

2.5Gbps, 10 Gbps, 100Gbps급 고속 광전송 장치

沈 昌 燮

韓國電子通信研究所

I. 서론

광전송기술은 초기의 45 Mbps, 90 Mbps, 400 Mbps, 565 Mbps 등 비동기식 광전송시스템 개발로 이어져 현재의 동기식 2.5Gbps 광전송시스템에 이르렀다. 비동기식 광전송시스템은 주로 64Kbps의 음성 신호를 시간분할 다중화하여 전송하는 것으로 제조회사마다 표준이 달라서 상호 호환성이 없었다. 또, 이러한 전송방식은 멀티미디어로 서비스 하고자 하는 광대역종합통신망(BISDN)으로의 진화에도 적합하지 못하다. 이에따라 다양한 전송시스템간의 원활한 인터페이스를 위해 동기식 전송방식이 Bellcore와 CCITT를 중심으로 연구되어 SDH/SONET (synchronous digital hierarchy / synchronous optical network)으로 표준화 되었으며, 전송속도도 155Mbps를 기본으로 하여 STM-16인 2.5 Gbps 전송장치 및 초고속의 10Gbps(STM-48) 및 100 Gbps급 광전송 장치가 요구되고 있다.

고속 광전송기술은 고속변조가 가능한 반도체 레이저 및 외부변조기가 개발되고 고속 광검출기가 개발되면서 활기를 띠기 시작하였다. 특히, 처핑이 적은 동적 단일모드 반도체 레이저, 특수 광섬유를 이용한 광섬유증폭기, 고속전송시 레이저 다이오드의 처핑(chirping)현상에 기인한 펄스퍼짐현상을 줄여 줄 수 있는 분산선이 광섬유(dispersion-shifted fiber), 마이크로파 대역의 주파수 특성을 갖는 광전소자 등이 개발은 10Gbps 광전송 장치의 실용화를 앞당기고 있으며, 광주파수 다중화 기술과 이에 필요한 소자의 개발은 100 Gbps급 이상의 초고속 광전송장치를 가능케 할 것이고 향후 대두될 광대역 종합통신망의 가

능성을 열었다.

전자통신연구소에서는 비동기식 광전송장치인 90Mbps 및 565Mbps 광전송 장치를 개발 상용화하여 국내 기간통신망 구축에 이바지 하였으며, 현재는 동기식 전송망인 2.5 Gbps 광전송 장치를 개발하고 있다.^[1] 아울러 10 Gbps 광전송 장치와 100 Gbps 급 광전송장치 개발도 HAN/BISDN 계획의 일환으로 추진되고 있다.

본 기술해설에서는 현재 개발중인 2.5Gbps 광전송 장치와 차세대의 10Gbps 광전송장치 및 100 Gbps 급 광전송장치를 소개하고자 한다. 먼저 2 장에서는 2.5 Gbps 광전송장치의 구성과 개발한 광송수신기에 대해서 기술하였으며, 3 장에서는 2.5 Gbps 신호 4 개를 시간분할 다중화하여 구현할 10 Gbps 광전송 장치에 대해서 기술하였다. 그리고 4 장에서는 10 Gbps 광신호를 파중분할 다중화하여 구현할 100 Gbps급 광전송장치에 대해서 간단히 기술하였다. 마지막으로 5 장에는 결론을 실었다. 10 Gbps 및 100Gbps 광전송장치는 아직 시스템의 구성이 확정되어 있지 않으므로 주로 광링크 구현에 필요한 기술적인 문제를 중심으로 기술하였다.

II. 2.5Gbps 광전송 장치

1. 장치의 구성

표 1은 ETRI에서 개발중인 STM-16 2.5Gbps SONET광전송장치(이하 2.5Gbps 장치)의 특성을 나타낸다. 여기서 2.5Gbps 장치는 전화회선 32,256 가입자의 용량을 가지는 초대용량 장거리전송장치이다. 이는 48개의 DS3(45Mbps)신호를 수용할 수 있

