

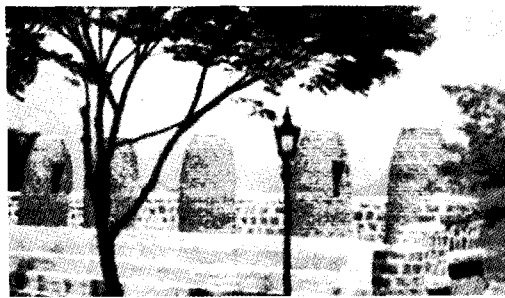
현대광공학 개론 X : 광통신

이종창*

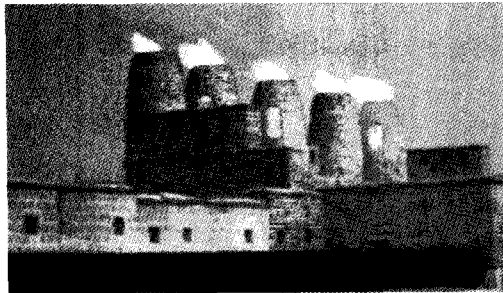
광통신은 기술과 응용분야에서 아직 젊고 역동적이다. 젊다는 것은 그 역사가 불과 30년 남짓하기 때문이며, 역동적이라 함은 그 발전속도가 가히 기하급수적이기 때문이다. 빛을 정보전달매체로 사용하는 개념은 이미 역사 속에서 무수히 나타나 있다. 예를 들면 고대 그리스인들이 전쟁터에서 거울로 햇빛을 반사하여 전투신호를 내렸다가, 유럽의 선원들이 랜턴을 이용하여 모르스부호로 메시지를 전달했던 것 등이다. 우리나라의 예로서는 조선시대 이전부터 국가 중대사에 대한 통신수단으로 활용한 봉수대 등이 있다. 이 제도는 밤에는 불, 낮에는 연기로 신호하는 것으로 평상시에는 하나, 적이 나타나면 둘, 경계에 접근하면 셋, 경계를 침범하면 넷, 경계에 적과 아군이 접전중이면 다섯을 피우도록 하였

다. 그림 10.1에 서울과 수원의 봉수대의 사진과 아울러 팔도 봉수 네트워크가 나타나 있다. 이 지도를 보면 봉수대가 제주도에서 간도지방까지 치밀하게 연결되어 있음을 알 수 있다.

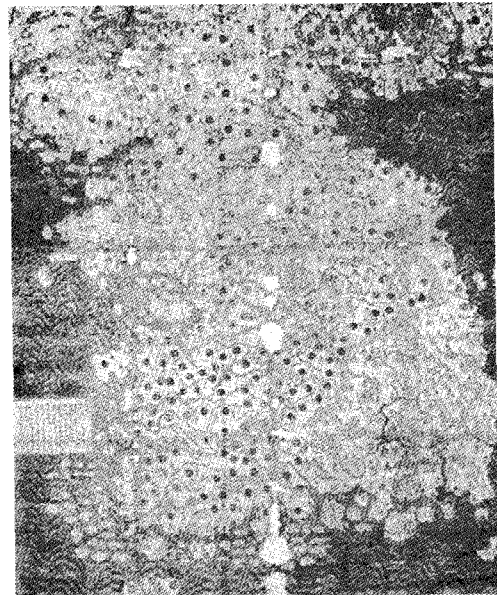
그러나 오늘날 우리가 광통신이라고 일컫는 것은 1958년 샤로우(A. Schawlow)와 타운즈(C. Townes)가 레이저를 발명하여 빛의 특성이 획기적으로 개선되고, 1970년대 벨연구소와 코닝사가 광섬유를 보급하기 시작한 때로부터 비롯된다. 이 광섬유가 개발되기 전까지는 빛의 직진성과 발산성으로 인해 신호전달구간이 사람의 가시거리로 제한되었다. 그러나 광섬유는 빛의 방향을 자유자재로 바꿀 수 있을 뿐만 아니라, 빛에너지를 광섬유 내에 모아서 외부로 발산하지 않게 함으로써



(a) 서울의 봉수대



(b) 수원의 봉수대



(c) 조선시대 팔도 봉수망 지도

그림 10.1 조선시대의 봉수대와 봉수망

* 홍익대학교 전자전기공학부 교수

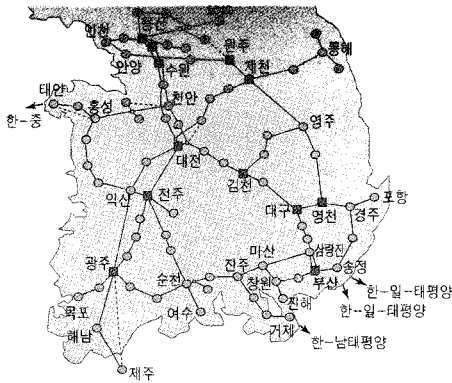


그림 10.2 오늘날의 광섬유통신망

빛이 수백 km 이상의 먼 거리까지 전달될 수 있도록 하였다. 아울러 레이저 다이오드와 포토 다이오드 등과 같은 광소자의 동작속도가 봉화대나 랜턴의 점멸속도보다 수십억 배 이상 빠르기 때문에 그만큼 더 많은 양의 정보를 더 빨리 보낼 수 있다. 그러므로 오늘날 광섬유만 포설할 수 있다면 세계 어느 곳이나 대용량의 정보를 초고속으로 전달할 수 있다. 이 광섬유망으로 구성된 국가 기간망과 가입자망의 초고속화로 인하여 이른바 정보통신혁명이 일어나게 되었다. 그림 10.2는 현재 우리나라의 광통신망의 일부분을 보여준다. 이 기간망은 최고 40Gbps부터 최하 155Mbps까지의 광통신이 가능한 선로로서 같은 구간에 수십에서 수백 가닥 포설되어 있다. 이 그림에 있는 것 이외에도 여러 광통신 회사가 포설한 서로 다른 광섬유통신망이 함께 존재한다. 본 장에서는 이와 같은 광통신기술의 현주소를 이해하기 위하여 먼저 광섬유의 원리 및 특성을 이해하고, 아울러서 제반 광통신 시스템의 구성요소 및 통신방식을 살펴보고 마지막으로 광통신의 현황을 검토한다.

10.1 광통신방식

10.1.1 광통신링크

광통신의 가장 간단한 예가 그림 10.3과 같은 오디오용 광케이블이다. 마이크로나 오디오 기기로 들어온 아날로그 전기신호를 디지털 부호기(digital encoder)에서 디지털 신호로 바꾸어준다. 이 신호를 레이저 다이오드의 주입전류로 사용하면 레이저 다이오드의 광출력은 주입전류에 비례하므로 레이저 다이오드의

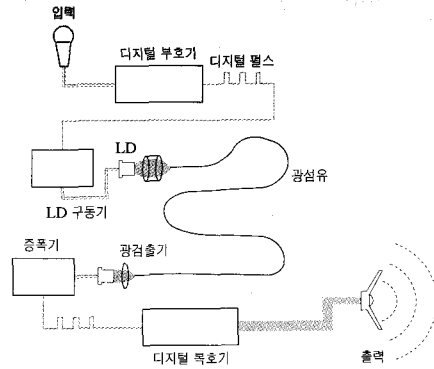


그림 10.3 광섬유를 이용한 오디오링크

광출력파형은 주입전류의 파형과 같아진다. 이 과정을 광변조(modulation)라 하며, 특히 레이저와 같은 광원에 직접 신호를 인가하는 방식을 직접변조라 한다. 한편 레이저 다이오드에서 나온 빛을 렌즈 등을 이용하여 광섬유에 입사시키면 이 빛은 광섬유를 따라 진행한다. 그러므로 전선을 이용하여 전기회로망을 꾸미듯 광섬유를 이용하여 광연결망을 꾸밀 수 있다. 이 광섬유를 따라 진행한 빛은 수신단의 광검출기에서 빛의 파형에 따라 미세한 광전류를 발생한다. 전자증폭기로 이를 증폭한 후 디지털 복호기(digital decoder)에 입력하면 아날로그 신호로 변환된다.

디지털 부호기와 복호기는 사전에 약속한 법칙에 따라 아날로그 신호와 디지털 신호를 변환하는 장치이다. 이는 조선시대 봉수대에서 적의 동태를 아날로그 신호에 비유하고 봉화의 수를 디지털 신호에 비유할 때, 봉수꾼이 수행했던 역할이 바로 디지털 부호기와 복호기 기능이다. 이와 같이 디지털 복호기의 출력신호를 스피커나 이어폰 등에 연결하면 원래 마이크로폰에서 나온 파형과 같은 소리를 얻는다.

10.1.2 다중통신방식

한편 위의 오디오 광케이블을 스테레오 시스템이나 5.1 채널 시스템에 적용하기 위해서는 오디오 채널의 수만큼 광케이블의 수도 늘어나야 한다. 그러나 다중(multiplexing)방식을 이용하면 광케이블의 수를 늘리지 않고서도 여러 채널의 신호를 한 개의 광케이블을 통해서 전송할 수 있다. 광통신에서 일반적인 다중방식은 시분할다중방식(time division multiplexing; TDM)

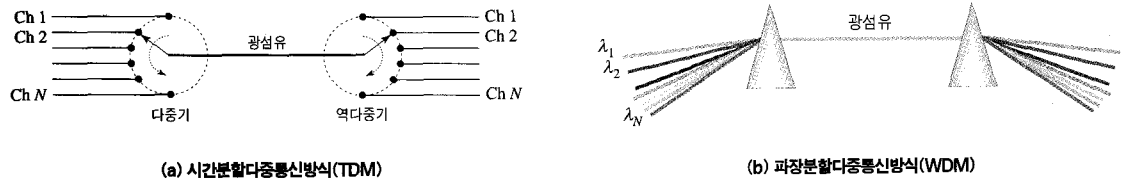


그림 10.4

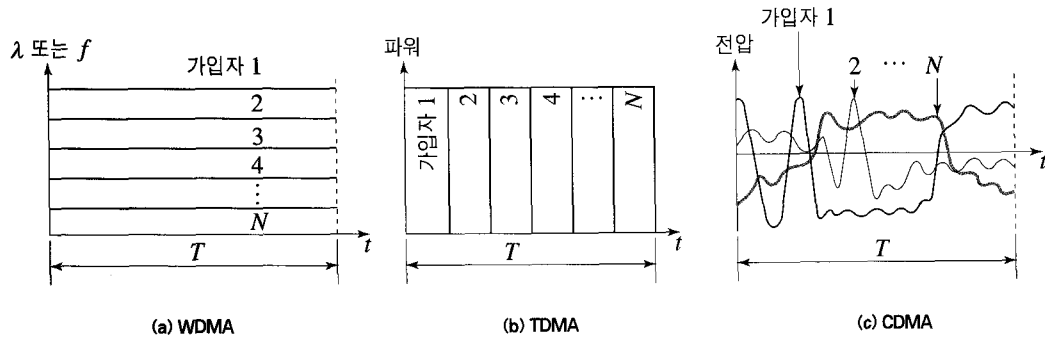


그림 10.5

과 파장분할다중 방식 (wavelength division multiplexing: WDM)이 있다.

그림 10.4는 TDM 방식의 원리와 WDM 방식의 원리를 설명하는 개략도이다. 먼저 TDM 방식은 그림 10.4(a)와 같이 여러 채널의 신호를 서로 번갈아가면서 전송하는 것이다. 예를 들어 256kbps의 오디오 신호 6채널을 보내기 위해서는 256,000분의 1초의 주기를 T 라 하면 처음 $T/6$ 초 동안은 첫 번째 채널, 그 다음 $T/6$ 초 동안은 두 번째 채널 등으로 각 채널의 신호를 전송한다. 그러면 수신단에서도 처음 $T/6$ 초 동안 도달하는 신호는 첫 번째 채널, 그 다음 $T/6$ 초 동안 도달하는 신호는 두 번째 채널 등으로 인식하여 분류하면 6채널의 신호를 하나의 통신선로를 통해서 무사히 전송할 수 있게 된다. 송신단에서 여러 채널의 신호를 시간별로 채집하여 출력하는 전자소자를 다중기(multiplexer: MUX)라 하며, 반대로 수신단으로 들어온 신호를 시간별로 분류하여 여러 채널로 나누어주는 전자소자를 역다중기(demultiplexer: DEMUX)라고 한다. 이와 같이 TDM 방식에서는 채널의 수가 증가함에 따라 신호처리 속도가 증가하여야 한다.

