보장이 어렵고, 보안성이 취약하며, 가입자측 레이저 제어회로의 고장은 PON 전체의 동작을 마비시킬 수 있어 오히려 단점으로 작용한다. 따라서, TDM-PON과의 경제성 비교는 WDM-PON의 높은 대역폭 보장 (100 Mb/s 이상), 완벽한 보안성 및 QoS 보장성, 고속화의 용이성 등의 장점들을 종합적으로 고려하여 심도 있게 행해져야 할 것이다. 아울러 FTTH를 구축하는 경우, 인프라에 해당하는 광섬유 및 원격노드는 수명이 20년

이상이므로, 장기적인 안목에서 검토하고 기술방식을 선정하여야, 향후 인프라의 교체 및 재투자 등으로 인한 경제적 손실을 최소화할 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 이창희, 백진석, 박근열, " FTTH 구축방안 분석, " 대한전자공학회지, pp. 100-200, 2005
- [2] Denis J.G. Mestdagh, *Fundamentals of Multiaccess optical fiber networks*, Artech house, Boston
- [3] Soo-jin Park, Chang-Hee Lee, Ki-Tae Jeong, Hyung-jin Park, Jeong Gyun Ahn and Kil-Ho Song, "Fiber-to-the-Home Services Based on Wavelength-Division-Multiplexing Passive Optical Network," IEEE Journal of Lightwave Technol. vol. 22, no. 11, pp. 2582-2591, Nov. 2004
- [4] Zirngibl, M, Doerr, C.R, Stulz, L.W, "Study of spectral slicing for local access applications," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 8, no. 5, pp. 721-723, May. 1996
- [5] Oksanen, M, Hiironen, O.-P, Tervonen, A, Pietilainen, A, Gotsonoga, E, Jarvinen, H, Kaaja, H, Aarnio, J, Grohn, A, Karhiniemi, M, Moitchanov, V, Oikkonen, M, Tahkokorpi, M, Wallenius, T, "Spectral slicing passive optical access network trial," ThH2, OFC, Mar. 2002
- [6] L.Y. Chan, C.K. Chan, D.T.K. Tong, F. Tong, L.K. Chen, " Upstream traffic transmitter using injection-locked Fabry-Perot laser diode as modulator for WDM access

networks," Electronics Letters, Vol.38, No.1, pp.44-45, Jan, 2002

- [7] Healey, P., Townsend, P., Ford, C., Johnston, L., Townley, P., Lealman, I., Rivers, L., Perrin, S., Moore, R., "Spectral slicing WDM-PON using wavelength-seeded reflective SOAs," Electronics Letters, Vol.37, No. 19, pp.1181-1182, Sept. 2001
- [8] Mogensen, F., Olesen, H., Jacobsen, G., "Locking conditions and stability properties for a semiconductor laser with external light injection," IEEE Journal of Quantum Electron., vol. 21, no. 7, pp784-793, July. 1985
- [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] <http://photonet.kaist.ac.kr/homepage/index.htm>



이창희

1979년 ~ 1983년 한양대학교 전자공학과 공학사
 1983년 ~ 1985년 한국과학기술원(KAIST) 전기및전자공학과 공학석사
 1985년 ~ 1989년 한국과학기술원(KAIST) 전기및전자공학과 공학박사
 1989년 ~ 1990년 Bellcore 연구소(미국) 박사후 연구원(Post Doc.)

1990년 ~ 1997년 한국전자통신연구원(ETRI) 선임 연구원
 1997년 ~ 현재 한국과학기술원(KAIST) 전자전신학과 교수