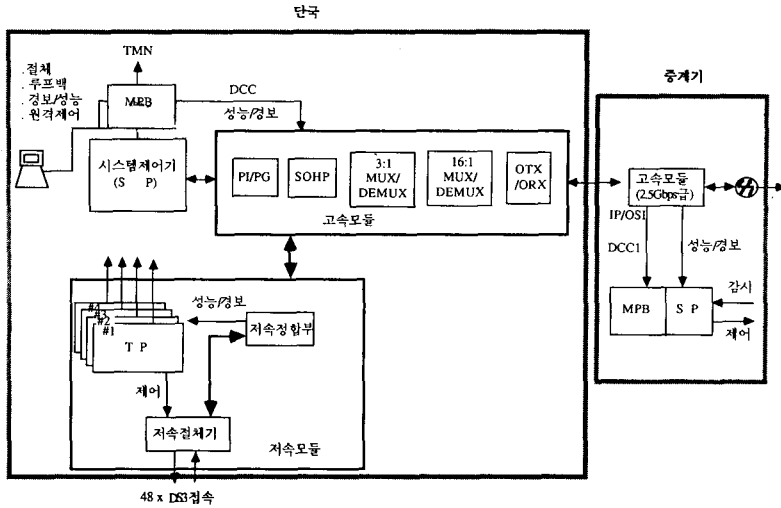


그림 1. 2.5 Gbps 단국 및 중계 장치의 구성도

표 1. 2.5 Gbps 광전송 장치의 특성

항 목		요 구 조 건
용량		3226(전화회선)
절체비	중속부	DS3/STM-1 접속: 1+1 STM-4 접속: 1+1
	고속부	2.5Gb 회선절체: 1+1
중속신호 수		48 DS3, 16 STM-1, 4 STM-4
주요기능		단국, 중계기, ADM (선형, 환형, 허브형)
광 송 수 신 기	전송속도	2.48832Gb/s
	변조방식	직접강도 변조
	라인코드	스크램블드 NRZ
	송신출력	-3dBm 이상 (DFB-LD)
	수신감도	-26dBm 이하 (InGaAs-APD)
	파장	1.31um, 1.55um
LD의 상수/하강시간	출력광선폭	< 1nm
	입출력전기신호	< 130ps (10% ~ 90%)
	입출력전기신호	800 + 200mVp-p
	최대허용입력광	-10dBm
감시제어 체계		중속부 제어기(TPU) 시스템 제어기(SPU) OAM&P 수행(MPU)
외부 접속		TMN 접속
DCC 프로토콜		CMISE/OSI
전력소모		540 W
동작온도		0 ~ 50°C
샘프의 크기		H x W x D : 585x516x364(mm)

으며, 16개의 STM-1(155Mbps)신호를 수용할 수 있는 용량이다.

시스템은 단국장치, 중계장치, ADM국장치로 구성 되어 있으며 그림 1과 그림 2에 그 구조를 각각 나타 내었다. ADM 장치를 사용자가 그목적에 맞추어 선 형(linear), 환형(ring), 허브(hub)형으로 구성하여 사용할 수 있다. 여기서 선형이란 고속부 즉 2.5Gb/s 송수신부가 상류(west)와 하류(east)측 시스 팀이 별개로 존재하고 중속부 즉 DS3정합, STM-1, STM-4 정합부가 최대 48xDS3용량을 가지는 시스 팀을 말한다.

환형이란 선형 ADM장치의 단국과 단국을 서로 연 결하여 루프를 형성한 형태이다. 이는 루프내 모든 중속부의 최대용량은 48xDS3이상을 넘지 못한다. 허브형이란 테이타의 슬립이 없이 2.5Gb/s광신호를 받아서 STM-1이나 STM-4신호를 추출하여 중속부 쪽으로 재전송이 가능한 형태를 말한다. 그림에서 저 속모듈은 DS3신호를 AU32신호로 변환해주는 장치 와 STM-1/ STM-4 신호를 AU32신호로 변환해 주 는 장치로 각각 구성이 될 수 있다. 이때 저속모듈은 622Mbps 단위로 4개의 그룹이 존재하며 그룹별로 독립적으로 감시 제어 및 절체를 수행하는 제어장치 TPU가 있으며, 각그룹별로 DS3와 STM1이 혼합되 어 운용가능하도록 머더보드가 설계되어 있다.