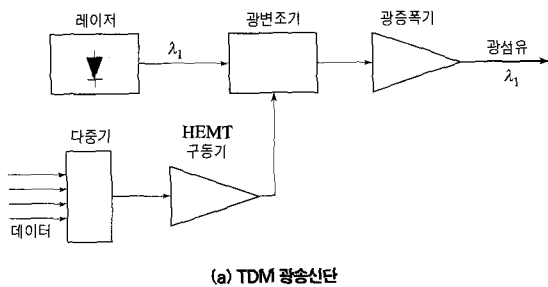
한편 WDM 방식은 여러 채널의 신호를 서로 다른 파

장의 광신호로 변조한다. 그림 10.4(b)에서와 같이 프리즘 등과 같은 소자를 이용해서 하나의 광섬유에 입사하는 방식이다. 수신단에서도 같은 방식으로 서로 다른 파장성분을 분류해 내면 파장별로 서로 다른 채널의 신호를 복원해 낼 수 있다. 이 방식은 각 채널별로 사용하는 파장이 일정한 차이가 나도록 지정해 주어야 한다.

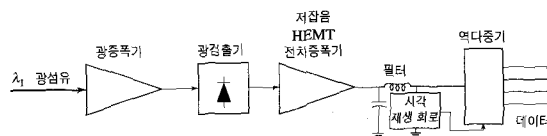
이와 같이 통신 채널의 수를 늘리는 방식을 다중통신 방식(multiplexing)이라고 하며, 특별히 디지털 통신에서는 이를 다중가입방식(multiple access)이라 한다. 이 방식에는 파장분할다중가입(WDMA)과 시간분할다중가입(TDMA) 외에 시간과 파장을 결합하여 사전에 약속한 암호로 처리해서 보내는 부호분할다중가입(code division multiple access: CDMA)이 있다. 이를 시간과 파장 공간에서 나타내면 그림 10.5와 같다. WDM 방식에서는 광섬유에 채널별로 여러 파장의 신호가 동시에 존재한다. TDMA 방식에서는 파장은 동일하지만 채널별로 주어진 시간에만 존재한다. CDMA 방식에서는 채널별로 고유의 암호패턴을 갖는다.

(가) TDM 방식

TDM은 여러 채널에서 나온 광펄스가 일정한 시간간



(a) TDM 광송신단



(b) TDM 광수신단

그림 10.6

격을 가지고 하나의 광섬유를 통과하는 방식이다. 먼저 광송신단(optical transmitter)은 그림 10.6(a)와 같이 광원인 반도체 레이저, 전기적인 신호를 광신호로 변환하는 광변조기(optical modulator), 그리고 광신호를 증폭하는 광증폭기(optical amplifier) 및 초고속 전자소자인 HEMT(high electron mobility transistor) 증폭기와 다중기(multiplexer) 등으로 이루어진다. 그리고 광수신단은 그림 10.6(b)와 같이 광검출기(photodetector)와 저잡음 HEMT 전치증폭기(pre-amplifier) 및 역다중기(demultiplexer) 등의 전자소자로 이루어진다.

TDM 방식은 송신단과 수신단의 시간의 동기화(synchronization)가 매우 중요하다. 즉, 송신단에서 보낸 채널의 시간간격과 수신단에서 설정한 채널의 시간간격이 조금이라도 달라지면 채널과 채널 사이에 혼선이 생긴다. 이를 방지하기 위하여 수신단에서는 수신된 신호의 채널간격을 자동으로 검출할 수 있는 시각재생(clock recovery)회로를 부착한다. 특별히 각 채널별로 디지털 신호를 보낼 때는 펄스와 펄스 간의 간격이 일정하여야 한다. 세계적으로 통용하고 있는 디지털 송수신 표준속도는 아래 표 10.1과 같다.

이 표에서 SONET(Standard Optical Network)는 유럽의 표준이며, SDH(Synchronous Digital Hierarchy)는 미국의 표준이다. 표 10.1의 세 번째 열은 단일광섬유로 송수신할 수 있는 음성전화채널의 수를 각 표준속도별로 나타내었다. 참고로 인터넷전송선의 표준속도는 T1인 경우 1.54Mbps이며, E1인 경우는 2.05 Mbps, T3인 경우 45Mbps이다.

표 10.1 디지털 송수신의 표준속도

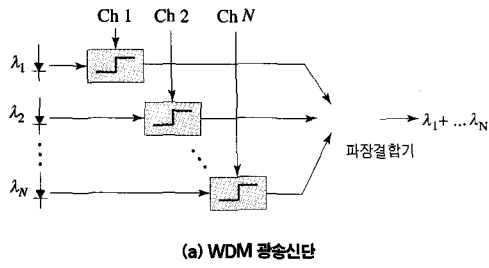
SONET Level	Rate(Mbps)	Voice Channel	SDH Level
OC-1	51.84	672	
OC-3	155.52	2,016	STM-1
OC-9	466.56	6,048	STM-4
OC-12	622.08	8,064	
OC-18	933.12	12,096	
OC-24	1244.16	16,128	
OC-36	1866.24	24,192	STM-16
OC-48	2488.32	32,256	
OC-96	4976.64	64,512	STM-64
OC-192	9953.28	129,024	

(나) WDM 방식

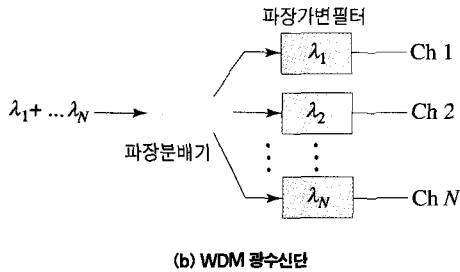
λ_1 을 갖는 단일파장 광통신 시스템과 $\lambda_2, \lambda_3, \dots$ 등의 서로 다른 파장을 갖는 광통신 시

스템을 조합하게 되면 파장분할다중(wavelength division multiplexing; WDM)시스템이 된다. 즉 각 채널에서는 위에서 언급한 광송신단[그림 10.7(a)]과 수신단[그림 10.7(b)]이 있으나 이러한 채널과 채널을 결합하는 파장결합기(combiner)는 서로 다른 파장의 광신호를 합성하며, 파장분배기(splitter)는 서로 다른 파장 성분을 분류한다.

WDM 통신방식의 수신단에는 파장별로 신호를 분류하기 위한 파장가변필터(tunable filter) 등의 소자가 추가로 필요하다. 아울러 WDM 시스템에서는 채널별로 일정한 파장을 가져야 한다. 일반적인 표준파장은 그림 10.8과 같다. 각 채널의 속도가 2.5Gbps 이하일 경우에는 1530nm에서 1560nm까지 0.375nm 간격으로 80개의 파장을 표준으로 설정하고 있다. 이 파장간격을 주파수로 환산하면 50GHz이다. 그러나 각 채널의 속도가



(a) WDM 광송신단



(b) WDM 광수신단

그림 10.7

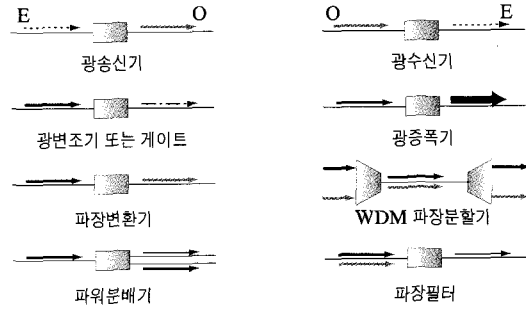


그림 10.9 광기능 소자의 종류

와 같은 광송신기(transmitter), 광신호(O)를 전기신호(E)로 변환하는 PD와 같은 광수신기(receiver) 외에도 그림 10.9와 같이 다양한 소자가 필요하다. 이 중에는 광신호를 변조하는 광변조기, 광신호를 증폭하는 광증폭기, 출력 파장을 바꾸는 파장변환기, 서로 다른 파장

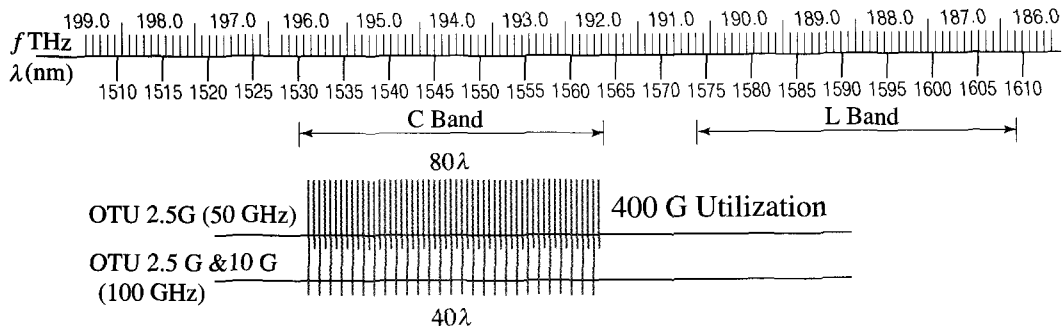


그림 10.8 WDM 표준파장 규정

10Gbps일 경우에는 파장간격을 0.75nm로 늘려잡고 있다. 이 경우의 채널당 주파수 간격은 100GHz이다. 이와 같이 1550nm 파장 부근에서 사용 가능한 대역폭은 약 400GHz이며, 이를 C 밴드라 한다. 이 밖에 1570~1610nm 사이의 L 밴드에서도 약 400 GHz의 가용밴드가 있다.

10.2 광통신 소자

본 절에서는 광통신에서 사용하는 핵심 소자의 기능과 동작원리를 살펴본다. 광통신에 필요한 광전자 소자는 전기신호(E)를 광신호(O)로 변환하는 레이저 다이오드

의 빛을 결합하였다가 파장에 따라 분리해 주는 파장분할기, 그리고 광신호를 분배해 주는 광분배기 등이 있다. 본 절에서는 이와 같은 광기능 소자의 구조와 특성을 살펴본다.

10.2.1 광섬유

광섬유는 제12장에서 자세히 설명한 바와 같이 굴절률이 다른 경계면에서의 전반사 현상을 이용하여 빛을 임의의 방향으로 전송할 수 있는 소자이다. 광섬유의 구조와 광전송원리에 대한 개략도가 그림 10.10이다. 광섬유는 굴절률이 큰 중앙의 코어(core) 부분과 그 주위로 굴절률이 조금 작은 클래딩(cladding) 부분, 그리고

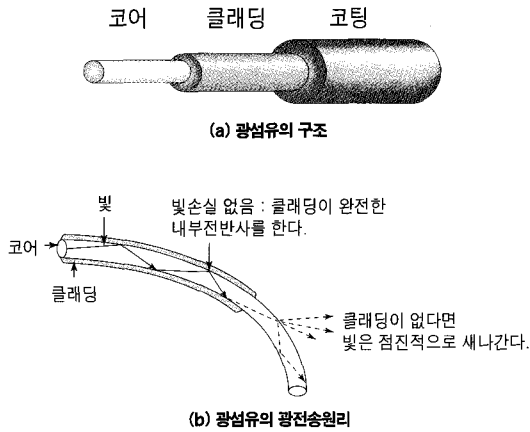


그림 10.10

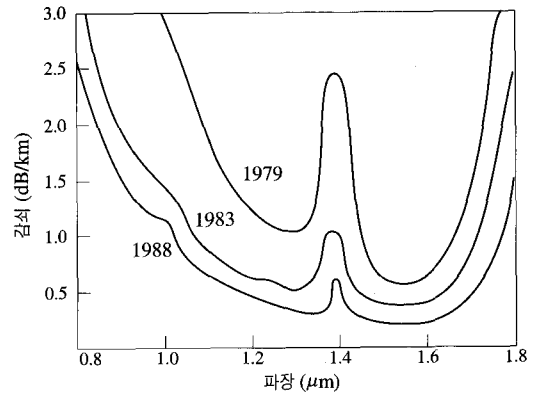


그림 10.11 광섬유의 파장에 따른 감쇠계수(꺾호 안 숫자는 연도를 나타낸다)

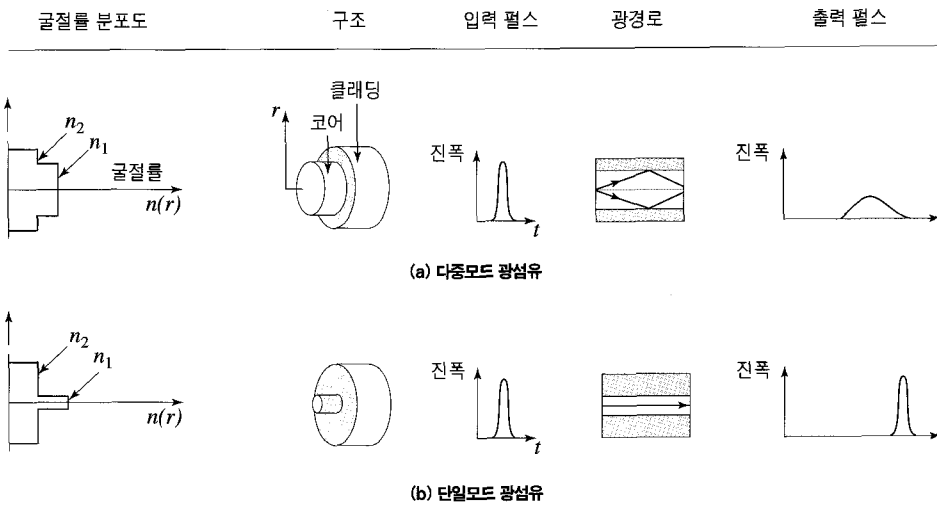


그림 10.12 여러 종류의 광섬유에 대한 반경에 따른 굴절률의 분포와 펄스분산

그 바깥을 둘러싸고 있는 재킷(jacket)의 세 부분으로 대별된다. 코어와 클래딩은 다같이 유리의 주성분인 SiO₂로 구성되어 있으나, 코어 부분에는 Ge이나 Boron 등의 불순물이 첨가되어 굴절률이 약 1% 정도 더 크다.

그리고 코어의 직경이 50μm 정도로 클 경우에는 다중 모드 광섬유(multimode fiber), 또 직경이 8~12μm 정도인 경우에는 단일모드 광섬유(single mode fiber; SMF)라 한다. 그리고 재킷은 이 코어나 클래딩이 끊어지거나 파손되지 않도록 기계적으로 지탱하는 역할을 한다. 광섬유를 통한 광신호의 전달은 이 코어 부분과 클래딩 부분 사이의 전반사(total reflection)에 의해 이

루어진다. 광섬유를 따라 진행되는 광신호는 전반사 때문에 그 에너지가 외부로 유출되지는 않지만 광섬유매질 자체의 손실 때문에 어느 정도 감쇠한다. 그림 10.11은 빛에너지가 광섬유에 의해 감쇠(attenuation)되는 정도를 파장별로 나타낸 것이다. 파장이 짧은 부분에서는 레일리 산란 손실과 UV 물질 손실에 의해 손실이 증가하며, 파장이 긴 부분에서는 IR 물질 손실 등으로 인해 감쇠계수가 증가한다. 그리고 1.4μm 근처의 파장에서는 광섬유에 함유되어 있는 OH기에 의한 흡수로 인해 손실이 증가한다. 그러므로 감쇠가 가장 작은 파장 영역은 1.3μm 근처와 1.55μm 근처이다. 이로 인해 현

재 광통신에 가장 널리 쓰이는 광파장은 1.3 μm 근처와 1.55 μm 근처이다. 이 파장 영역에서의 감쇠상수는 광섬유 생산기술의 발전으로 인해 1988년 당시 약 0.2dB/km 정도의 크기였고, 이 수치는 현재까지도 거의 같은 값을 유지하고 있다.

실제로 광섬유를 따라 진행하는 광신호의 궤적을 그려 보면 그림 10.12와 같이 광섬유의 구조에 따라 그 모양이 달라진다. 먼저 다중모드 광섬유(multi-mode fiber: MMF)인 경우 광섬유 안을 통과하는 광신호가 여러 경로를 따라 전파할 수 있다. 이 경우 그 경로 차에 의해 동시에 입사된 광신호가 진행하는 거리가 길어짐에 따라 광경로차(optical path difference)가 늘어나고, 이로 인해 출력단에 도달하는 시간이 달라져서 출력단에서 광신호의 펄스폭이 늘어나는 이른바 분산(dispersion)이 발생한다. 그러나 단일모드 광섬유일 경우는 광섬유 내를 통과하는 모든 광신호가 동일한 경로를 따라 진행하기 때문에 광경로차에 의한 펄스폭 분산이 매우 작다. 그러므로 광신호 펄스 간격이 매우 작은 초고속 광통신망에서는 장거리 광통신을 위해서는 단일모드 광섬유 사용이 필수적이다.

단일모드 광섬유인 경우일지라도 그림 10.13의 아래에서 보듯이 어느 정도의 펄스폭 확산은 불가피하다. 이러한 현상의 가장 주된 요인은 이른 색분산(dispersion)이라 할 수 있다. 이 현상은 프리즘을 통과하는 빛이 색깔에 따라 굴절각이 달라지는 것과 같다. 즉, 일반적인 유전체의 굴절률이 빛의 색깔에 따라 달라지기 때문이다. 실제 광통신에 쓰이는 반도체 레이저 다이오드 등의 광원에서 나오는 빛은 이상적인 단색광원과 달리 일정한 크기의 파장폭(linewidth)을 갖게 된다. 이 파장의 차이로 인해 같은 광펄스라 하더라도 광섬유를 지나는데 동안 서로 다른 파장 간의 굴절률 차이 또는 모드 차이 등으로 인해 펄스가 분산된다. 이 펄스폭의 분산을 나타내는 계수를 δ 로 나타내며, 이로 인한 광신호의 진행시차 Δt 는 다음 식과 같이 표시할 수 있다.

$$\Delta t = \delta \cdot \Delta\lambda \cdot L \quad (10.1)$$

여기서 δ 는 광섬유의 분산계수이며, $\Delta\lambda$ 는 광원의 파장폭이고, L 은 광섬유의 길이이다. 예를 들어 분산계수가 10ps/km/nm이며, $\Delta\lambda$ 는 1nm, 거리 L 이 100km이면

광신호의 진행시차는 $10(\text{ps/km/nm}) \times 1(\text{nm}) \times 100(\text{km}) = 1000\text{ps}$, 즉 1ns이다. 이러한 광통신 시스템의 대역폭 B 는 신호 펄스간격이 진행시차보다 작으면 안되므로 다음과 같다.

$$B = \frac{1}{2 \cdot \Delta\lambda} \quad (10.2)$$

따라서 위와 같은 조건이면 신호 대역폭은 약 500Mbps가 된다. 그러므로 이 대역폭을 2Gbps로 늘리기 위해서는 거리가 4분의 1로 줄든가, 레이저의 파장폭이 4분의 1로 줄어야 한다. 그러므로 장거리 광대역 광통신망을 구성하기 위해서는 파장폭이 작은 광원과 아울러 분산계수가 작은 광섬유가 필수적이다.

일반적인 단일모드 광섬유의 분산계수 δ 가 그림 10.13에 점선으로 그린 곡선이다. 이 그림에서 n 은 광섬유 코어의 굴절률 변화를 나타내며, N 은 단일모드 광섬유를 통과하는 광펄스의 체감굴절률(group index)을 나타낸다. 이 두 값이 서로 다른 것은 광섬유를 통과하는 펄스의 일부는 코어에, 다른 일부는 클래딩에 걸쳐서 가기 때문이다. 이 그림으로부터 분산계수가 작아져서 '0'이 되는 파장이 존재함을 알 수 있다. 이 파장은 광섬유에 따라 약간씩 다르나 대개 1.3 μm 부근이다. 앞의 그림 10.11에 그려져 있는 광섬유의 감쇠계수를 고려하면 1.55 μm 의 파장에서 최소의 감쇠계수를 얻을 수 있고, 그림 10.13에 그려져 있는 분산계수를 고려하면 1.3 μm 의 파장에서 '0'의 분산계수를 얻게 됨을 알 수 있다. 이

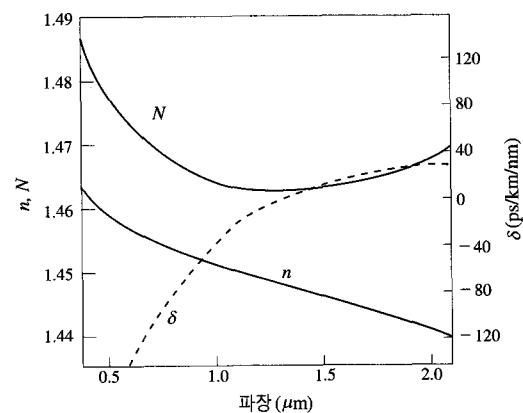
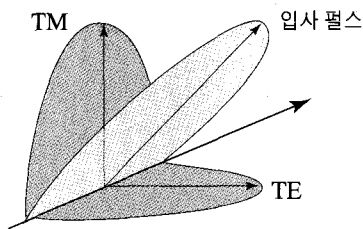
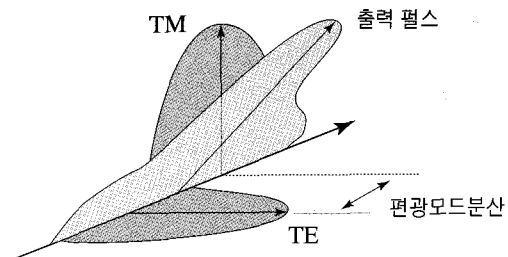


그림 10.13 단일모드 광섬유의 파장에 따른 굴절률 n 과 광펄스의 체감굴절률 N 및 분산계수 δ (점선)



(a) 입력단의 모드 성분



(b) 출력단의 모드 성분과 PMD

그림 10.14

두 가지를 모두 고려할 때 감쇠에 의한 영향이 더 심각한 광통신 시스템에서는 $1.55\mu\text{m}$ 파장을 광원으로 사용하는 것이 유리하며, 분산에 의한 광신호의 진행시차가 더 큰 제약 조건일 때는 $1.3\mu\text{m}$ 파장의 광원을 사용하는 것이 보다 더 유리할 것이다. 현대의 장거리 광통신 시스템에서는 $1.55\mu\text{m}$ 의 파장을 광원으로 쓰는 경향이 더 크다. 이런 시스템에서는 분산에 의한 광신호의 시차를 줄이기 위해서 특별히 $1.55\mu\text{m}$ 주위에서 분산계수가 '0'이 되는 이른바 분산천이광섬유(dispersion shifted fiber; DSF)를 제작하여 사용한다.

이 외에도 광섬유를 통과하는 광파의 편광을 일정하게 유지하는 편광유지광섬유(polarization maintaining fiber) 등의 특수광섬유 등이 활용되고 있다. 일반적으로 광섬유는 원형이므로 이상적인 광섬유 내에서는 TE 모드나 TM 모드의 구별이 없다. 그러나 실제의 광섬유는 광섬유 케이블에 미치는 압력이나 휨 정도에 따라 두 모드 간에 미세한 굴절률 차이가 생겨서 두 모드 간의 진행속도에 차이가 생긴다. 그림 10.14(a)와 같이 광펄스의 TE 성분과 TM성분이 광섬유를 진행하면서 속도의 차이가 나서 출력단에서는 그림 10.14(b)와 같이 펄스 폭이 넓어진다. 이를 편광모드분산(polarization mode dispersion; PMD)이라 한다.

초고속통신망에서 PMD는 대역폭 증가의 주요 장애 요인이다. 이를 줄이는 방법은 인위적으로 광섬유 내부의 편광을 회전시켜서 평균 편광모드분산값이 '0'이 되도록 하는 방법이 있다. 아울러 그림 10.15와 같이 광섬유의 한 축 방향으로 압력을 주어서 한 가지 편광만 존재하게 하는 편광유지광섬유(polarization maintaining fiber; PMF) 등을 사용한다.