고속모듈은 저속모듈에서 올라온 AU32 혹은 AU4 신호를 포인터처리하여 신호의 위치를 지정한 후

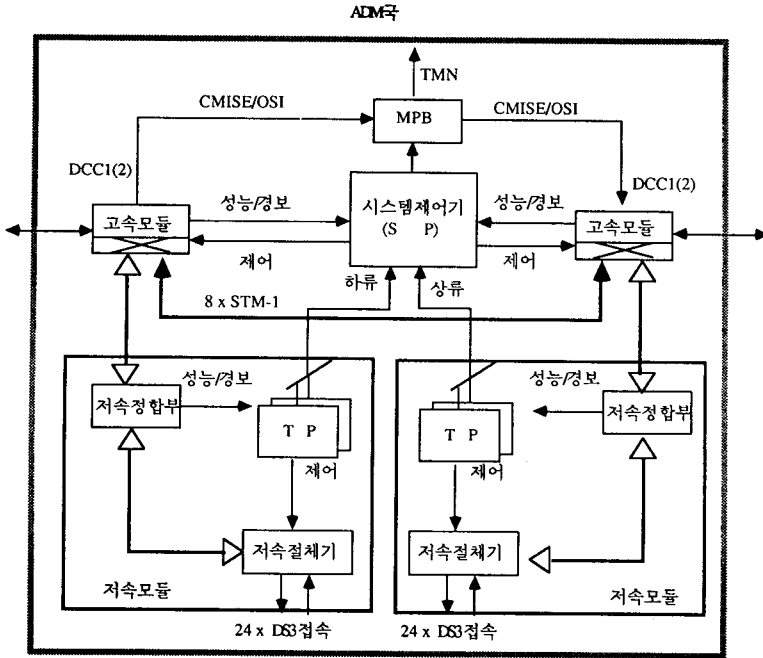


그림 2. 2.5 Gbps ADM 장치의 구성도

SOHP(section overhead processor ASIC)를 이용하여 구간오버헤드를 삽입하고 바이트인터리빙하여 STM-16형태의 프레임을 만든다. 이렇게 하여 만들어진 신호는 단순 비트인터리빙을 하는 고속다중화기를 거쳐 2.5Gbps속도의 신호가 만들어진다. 이신호는 광전변환기인 광송신기를 통하여 대국으로 전송된다. 한편 ADM국장치에서는 CCITT G.782에서 권고하는 HPC기능을 수행하는 크로스포인트 스위치가 내장되어 있어서 고속부에서 분리된 AU32나 AU4신호를 저속부로 ADD/DROP할것인가 그렇지 않으면 그냥 중계를 시킬것인가를 이용자가 MMI를 이용하여 ADM국장치의 구성을 원할하게 변경 제어할 수 있다. 고속부의 모든 감시제어 및 절체는 SPU가 담당하며 TPU로부터 정보를 검출하여 가공처리한 후 PC 혹은 터미널을 통하여 사용자가 감시제어할 수 있도록 해준다. MPU는 2.5Gb/s시스템의 OAM&P기능을 담당함과 동시에 TMN과 접속되어 운용센터의 OS와 연결되어 2.5Gb/s시스템이 원격제어 될 수 있게 망접속기능을 제공한다.

서 TPU는 저속모듈의 감시 및 제어정보를 수집하고 이를 차상위 계위인 SPU로 전송 한다. SPU는 고속모듈의 정보를 수집하고 네개의 TPU로부터 수집된 정보와 함께 MPU로 보낸다. 또한 SPU는 PC를 이용한 MMI기능이 제공되므로 고속부 회선절체 및 감시 그리고 저속부 모듈의 제어 및 감시의 실시간제어가 가능하다.

MPU는 하드디스크와 LCN접속장치가 실장되어 있어서 한루트내의 모든 시스템의 정보를 장시간 보관할 수 있을뿐 아니라 시스템운용에 관련된 소프트웨어를 저장할 수 있다. 또한 ether-net을 LCN으로 이용하여 MD와의 접속이 가능하고 MD를 이용하여 OAM&P와 관련된 정보를 운용센터로 전송하거나 센터로부터 제어정보나 기타 소프트웨어를 수신할 수도 있다. 여기서 MD는 LCN에 접속된 모든 NE의 정보를 수집할 수 있으며, 운용센터의 OS와 NE를 연결하기위하여 gateway역할이나 프로토콜변환 기능을 가질 수 있다. 필요시 GUI 기능을 가진 터미널을 이용하여 그래픽제어도 가능하다.