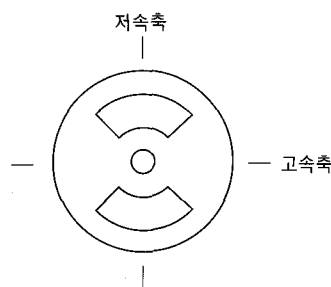


그림 10.15 편광유지광섬유(PMF)의 단면구조

10.2.2 광섬유 커넥터

광소자끼리 광신호를 효율적으로 전달하기 위해서는 광소자와 광섬유 사이를 효율적으로 연결해야 할 뿐만 아니라 광섬유와 광섬유 사이도 효율적으로 연결해야 한다. 일반적으로 광섬유와 광섬유를 연결하는 방법에는 광섬유 용착(fiber fusion splicing)이라는 영구적인 방법과 일시적으로 연결하는 방법인 정렬관기술을 이용한 광섬유 커넥터가 있다.

먼저 광섬유 용착기는 그림 10.16(a)처럼 광섬유와 광섬유를 정밀 정렬한 상태에서 아크방전을 통하여 순간적으로 녹여 붙이는 방법이다. 이 경우 이 부분에서의 광손실은 대개 0.1dB 이하가 되어 가장 이상적인 광섬유 연결 방법이다. 그러나 한번 용착한 광섬유는 더 이상 분리할 수 없기 때문에 광소자를 교체하여야 할 경우 광섬유를 절단하고 다시 용착하여야 하는 문제점이 있다. 이런 경우를 대비해서 광섬유의 단말 부분에 플러그와 소켓을 연결해 두면 탈부착이 용이해진다. 그림 10.16(b)는 이와 같은 광섬유 커넥터를 이용하여 광섬유를 정밀하게 정렬하는 데 사용하는 정렬관(alignment sleeve)의 구조이다. 그림 10.16(c)는 이와 같은 정밀

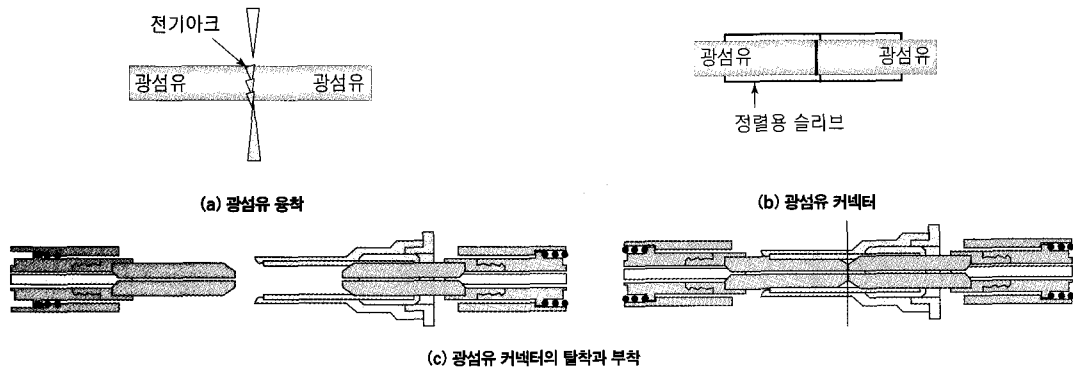


그림 10.16

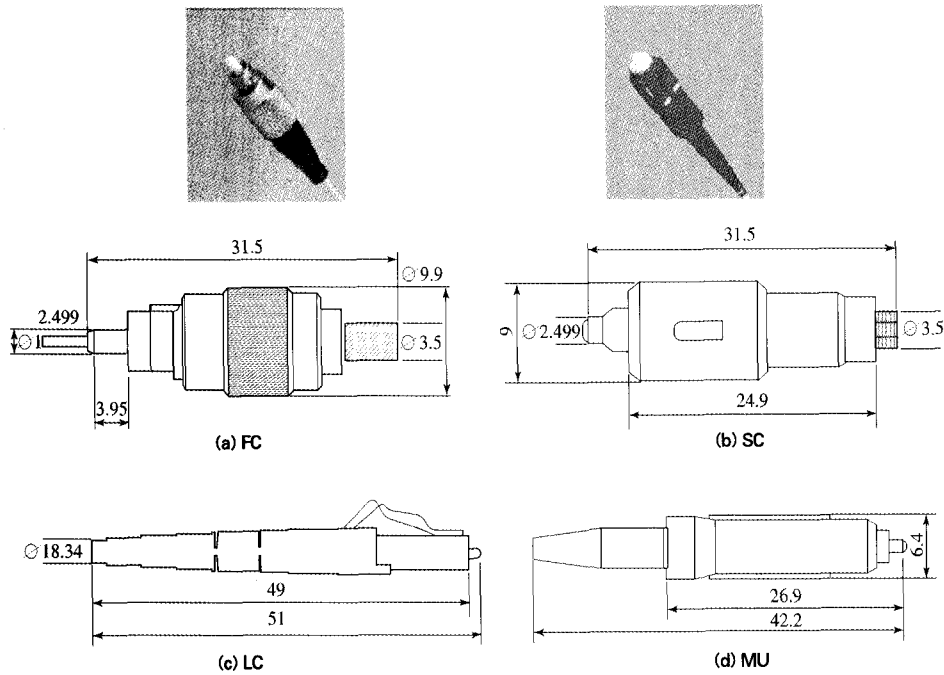


그림 10.17 광섬유 커넥터

정렬관을 이용하여 광섬유 커넥터를 탈착하거나 부착하는 모양을 보여준다. 광섬유와 광섬유 사이의 접속손실을 줄이기 위해서는 광섬유 플러그와 광섬유 소켓의 가공오차가 광섬유 코어 직경보다 훨씬 작도록 정밀가공되어야 한다. 통상적으로 광섬유 커넥터의 정밀오차는 1 μ m 이하이며, 삽입손실은 1.5dB 정도이다.

한편 광섬유 커넥터를 만들 때는 한쪽은 플러그(male), 또다른 쪽은 소켓(female)이 되도록 하여야 한다. 그림 10.17에 여러 종류의 광섬유 커넥터가 나타나

있다. 먼저 FC 형태는 원형으로 된 커넥터로서 가장 먼저 표준화된 광커넥터이다. 한편 FC 형태가 나사처럼 돌려서 부착하는 방식인데 비해 SC 형태는 형태는 사각형 모양으로 밀어서 부착하는 방식이다. 이 외에도 나중에 나온 방식으로 각각 FC, SC 형태와 비슷하나 크기가 반 정도로 작아진 LC 형태와 MU 형태가 새로운 표준 광커넥터로 널리 사용되고 있다.

10.2.3 광송신기

광송신기는 일반적으로 LED나 레이저 다이오드와 같은 발광 소자로 구성된다. 그러나 효율적인 광통신을 위해서는 광의 파장과 출력이 일정하여야 하며, 광출력은 입력신호에 따라 반응하는 속도가 빨라야 한다. 일반적인 광송신기의 전자회로는 그림 10.18과 같다. 이 송신기에는 레이저 다이오드의 출력을 모니터하기 위한 광검출기가 부착되어 이를 통하여 레이저 다이오드의 출력을 일정하게 조절할 수 있다. 즉, PD의 전류가 커지면 LD에 흐르는 전류를 줄여주게끔 OP 앰프를 이용한 부채환(negative feedback) 회로가 구성되어 있다. 아울러 입력단에는 신호가 효율적으로 레이저 다이오드에 주입되는 전류를 조절하게끔 에미터 결합 차등증폭기(differential amplifier)가 들어간다.

이 외에도 그림 10.19에서와 같은 온도를 조절하기 위한 온도조절장치 등도 함께 실장하는 경우도 있다. 이 회로에서 온도계(thermistor)의 발생전압은 온도에 따라서 달라지므로 이를 이용해서 펠티어(peltier) 소자와 같은 전자냉각장치(thermoelectric cooler: TEC)의 온도를 제어할 수 있다.

한편 광통신 시스템에서 광신호는 거의 대부분 광섬유를 통해서 전달된다. 그러므로 각 광소자의 광신호 입출

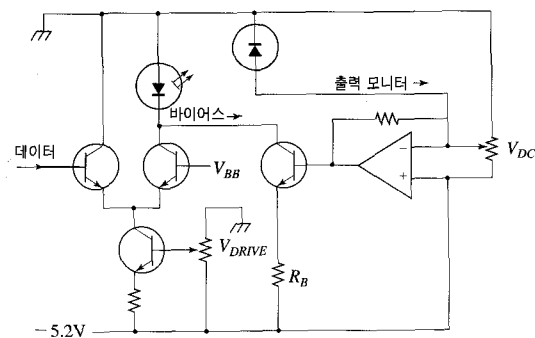


그림 10.18 광송신기의 회로도

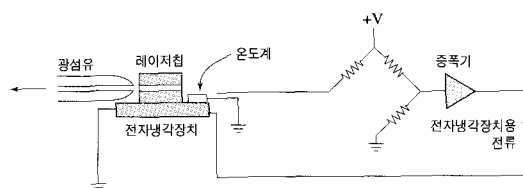
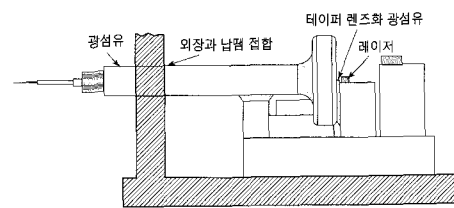


그림 10.19 레이저 다이오드의 온도보상 회로

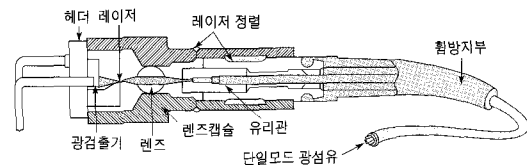
력단과 광섬유가 얼마나 잘 연결되었는가가 매우 중요한 이슈이다. 그림 10.20은 광송신기에서 레이저 다이오드와 광섬유를 연결하는 대표적인 몇 가지 방식을 보여준다.

일반적으로 레이저 다이오드의 발광면의 직경은 1~2 μm 정도이며, 광섬유 코어의 직경은 6~8 μm 이다. 따라서 양쪽 광파 모양이 달라서 상당한 결합손실이 발생한다. 이를 극복하기 위한 방법으로 그림 10.20(a)와 같은 접촉식 광섬유 부착(butt-coupling) 방법과 그림 10.20(b)처럼 마이크로 렌즈식 광섬유 부착(lens-coupling) 방법을 많이 사용한다. 먼저 그림 10.20(a)와 같은 접촉식 방법은 광섬유의 끝을 등글게 볼록렌즈처럼 가공하고, 이 광섬유 테이퍼 렌즈의 초점이 반도체 레이저의 광출력면과 일치하도록 미세조정한다. 이 상태에서

반도체 레이저와 광섬유를 정밀가공기판에 강력접착제 등으로 고정시키고 밀봉한다. 한편 그림 10.20(b)의 마이크로 렌즈식 부착 방법은 광섬유와 레이저 다이오드 사이에 마이크로 원통형 렌즈를 삽입하여 레이저 다이오드의 출력광의 초점이 광섬유 코어에 맺도록 한다. 이 경우에는 광결합효율이 광섬유 끝단(fiber-tip) 정렬의 정확도에 덜 의존한다. 일반적으로 마이크로 렌즈의 결합효율이 광섬유 테이퍼 렌즈의 결합효율보다 높다. 그림 10.20은 상용화된 광송신모듈(AT&T Astrotec laser package)의 한 예인데, 접촉식 부착법일 때의 결

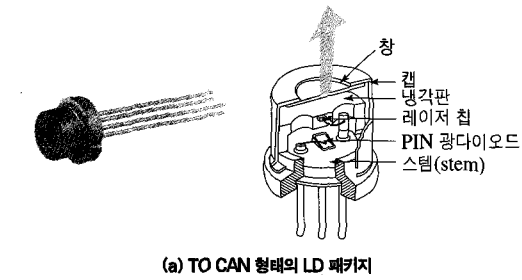


(a) 접촉식 광섬유 부착

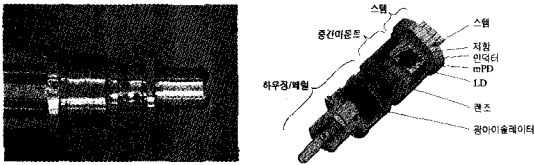


(b) 마이크로 렌즈식 광섬유 부착

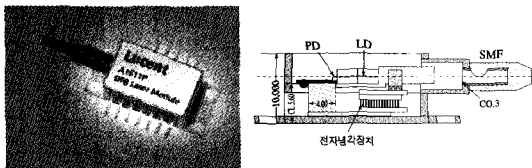
그림 10.20



(a) TO CAN 형태의 LD 패키지



(b) TOSA CAN 형태의 LD 패키지



(c) 광섬유 피그테일된 날개형 LD 패키지

그림 10.21

합효율은 약 40% 정도이고 마이크로 렌즈를 사용하였을 때의 결합효율은 약 70%이다. 이와 같이 광섬유가 광소자의 입출력단에 부착된 것을, 그 모양이 돼지꼬리가 말린 모습과 비슷하다는데서 피그테일(pig-tail)이라고 부른다.

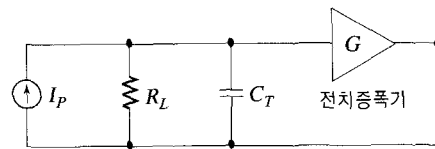
한편 레이저 다이오드의 응용분야가 다양한 것과 마찬가지로 레이저 다이오드를 포함한 광송신기의 최종 패키지도 다양하다. 그림 10.21은 여러 종류의 레이저 다이오드 패키징 사진과 구조이다. 먼저 그림 10.21(a)는 TO CAN(transmitter optical CAN) 형태로서 작은 원형 CAN 내부에 LD와 LD의 광출력을 측정하기 위한 모니터용 PD가 조립되어 있고, 그 상부에는 투명유리나 렌즈가 덮여져 있어 레이저 다이오드가 외부 공기나 습기로 인해 열화되지 않는다. 한편 레이저 다이오드의 바닥은 금속판에 부착되어 있어서 방열을 촉진한다. CAN 밑의 인입선은 각각 LD와 PD에 세금선으로 연결된다. 그림 10.21(b)의 TOSA CAN(transmitter optical sub assembly CAN)은 TO CAN과 비슷하나 표면에 광섬

유와 접속될 수 있도록 광섬유 커넥터가 가공되어 있고, 광섬유 표면으로부터 반사된 빛이 레이저 다이오드로 유입되는 것을 막기 위하여 광 아이솔레이터가 삽입되어 있다. 한편 그림 10.21(c)와 같은 광섬유 피그테일된 날개형(butterfly) LD 패키징 내부에는 레이저 다이오드의 온도를 조절할 수 있는 전자냉각장치(thermoelectric cooler: TEC)까지 부착되어 있고, 이를 제어하기 위한 전극에까지 인입선이 구비되어 있다. 그리고 레이저 다이오드에 단일모드 광섬유(single mode fiber: SMF)가 정렬, 부착되어 있어 광통신용 송신기로 사용한다. 보통 초고속 광통신을 위하여 내부회로는 마이크로파 스트립라인과 MMIC(monolithic microwave integrated circuit)로 구성된다.

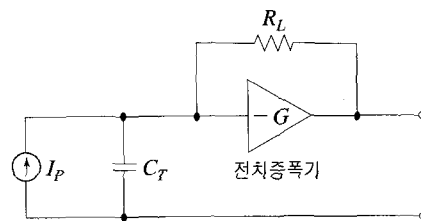
10.2.4 광수신기

광수신기는 pin PD나 APD와 같은 광검출기를 이용하여 광신호를 검출하는 소자이다. 이 경우도 광송신기와 마찬가지로 광섬유와 PD가 서로 피그테일로 연결되어 있어 효율적으로 광신호를 전기신호로 변환할 수 있다.

광검출기에서 얻은 광전류를 전압신호로 변환하기 위해서는 광검출기 양단에 저항을 달아준다. 이 저항값이 클수록 전압이 증가하므로 광수신기의 감도를 증가시키기 위해서는 이 저항값이 높을수록 좋다. 그림 10.22(a)에서 보는 이런 구조를 높은 임피던스(high impedance) 광수신기 회로라 한다. 한편 이 저항값이



(a) 높은 임피던스 광수신기 회로



(b) 트랜스 임피던스 광수신기 회로

그림 10.22

너무 크면 광수신기의 반응속도가 떨어진다. 그러므로 속도를 증가하기 위해서는 그림 10.22(b)와 같이 전치 증폭기(pre-amplifier)와 병렬로 저항을 달아주는 경우가 있는데 이를 트랜스 임피던스 증폭기(transimpedance amplifier; TIA) 광수신기 회로라 한다. 일반적으로 초고속 광수신기를 구성하기 위해서는 TIA 회로를 많이 사용한다.

10.2.5 광집적회로

광통신 시스템에서 빛이 지나가는 경로는 광섬유와 같은 광도파로(optical waveguide)이다. 이 도파로를 반도체기판에 조성한 것을 채널도파로(channel waveguide)라 한다. 그 구조와 예를 보면 그림 10.23과 같다.

그림 10.23에서는 반도체나 유리기판에 굴절률이 큰 물질을 이용하여 채널도파로를 조성하면, 이 도파로를 따라 진행하는 빛은 도파로 경계면의 전반사에 의해 도파로를 따라 진행한다. 일반적으로 기판 위의 도파로는 광섬유에 비하여 매우 작게 만들 수 있으므로 복잡한 광선로를 단일기판 위에 집적할 수 있다. 도파로를 조성한 후 그 주위에 전극을 부착하면 이 전극에 인가한 전압으로 도파로의 굴절률을 변화시킬 수 있다. 그리고 이 기판 위에 레이저 다이오드나 포토다이오드를 함께 제작

하면 발광 수광 기능까지 수행할 수 있는 다기능 광소자의 구현이 가능하다. 이러한 소자를 광집적회로(photonic integrated circuit; PIC)라 한다. 그림 10.23은 그 한 예인 방향성 결합기(directional coupler)와 마하-젠더 간섭기(mach-zehnder interferometer)이다. 이 중에서 방향성 결합기는 한쪽 도파로로 입사한 빛이 두 도파로가 만나는 영역에서 서로 결합하여 출력광의 방향이 반대방향 도파로로 넘어가는 소자이다. 그런데 이 결합기에 전압을 가하면 굴절률이 달라져서 반대방향으로 넘어갔던 빛이 원래 방향의 도파로로 다시 넘어와서 전압을 걸어주지 않았을 때의 출력도파로의 반대방향, 즉 입력도파로와 같은 쪽으로 나간다. 그러므로 인가전압으로 출력광의 방향을 변화시켜 줄 수 있는 소자이다. 한편 마하-젠더 간섭기는 한 도파로로 입사된 빛이 두 도파로로 나누어 졌다가 다시 만나 하나의 도파로로 나온다. 그런데 이 도파로에 전압을 가하면 한쪽의 도파로는 굴절률이 커져서 빛이 천천히 진행하고, 반대편은 굴절률이 작아져서 더 빨리 진행한다. 그래서 두 빛이 만날 때 위상이 서로 반대가 되면 상쇄간섭을 일으켜 출력광이 소멸하게 된다. 그러므로 전압의 크기에 따라 출력광의 신호가 커졌다 작아졌다 변조가 가능하게 된다

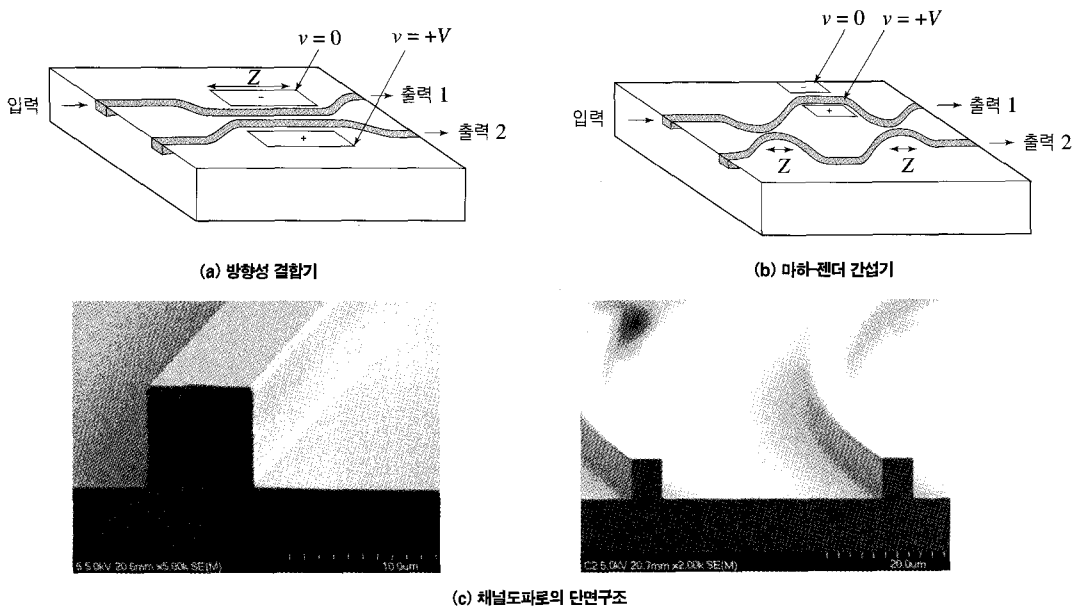


그림 10.23

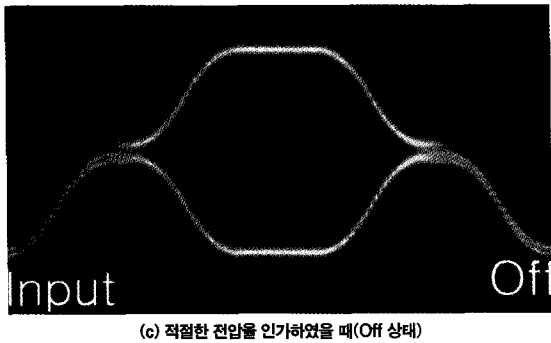
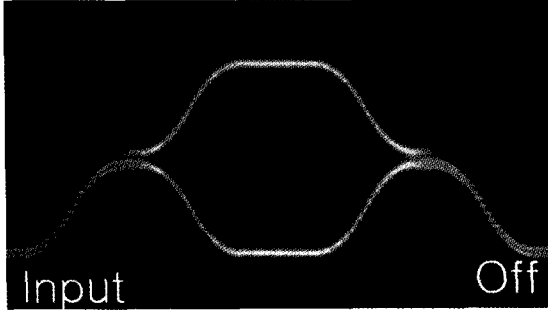
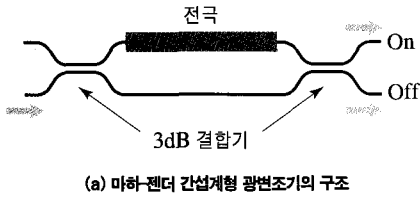


그림 10.24

그림 10.24는 마하-젠더 간섭기를 이용한 전계광학 광변조기의 구조에서 빛이 진행하는 모양을 나타낸 그림이다. 이 광변조기의 전극에 전압을 걸어주지 않으면 그림 10.24(b)와 같이 입력단과 반대편에 있는 도파로로 빛이 진행한다. 그러나 전극에 적절한 전압을 걸어주면 그림 10.24(c)와 같이 마하-젠더 간섭기의 두 도파로를 진행하는 광파의 위상이 180도 차이가 나서 입력단 쪽으로 빛의 진행방향이 바뀐다. 이와 같은 구조가 현재 가장 상용화된 광집적회로 중 하나인 마하-젠더 간섭기형 광변조기이다.