2. 감시제어체계

그림 3은 감시제어장치의 체계도를 나타낸다. 여기

3. 다중장치의 구조

다중장치는 고속신호처리부와 중속신호정합부로 나

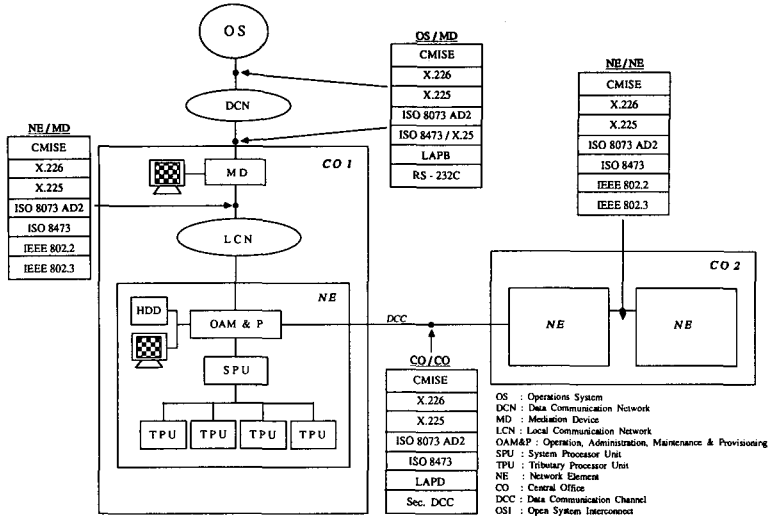


그림 3. 감시제어의 체계도

되며 종속신호정합부에는 TIU(DS3 Interface Unit), TI1U(STM-1 Interface Unit), TI4U(STM-4 Interface Unit)의 3가지 종속신호정합유니트가 있으며 고속신호처리부에는 다중화, 역다중화와 광송수신기능을 하는 HSTU(High Speed Transmitter Unit), HSRU(High Speed Receiver Unit), REP(Repeater Unit)가 있다.

시스템구성에서는 종속신호에 따라 종속신호정합유니트를 선택하여 사용하나 고속신호처리부에서는 종속신호에 상관없이 HSTU와 HSRU를 공통으로 사용할 수 있도록 한다.

종속신호정합에서는 DS3와 STM-1 신호는 혼합수용할 수 있으나 이때 DS3 신호는 12개, STM-1 신호는 4개 즉 622Mbps 용량을 하나의 단위로 한다.

종속신호정합유니트는 HSTU로 보낼 신호를 만들기 위해 STIU(System Timing Interface Unit)로부터 51MHz 클럭을 받아 프레임을 형성시킬 때 기준신호가 없이 서로 독립적으로 프레임을 형성하므로 AU32 신호의 위상이 서로 다르게 된다. 이렇게 각기 다른 위상의 AU32 신호는 HSTU 내의 PI(Pointer Interpreter)에서 포인터가 해석된 후 SOHP(Section Overhead Processor ASIC)로부터 받은 51MHz 클럭과 FS 신호를 기준으로하여 PG(Pointer Generator)에서 48개의 AU32 신호가 동일한 위상으로 정렬이 되도록 한다. 이러한 구조에서는 여러개의 종속신호정합유니트로부터의 신호들을

HSTU까지 동일한 위상으로 유지시켜 리타이밍해야 할 필요가 없으며 또한 ADM(Add-Drop Multiplexer) 구성시 수신측에서 송신측으로 패스되는 신호(through data)와 종속신호정합유니트로부터의 신호(add data) 간의 위상차이도 어려움없이 없앨 수 있다.

STM-16 선형 ADM에서의 add-drop 할 수 있는 최대 용량은 2.5Gbps의 반에 해당되는 DS3 신호, STM-1 신호 각각 24개, 8개씩의 채널이다. 따라서 HSRU에서 HSTU로 전달해 주는 48개의 AU32 중 24개는 종속처리부에서 보내주는 24개의 AU32 신호와 2:1로 선택된다.

ring형에서 라인 절체는 Path AIS와 Path BIP에 의해서 이루어지므로 종속신호 처리부인 TIU에서는 양방향에서 입력되는 AU32 신호를 모두 처리하여야 한다. 따라서 TIU 당 고속처리부와 정합되는 신호양이 단국과 선형 ADM에 비해 2배가 된다.

4. 광송수신기 설계 및 제작

1) 광링크의 구성

장거리 국간전송의 광링크는 그림 4와 같이 송신기, 전송로인 광섬유, 그리고 수신기로 구성되어 있다. 패턴발생기의 출력인 2.5 Gbps (정확히는 2.488 Gbps) nonreturn to zero(NRZ) 신호가 레이저 구동회로를 거쳐서 반도체 레이저를 구동한다. 반도체 레이저는 색분산과 모드 분산 잡음의 영향을 최

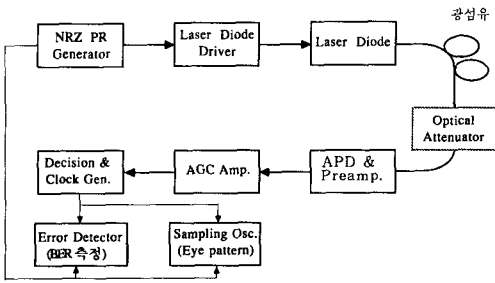


그림 4. 광링크의 구성도

소화하기 위해서 변조시에도 단일모드로 발진하는 DFB레이저를 사용하였다. 광섬유의 손실은 1,550 nm에서 0.2 dB/km이고 색분산이 17 ps/nm-km 인 단일모드 광섬유를 사용하였다. 수신단에서는 수신기의 수신감도를 높이기 위해서 전치증폭기와 함께 집적된 APD를 사용하였다. 전치증폭기 다음단에 주 증폭기를 달아서 수신한 신호를 증폭한 다음 클럭 재생회로에 보내서 클럭을 재생한다. decision회로에서는 재생된 클럭에서 정해진 시간에 주 증폭기에서 증폭된 신호의 크기를 내부에 설정된 decision threshold 값과 비교하여 신호를 재생한다. 에러 검출기에서는 재생된 신호와 송신된 신호를 비교하여 BER를 측정하고, 신호의 eye pattern은 digital sampling oscilloscope와 초고속 광검출기를 이용하여 측정하였다.

CCITT에서는 중계거리에 미치는 반도체 레이저의 동특성 및 광섬유의 색분산의 영향과 소자의 온도, 경년효과 등을 포함해서 STM-16(2.5Gbps) 광링크 설계에 관한 사항을 G957에 권고하였다. 즉 송신기의 평균출력은 $-5\text{dBm} < P < 0(+1)\text{dBm}$, 광섬유 손실(구간 S와 R사이 손실) 10 - 20dB, 수신감도 - 26dBm, 수신기 최대 부하 $-10(-9)\text{dBm}$, 광경로 penalty 1(2)dB이다. 여기서 모든 수치들은 최악의 경우로서 최적의 경우와 비교하여 보통 2 - 4dB 시스템 마진이 필요하다.^[2] 본 연구소에서 2.5 Gbps 광송수신기를 설계할 때도 이러한 사항들을 충분히 고려하였다.

2) 광송신기 설계

고속 다중화부에서 공급되는 2.5Gbps 전기신호를 받아서 이를 광신호로 변환하는 기능을 수행하는 광송신기의 주요 기능 블록은 그림 5에 나타난 바와 같이 반도체 레이저, 반도체 레이저 고속변조를 위한

레이저 구동회로부, 레이저 칩의 온도를 일정하게 유지시켜 주는 온도제어부, 출력광의 평균세기를 일정하게 하는 자동광출력제어부(automatic power control), 그리고 송신기의 동작상태를 감시하는 경보신호 발생부로 크게 나눌 수 있다.