10.2.6 광변조기

광검출기가 광신호를 전기적인 신호로 변환하는 기능을 하는 것과 같이 광변조기는 전기적인 신호를 광신호

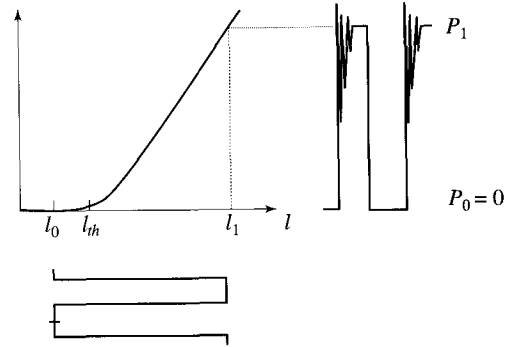
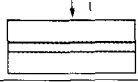
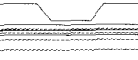
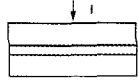
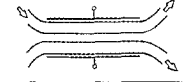




그림 10.25 레이저 다이오드의 직접변조

로 변환하는 소자이다. 가장 대표적인 광변조 방식은 LED나 레이저 다이오드와 같이 발광 소자에 전기적인 신호를 인가하여 광신호를 얻어내는 직접변조(direct modulation)이다. 이와 같이 광원을 직접변조하는 경우에는 별도의 광변조기가 필요 없이 광원 자체가 광변조기가 된다. 그러나 직접변조의 경우에는 레이저 출력광의 파장이 주입전류의 크기에 따라 변화하는 이른바 색변(chirping)현상이 심각해진다. 그림 10.25는 직접변조시의 일반적인 레이저변조 특성이다. 이 그림은 디지털 변조방식 중 진폭변조에 해당한다. 여기서 I_0 는 off-state의 전류를 나타내며, 이때의 광출력은 0이다. on-state의 전류 I_1 이 인가되면 광출력은 P_1 으로 증가한다. 그러나 레이저 다이오드의 유도방출이 안정화될 때까지는 광출력이 불안정하여 그림과 같이 매우 빠른 속도로 증감을 거듭한다. 이러한 현상을 이완발진(relaxation oscillation)이라고 하며, 이로 인해 파장이 불안정하게 흔들리는 색변현상이 나타난다. 레이저의 파장폭이 넓어지면 광펄스가 장거리 구간을 통과하면서 파장별로 전송속도의 차이가 커져 펄스폭도 넓어진다. 이러한 현상은 장거리 광통신의 장애물이다.

이러한 문제로 인해 초고속 통신망에서는 발광소자를 직접변조하는 방식의 대안으로 표 10.2와 같은 광집적회로를 이용한 외부변조(external modulation) 방식을 광범위하게 채택한다. 표 10.2에 나타난 바와 같이 직접변조방식의 반도체 레이저 외에 외부 광변조기는 크게 광흡수 현상을 이용한 광흡수변조기(Electro-absorption modulator; EAM)와 광굴절 현상을 이용한 전기광학변조기(Electro-optic modulator; EOM)로 분류할 수 있다. 먼저 EAM은 반도체를 지나가는 광파

표 10.2 광변조기의 종류

	Type	Diagram
반도체 레이저(LD)	직접변조	
광흡수변조기 (EAM)	전기흡수계수변조식	
	전류주입식	
광굴절변조기 (EOM)	방향성 결합기	
	마하-젠더 간섭계	
	전반사기	

의 흡수계수를 반도체의 수직방향에 인가한 전압이나 전류주입량으로 변조하여 광출력을 변조하는 소자이다. 반면 EOM은 반도체 내부의 굴절률을 반도체에 인가한 전압으로 변조시켜 빛의 전파상수를 변조하여 공간섭 정도를 조절해 출력을 변조하는 소자이다. EOM에는 앞에서 설명한 바와 같이 방향성 결합기와 마하-젠더 간섭기, 그리고 전반사기(total internal reflector)가 있다. 전반사기는 전압을 인가하여 도파로 경계면의 굴절률을 감소시켜주면 이 굴절률 차이에 의해 전반사가 일어나도록 만든 소자이다. 이로 인해 도파로를 직진하던 빛이 반사를 일으켜 비스듬하게 연결된 광도파로로 빠져나가게 된다. 이렇게 하여 광변조를 얻어낸다.

그림 10.26은 N×N 광스위치의 한 예인 4×4 광스위치의 구조이다. 이 그림에 있는 1×2 스위치는 위에서 설명한 바와 같이 On-Off 상태에 따라 출력방향을 변환할 수 있다. 그러므로 각 전극에 가한 전압의 조합에 의해 각 입력단의 광신호는 임의의 출력단으로 전달된다. 이와 같은 광스위치는 전화국의 광교환기 등에서 Add/Drop Multiplexer(ADM)로 사용할 수 있다. 즉, 입력 광신호를 추출할 수도 있고 또 기존 채널에 원하는 광신호를 추가할 수도 있다.

일반적으로 광변조기에서 직접변조방식은 구조가 간

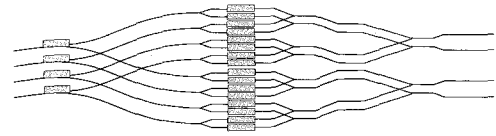


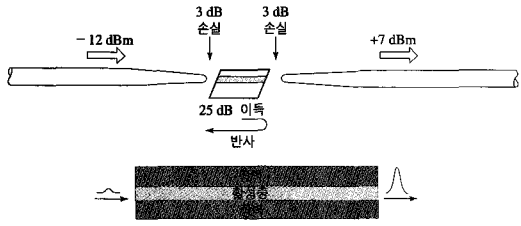
그림 10.26 4×4 광스위치

단하고 추가의 외부 광변조기가 필요 없어 가장 널리 사용되는 광변조방식이다. 이 방식은 현재 10GHz 이하의 단거리 광통신에 널리 사용한다. 그러나 장거리 광통신이나 10GHz 이상의 초고속 광통신에는 EAM 방식이나 EOM 방식을 사용하여야만 한다. 이중 EAM은 그 구조가 pin 반도체 레이저와 구조가 비슷하여 레이저 다이오드와 단일기판에 직접할 수 있기 때문에 광집적회로(photonic integrated circuit; PIC)에 널리 사용한다. 이와 같이 LD와 EAM을 단일기판에 집적한 소자를 EML(electro-absorption modulator laser diode)이라 한다. 한편 EAM은 광흡수 효과가 활성층의 밴드갭 파장보다 짧은 파장에서 일어나므로 동작주파수가 한정된다. 이에 반해 EOM은 동작파장의 제한이 적고, 또 광굴절 효과만 이용한 소자이므로 EAM에 비하여 색변효과가 작아서 현재 가장 높은 변조주파수로 작동하는 광변조기이다.

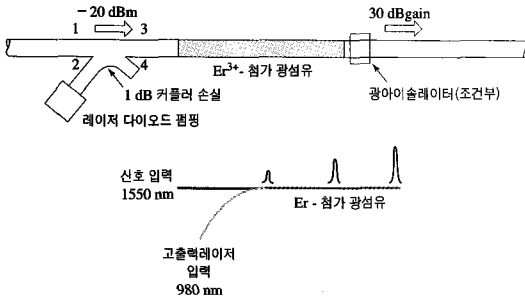
10.2.7 광증폭기

이 광증폭기(optical amplifier)에는 반도체 광증폭기(semiconductor optical amplifier; SOA)와 EDFA(erbium-doped fiber amplifier) 등이 있는데, 소형의 광시스템에는 SOA가 선호되고 그 외의 통신망에는 EDFA 등의 광섬유 증폭기가 선호된다. 이 광증폭기의 개략도는 그림 10.27과 같다.

먼저 SOA는 그림 10.27(a)와 같이 광섬유 사이에 반도체를 삽입하여 광을 증폭한다. 반도체에 전류를 충분히 흘려주면 반도체 내의 유도방출에 의해 광파가 결맞음 증폭이 일어나 광신호가 증폭된다. 이때 반도체 단면에서의 반사를 줄이기 위해서 입사면이 경사지게 한다. 이 반도체에 전류를 주입하는 정도에 따라 광증폭률이 결정된다. 예를 들어 입사 광섬유의 신호가 -12dBm이고 SOA의 광증폭률이 25dB, SOA 표면에서의 손실이



(a) SOA



(b) EDFA

그림 10.27 광증폭기의 구조

각각 3dB이라 하면 출력단의 광섬유로는 거의 100배 증폭된 $-12-3+25-3=7\text{dBm}$ 의 출력광이 나온다. 이 구조에서 광신호가 조금이라도 반사되면 이 반사된 광신호도 100배씩 증폭되기 때문에 SOA 공정에서는 이 반사광을 1/1,000 내지 1/10,000 이하로 줄여주기 위한 무반사 코팅이 매우 중요하다. 한편 그림 10.27(b)와 같은 광섬유 증폭기에서는 이 광섬유 구간에 파장이 짧은 펌핑광을 입사시키면 이 펌핑광의 에너지가 EDFA 내의 어븀(erbium) 원자에서 유도방출이 일어나게 하여 광섬유를 진행하는 광신호가 증폭이 된다. 이런 구조에서는 SOA보다 입출력단에서의 삽입손실이 작고, 더 큰 증폭률을 얻을 수 있는 장점이 있다. 한편 EDFA 경우에도 출력단의 광신호가 다시 EDFA로 되 돌아오는 것을 방지하기 위하여 광 아이솔레이터를 삽입하는 경우가 있다.

10.2.8 파장분배/결합기

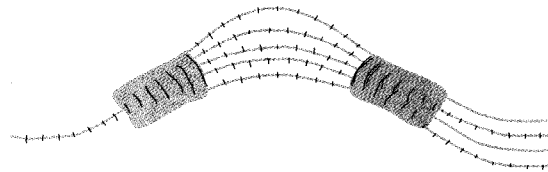
파장분배/결합기(wavelength division multiplexer/demultiplexer: WDM Mux/Demux)는 여러 도파로의

광신호를 하나의 광도파로로 결합해 주거나, 거꾸로 하나의 광도파로에 있는 여러 파장의 광신호를 파장별로 나누어 주는 소자이다. 기하광학에서는 그림 10.28(a)와 같은 프리즘이 대표적인 파장분배/결합기이다. 즉 프리즘을 통해 여러 파장의 빛을 한 광선으로 합칠 수도 있고 거꾸로 한 광선에 있는 빛을 파장별로 나누어줄 수 있다. 이러한 프리즘과 같은 역할을 할 수 있는 도파로 광학소자가 바로 그림 10.28(b)와 같은 행렬 도파로 격자(arrayed waveguide grating: AWG)이다.

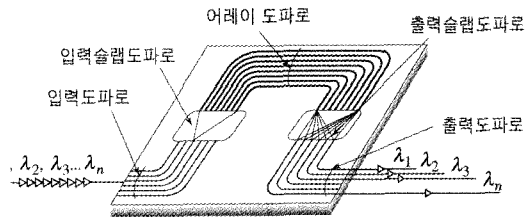
그림 10.28(b)와 같이 AWG에는 서로 다른 곡률반경을 갖는 도파로 행렬이 있다. 빛이 도파로를 통과하는 시간은 도파로의 길이, 즉 도파로의 곡률반경에 따라 달라지는데, 이 시간차에 의해 빛이 도파로 행렬 끝에 있는 넓은 면을 통과할 때 일정한 방향으로 빛이 휘게 된다. 그런데 프리즘과 마찬가지로 도파로도 굴절률이 파장에 따라 달라지므로 빛의 휘는 각도도 파장에 따라 달



(a) 프리즘 파장분배기



(b) AWG



(c) N×N AWG

그림 10.28

라진다. 그러므로 AWG 끝에 달려 있는 여러 개의 도파로에는 서로 다른 파장의 빛이 나오게 된다. 그림 10.28(c)에는 입력단과 출력단 모두 여러 개의 도파로가 달려있는 $N \times N$ AWG이다. 이 경우 입력단의 단일 도파로로 여러 파장의 빛이 입사되면 파장에 따라 출력단의 서로 다른 도파로로 빛이 나누어지며, 반대로 도파로 고유의 파장을 갖는 빛이 여러 개의 도파로로 입력되면 출력단에는 하나의 도파로로 빛이 모여진다. 그러므로 $N \times N$ AWG는 파장분배기로도 사용되며 파장결합기로도 활용할 수 있다.

10.2.9 파워분배기 및 파장필터

파워분배기(optical power divider)는 광신호를 여러 갈래로 나누어 주는 기능을 갖는 소자로서 채널도파로(channel waveguide) 광소자와 광섬유(fiberoptic) 광소자가 있다. 채널 도파로 분배기는 유리나 반도체 기판에 채널도파로를 만들고 이를 이용하여 광파워를 여러 갈래의 도파로로 분배하는 소자이다. 그림 10.29에는 1×2 분배기를 이용한 Y-브랜치 소자와 $1 \times N$ 분배기를 이용한 성상결합기(star-coupler)가 있다.

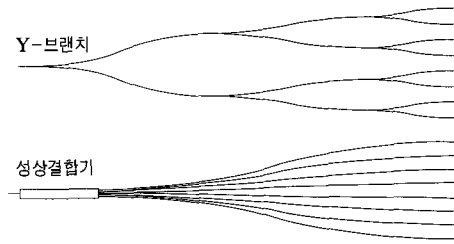
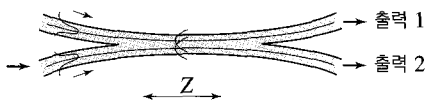


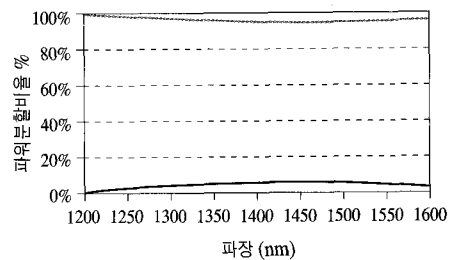
그림 10.29 도파로 광분배기

한편 광섬유로 구성된 광분배기의 기본구조는 그림 10.30(a)와 같다. 즉, 두 가닥의 광섬유 코어 부분을 서로 융합하여 주면 광섬유 방향성 결합기가 된다. 이때 광섬유 코어가 결합된 부분의 길이 Z 의 크기에 따라 여러 가지 분배 기능을 갖는다.

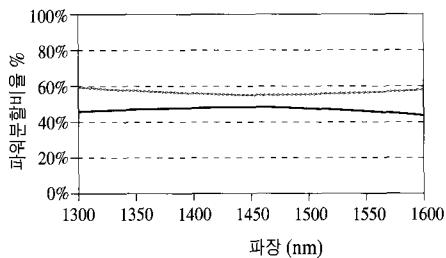
그림 10.30(b)는 광섬유의 결합기의 길이가 아주 작을 때 매우 작은 부분의 파워만 다른 쪽 광섬유로 결합된다. 이런 경우 광감쇠기(optical attenuator)의 기능을 갖는다. 그림 10.30(c)는 광섬유 결합길이가 적당하여 거의 50:50의 파워분배가 가능하다. 이런 경우를 광분배기라 한다. 마지막으로 그림 10.30(d)는 광섬유의 결합길이



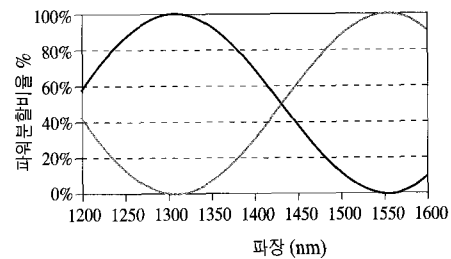
(a) 광섬유 파워분배기의 구조



(b) 광감쇠기



(c) 광분배기

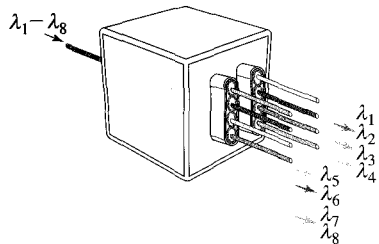


(d) WDM 광필터

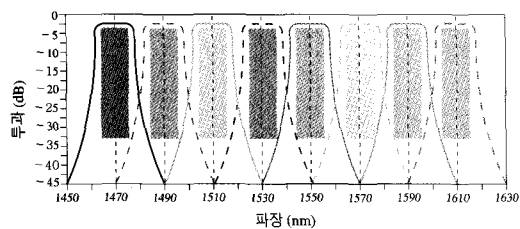
그림 10.30

가 아주 길게 되었을 때의 경우이다. 이때 각 출력단의 파워분할비율은 파장에 따라 달라진다. 그림 10.30(d)와 같은 파장특성을 가지게 될 경우 이 결합기에 1300nm의 빛을 입사하면 대부분의 광신호가 출력단 1번 쪽으로 빠져나간다. 또 같은 광섬유 결합기에 1550nm의 광신호를 입사하면 대부분의 빛은 출력단 2번 쪽으로 빠져나온다. 그러므로 1300nm와 1550nm의 두 가지 파장성분을 갖는 광신호가 입사되더라도 1300nm의 광신호는 출력단 1로, 1550nm의 광신호는 출력단 2로 나누어진다. 이러한 광소자는 파장분할다중기(wavelength division multiplexer: WDM Mux)의 기능을 갖는다. 그리고 이 소자는 파장에 따라 광분배비율이 다르게 되므로 파장필터의 기능도 갖는다.

위에서 언급한 1×2 WDM Mux의 각 출력단에 파장 선택투기가 두 배씩 빨라지는 1×2 WDM Mux를 직렬로 계속 이어주면 2^N WDM 광필터를 만들 수 있다. 그림 10.31에 이와 같은 1×8 WDM 광필터의 필터특성이 나타나 있다. 입력단에 λ_1 에서 λ_8 까지 균등한 파장 간격을 가지는 광신호를 입력하면 λ_1 은 첫 번째 출력단으로, λ_2 는 두 번째 출력단으로 전달되는 등 8개의 서로 다른 파장을 갖는 신호가 서로 다른 출력단으로 전송된다. 이와 같은 파장필터는 파장분할광통신에서 주요 기



(a) 1×8 WDM 광필터의 구조



(b) 파장필터 특성 스펙트럼

그림 10.31

능을 수행하는 광소자이다.

10.2.10 파장변환기

광통신에서는 입력광의 파장과 다른 파장의 빛으로 출력하여야 할 경우가 많은데, 이와 같은 기능을 수행하는 소자가 파장변환기(wavelength converter)이다. 파장 변환에는 PD와 LD를 결합하는 방식을 가장 많이 사용한다. 즉, 입력광을 PD를 이용하여 전기신호로 변환하고 이 신호로 파장이 다른 레이저를 변조하면 파장변환된 결과를 얻을 수 있다. 그러나 이 경우 소자의 수가 늘어나고, 또한 레이저 다이오드의 응답속도의 한계에 의해 고속 파장변환이 어렵다. 이를 극복하기 위한 한 방법이 반도체 광증폭기(SOA)를 이용하는 방법이다.

그림 10.32에 나타낸 SOA는 빛의 증폭률이 주입전류가 아니라, 이 SOA에 입사되는 펄핑광의 세기에 의해 결정되는 특수한 구조이다. 이 SOA에 λ_1 의 광신호가 펄핑광으로 입사되면 이 SOA의 광증폭률은 주입전류 대신 펄핑광의 진폭에 의해 결정된다. 이때 이 SOA에 λ_c

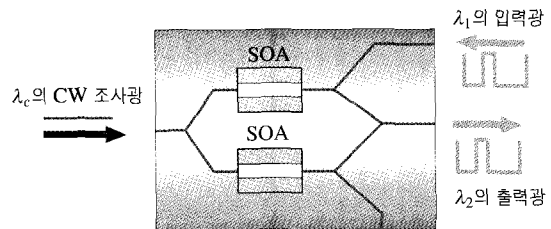


그림 10.32 파장변환기

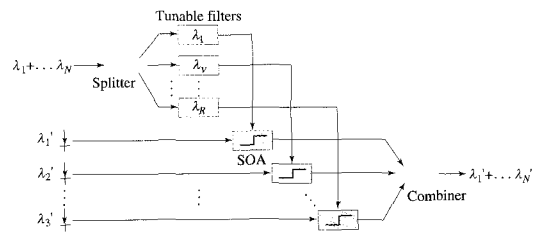


그림 10.33 SOA를 이용한 파장변환 시스템

의 파장을 갖는 빛을 입사하면 출력단에는 광증폭기의 증폭률에 비례하는 빛이 나온다. 그러므로 출력단에서는 진폭 λ_1 의 펄핑광과 동일한 파형이나, 파장은 λ_2 인 빛이 나온다. 그러므로 이 소자에서는 λ_1 의 파장을 갖는 광신호를 입사하면 λ_2 의 파장을 갖는 광신호가 출력된다. 이러한 SOA 기반의 파장변환기는 PD-LD를 이용한 파장변환기에 비해 소자의 수가 적을 뿐만 아니라, 신호의 대역폭도 월등하게 커서 수십 GHz 이상의 속도로 파장변환을 얻을 수 있다. 그림 10.33은 실제 파장분할다중통신시스템에 사용하는 파장변환기의 사용 예이다. 입력 광섬유로부터 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$ 의 파장이 들어오면 이를 파장필터로 선별하여 새로운 파장 $\lambda'_1, \lambda'_2, \dots, \lambda'_N$ 으로 변환한다. 이를 구현하기 위해서는 $\lambda'_1, \lambda'_2, \dots, \lambda'_N$ 의 파장을 갖는 레이저 다이오드가 필요하며, 이 파장들은 파장가변 레이저 다이오드 등으로부터 얻을 수 있다.

10.2.11 광크로스커넥터(OXC)

광네트워크에서 기존 광의 경로를 서로 바꾸어서 각각 다른 경로로 진행하도록 하는 소자를 광크로스커넥터(optical cross connector: OXC)라 한다. 광의 경로를 바꾸는 방법은 채널도파로나 광섬유를 이용한 N×N스위치가 활용된다. 아울러 프로젝션 TV 등의 핵심 소자로 정교하게 빛을 반사시켜서 빛의 경로를 바꾸어 주는 MEMS(micro electronic machining system) 거울 등이 있다. 이 소자는 그림 10.34처럼 반도체 공정을 이용하여 초소형 금속거울을 만들고 그 반사각도를 반도체 칩 위에 부착된 전극의 정전기를 이용하여 조절할 수 있다. 이것을 이용하면 N개의 입력단의 빛을 임의의 출력단으로 보낼 수 있다. 이 장치는 전화국 등에서 각지에서 들어온 광신호를 분류하여 OXC를 이용해 타지역으로 보낼 때 사용하거나, 사용하고 있는 광통신 선로에 사고나 이상이 생겼을 때 이 신호를 대기선로로 경로 변

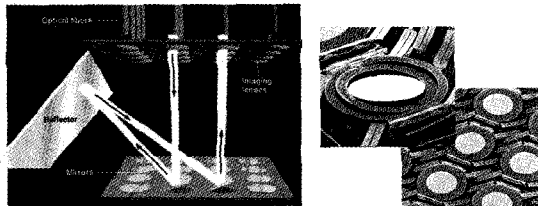


그림 10.34 MEMS 거울을 이용한 광크로스커넥터의 구조

경할 때 사용한다.

10.3 광통신의 현황

10.3.1 광통신의 발달단계

이상에서 살펴본 광소자의 개발에 따라 광통신 시스템의 품질과 대역폭은 여러 단계를 거쳐 발전하였다. 이를 먼저 사용 파장별로 살펴보면 다음과 같다. 장거리 광통신망에 활용할 수 있는 파장은 그림 10.11에 그린 광섬유의 감쇠 특성을 고려할 때 대개 1.3 μ m 주위로 약 100nm의 파장범위, 1.55 μ m 주위로 약 100nm 정도가 된다. 이를 자세히 나타내면 그림 10.35와 같다. 광통신에서 가장 먼저 활용한 파장은 1.0 μ m 파장대로서 파장이 1.06 μ m인 Nd:YAG 레이저가 광원으로 사용하였다. 이후 1.3 μ m 파장을 갖는 InGaAs 반도체 레이저의 개발로 인해 이 파장대를 활용하였으나, 최근에는 광섬유의 최저 손실 파장 대역인 1.55 μ m의 파장을 갖는 InGaAsP 레이저를 현재 가장 많이 사용하고 있다. 이 1,530~1,570nm 파장대를 C 밴드라 한다. C 밴드가 포화상태에 이르자 C 밴드보다 파장이 큰 1,570~1,610nm의 L 밴드까지 그 활용폭을 넓혀가고 있다.

일반적으로 광섬유의 통신 대역폭은 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$B = \Delta f = \frac{c}{\lambda_{\min}} - \frac{c}{\lambda_{\max}} = \frac{c \cdot (\lambda_{\max} - \lambda_{\min})}{\lambda_{\min} \cdot \lambda_{\max}} = \frac{c \cdot \Delta \lambda}{\lambda^2} \quad (10.3)$$

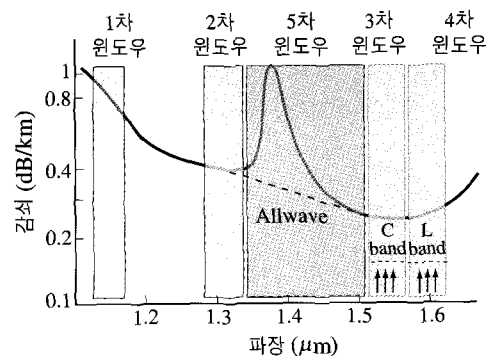


그림 10.35 단일모드 광섬유의 주요 광통신 대역폭

여기서 c 는 자유공간에서의 빛의 속도이며, λ 는 중심 파장을 나타낸다. 그러므로 그림 10.35에서 볼 수 있듯이 $1.3\mu\text{m}$ 영역에서의 대역폭은 대개 12THz, $1.55\mu\text{m}$ 영역에서는 C 밴드가 5THz, L 밴드가 5THz의 대역폭을 갖는다. 자유공간에서의 초고주파의 대역폭이 수십 GHz임을 고려할 때, 한 가닥의 광섬유가 갖는 대역폭이 무선통신 대역폭의 1,000배 정도임을 알 수 있다. 한편 광섬유 내부의 OH기를 획기적으로 축소하여 $1.4\mu\text{m}$ 파장대에서의 감쇠계수를 대폭 줄인 광섬유가 개발되었다. 이른바 이 광섬유를 전파장(Allwave) 광섬유라고 불리우는데, 그 감쇠계수 특성이 그림 10.35에 점선으로 나타나 있다. 이를 이용할 경우 광섬유의 대역폭이 파장대까지 확대할 수 있어 광통신 용량을 한층 더 키울 수 있다.

광통신 시스템의 대역폭과 통신거리의 발달 추이를 시대별로 구분하면 그림 10.36과 같다. 이 그림에서 가로축은 연도를 나타내며 세로축은 광중계기간 광섬유 전송거리와 대역폭의 곱을 나타낸다. 그 값은 계단형으로 발전하고 있음을 볼 수 있으며, 그 계가 되는 것을 열거하면 다음과 같다. A는 초기의 다중모드 광섬유를 이용한 시스템이고, B는 $1.3\mu\text{m}$ 파장의 단일모드 광섬유를 이용한 시스템이며, C는 $1.55\mu\text{m}$ 단일모드 광섬유 및 DFB-LD를 이용한 시스템이다. D는 진폭신호 광검출 대신 레이저의 간섭현상을 이용한 광검출(coherent detection)을 한 경우이며, E는 광섬유 광증폭기를 사용한 경우이다. 전송거리와 대역폭을 곱한 값은 평균 10년에 100배 이상 증가하는 추세로서 그 어떤 기술의 발전 속도보다 더 빠른 추세를 보여준다.

그림 10.36에서 괄목할만한 발달의 계기가 된 것은 광섬유 광증폭기의 출현이다. 이전까지는 광섬유를 진행하던 광신호가 약해지면 광검출기로 광신호를 전기신호로 변환하고 전자회로를 이용하여 증폭한 후, 다시 레이저 다이오드를 이용하여 광신호로 바꾼다. 이를 광중계기(repeater)라고 한다. 그러나 광섬유 증폭기가 출현한 이후부터는 광신호를 전기신호로 변환하지 않고 직접 증폭할 수 있게 되어 중계기의 간격을 획기적으로 늘릴 수 있게 되었다. 기존의 중계기 간격이 50km 이하였다면 현재의 중계기 간격은 100km 이상으로 늘어났다. 아울러 광섬유와 광증폭기의 연결방법도 PD와 LD를 사용할 때에는 접속손실이 매우 컸으나 광섬유 증폭기

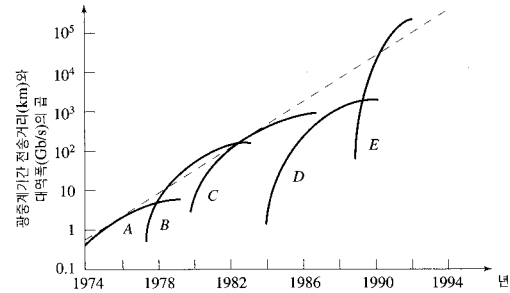


그림 10.36 광통신 기술의 발달과정으로 세로축은 광중계기간 전송거리와 대역폭의 곱을 나타낸다.

를 사용할 때에는 접속손실이 거의 무시할 수 있을 정도로 줄어들었다. 이로 인해 광통신 대역폭 및 중계거리가 그림 10.36의 E와 같이 비약적으로 늘어났다.

10.3.2 광통신의 현황

현재 광통신을 활용하고 있는 분야를 나타내면 그림 10.37과 같다. 먼저 초간선 기간망(long haul backbone network)은 해저 광케이블로 국가와 국가 간의 통신, 대도시와 대도시 간의 통신 등을 담당한다. 이 기간망에는 초고속 광섬유 네트워크가 사용되며, 이 기간망으로부터 광신호를 삽입하거나 인출하는 기능은 국제 전화국이나 대도시 전화국의 디지털교환기(DXC)와 광교환기(OXC)가 담당한다. 현재 초간선 기간망은 회선당 40Gbps급 이상의 WDM망으로 구성하고 있다. 이 간선망에 접속하는 방식은 광교환기의 일종인 다음과 같은 ADM(Add-Drop Multiplexer)을 사용한다.

ADM의 구조는 그림 10.38과 같다. 입력단의 여러 파장 신호를 파장분배기로 역다중화를 한 후에 광 크로스 커넥터를 이용하여 다음 단계로 전송할 파장과 추출할 파장을 선별하여 분리한다. 동시에 이 교환기에서 새로 추가할 신호를 새로운 파장에 할당하여 다음 단계로 전송하도록 해준다. 이렇게 함으로써 초간선망이나 간선망의 교환국에서 원하는 신호를 추가할 수도 있고 추출할 수도 있다. 이와 같은 복잡한 광교환기는 차후 광집적회로의 발달로 그림 10.39와 같은 단일 칩으로 구현할 수 있다. 여기서 AWG는 파장 MUX/DEMUX로 사용하며, OXC는 도파로에 전극을 부착하여 열을 가함으로써 스위칭하여 구현할 수 있다.

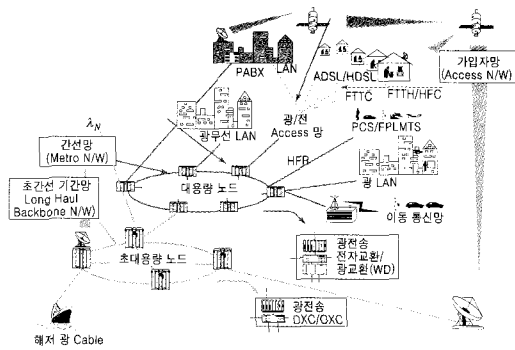


그림 10.37 광통신망의 활용

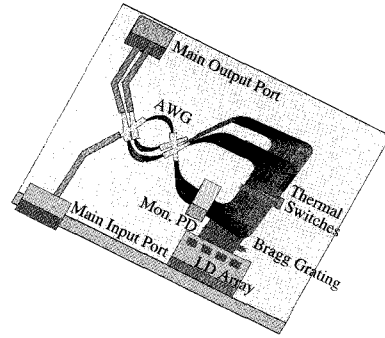


그림 10.39 광집적회로를 이용한 ADM

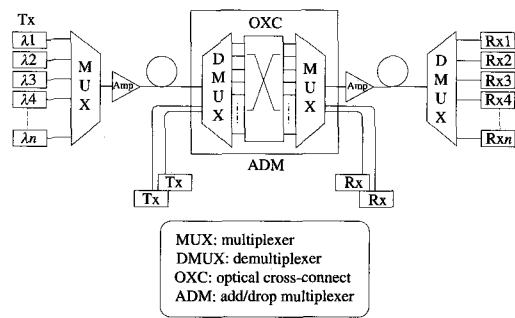


그림 10.38 ADM의 구조

그리고 Add/Drop은 같은 기관에 부착한 레이저 다이오드와 광스위치를 이용하여 구현할 수 있다. 즉, 추가할 신호는 레이저 다이오드 구동신호로 사용하여 광신호를 발생시킬 수 있고, 추출할 신호는 열광학 스위치를 이용하여 다른 출력단으로 보내 버릴 수가 있다.

한편 초간선 기간망에 물려서 대도시 가입자망 (metroarea network; MAN)이라는 간선망이나 위성 통신망이 접속되어 있다. 이 간선망은 2.5~10Gbps에서부터 40Gbps급 WDM망으로 이루어져 있다. 대도시 가입자망(MAN)에 접속된 광통신망은 그림 10.40에서 볼 수 있듯이 광인터넷망(Internet over fiber), 광가입자망, 광이동통신망, 동축케이블 혼합형 광통신망 (Hybrid Fiber Radiowave; HFR) 등으로 나눌 수 있다. 광인터넷망은 UTP 인터넷케이블 대신 광섬유케이블로 인터넷 신호를 전송하는 통신망이다. 현재 송신파장은 1550nm, 수신은 1300nm의 다른 파장을 사용하는 CWDM(Coarse WDM) 방식을 이용하는 방식과 1550nm 영역의 C 밴드를 사용하는 DWDM(dense

WDM) 방식이 있다. CWDM은 ADSL 통신망과 같은 1Gbps 이하의 저가보급형으로 사용하고, DWDM은 10Gbps급 대용량 인터넷기간망으로 사용한다.

이와 같은 광인터넷망 등 광통신망을 교환국과 가입자 사이에 연결된 광케이블의 최종 위치에 따라 분류하면 FTTC(fiber to the curb), FTTP(fiber to the pole), FTTO(fiber to the office), FTTH(fiber to the home) 등으로 나눌 수 있다. FTTC는 광케이블이 주택 단지나 아파트 관리실까지 연결되고, 그 점에서부터 가입자까지는 기존의 동축케이블이나 전화선으로 연결하는 방식이다. FTTP는 광 단말기가 전주 인입선까지 설치되는 것을 말하며, FTTO는 사무실까지, FTTH는 가정에까지 들어오는 것을 말한다. 궁극적으로는 광케이블이 가정의 전자장치나 PC 등에까지 연결되어가는 추세이다. 아직은 광소자의 가격이나 광섬유 포설작업의 비용적인 이유로 광케이블이 어느 정도 가입자 근처까지 접근한 후, 그 점에서는 기존의 전화선이나 동축케이블을 이용한다. 이와 같은 시스템을 혼합형 광동축망(hybrid fiber radiowave; HFR) 통신이라 한다.

한편 광통신망은 PCS나 셀룰러폰 등 이동통신망의 기지국망으로 널리 사용한다. 휴대전화기나 휴대용 컴퓨터의 수요가 늘어남에 따라 이동통신 용량도 증가하고 있는데, 이와 같은 대용량의 이동통신을 뒷받침하고 있는 통신선로는 거의 광케이블이다. 예를 들면 지하철이나 지하주차장과 같이 지상 안테나의 무선신호가 침투할 수 없는 영역에는 광섬유를 통하여 무선신호를 전송한 후 그 곳에 안테나를 설치하여 이동통신 서비스를 수행하고 있다. 그 외에도 고속도로나 철로변에 광통신망을 설치한 후 일정구간마다 그 광신호를 무선신호로

변환하여 안테나로 송신함으로써 지능형 교통망 서비스 (intelligent transport service: ITS)를 구현할 수 있다.

이와 같은 광통신망의 확산으로 인한 현재 통신혁명 및 정보혁명은 사회와 산업계 전반에 새로운 가치를 부여하고 창조해 나가고 있다. 통신망을 이용한 사이버 뱅

킹(cyber-banking) 시스템, 인터넷을 통한 정보사냥, 그리고 광통신망을 통한 원격 탐사 및 제어 등과 같은 새로운 가치가 창조되며, 새로운 산업이 창출되고 있는 실정이다.