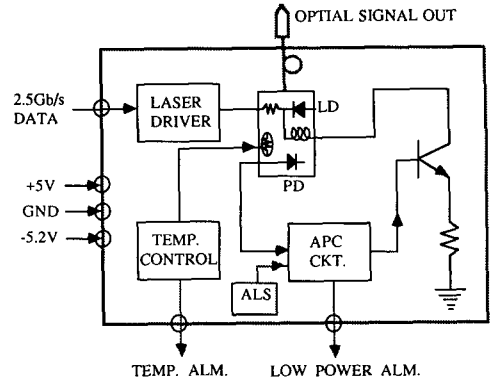


그림 5. 2.5Gbps 광송신기의 구성도

반도체 레이저는 발진 파장이 1,550 nm인 상용 distributed feedback (DFB)레이저로 변조사의 -20 dB 발진선폭이 0.61 nm이고 side mode suppression ratio(SMSR)는 30 dB 이상이다. 레이저 구동회로는 마이크로웨이브 전용기판($r = 10.2$)에 별도로 제작하여 에폭시 기판에 부착하였다. 고속 데이터 신호는 레이저 구동회로와 AC 결합되어 있으며, 구동회로의 출력은 반도체 레이저와 DC 결합되어 있고, 반도체 레이저의 바이어스 전류는 구동회로의 트랜지스터 바이어스 전압을 제어하여 조정한다. 구동회로의 출력 임피던스는 반도체 레이저에 공급되는 전류를 크게하기 위해서 25 ohm으로 하였다.

반도체 레이저의 출력은 온도의 변화에 매우 민감하므로 동작온도를 일정하게 유지해야 한다. 이를 위해 LD 모듈에 내장된 온도감지용 서미스터와 thermoelectric cooler(TEC)를 이용하였다. 온도제어 방식은 푸시풀(push-pull) 증폭기의 단점을 보완한 비례 및 적분 제어방식을 사용하였다. 또, 레이저의 평균 출력 변화를 반도체 레이저 모듈에 내장된 모니터용 광검출기로 검출하여 부계환 회로를 구성하였다. 이 제환회로는 반도체 레이저의 바이어스 전류를 제어하여 레이저의 평균 출력을 일정하게 유지시킨다. 레이저의 바이어스전류와는 별도로 독립적으로 제어가 가능한 변조전류의 진폭은 레이저의 처방.

turn-on 지터, 소광비 등을 고려하여 정하였다.

광수신기의 동작상태에 대한 정보를 얻기위해서 레이저의 바이어스 전류 및 동작온도를 감시하여 레이저의 바이어스 전류가 레이저의 열화 및 동작온도의 변화에 의해서 기준 바이어스 전류에서 50% 이상 증가하면 경보신호를 발생시킨다.^[9]

3) 광수신기 설계

광수신기는 광신호를 전기신호로 바꾸는 광검출기, 미약한 전기 신호를 저잡음 광대역 증폭기인 전치 증폭기, 신호의 레벨을 키우는 주증폭기, 그리고 왜곡된 신호를 다시 깨끗한 신호로 정형화하고 클럭을 추출하는 클럭 추출 및 정형부로 구성된다. 광수신기의 특성과 광섬유의 특성은 여러가지 원인에 의해서 변화하기 때문에 광수신기가 받는 신호의 왜곡정도와 신호의 크기가 바뀌게 된다. 그러므로 광수신기를 설계할 때는 이러한 특성도 고려해야 한다.

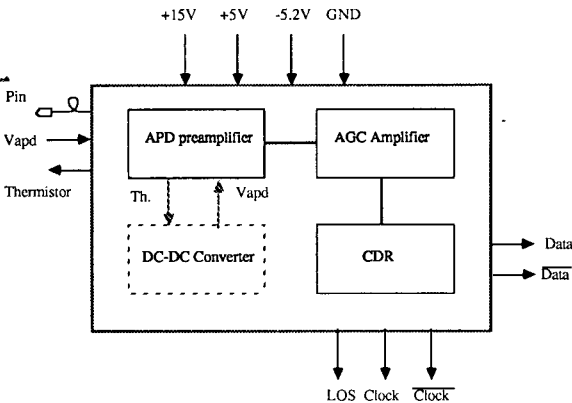


그림 6. 광수신기 구성도

광수신기의 구성도는 그림 6과 같다. 광검출기는 만족할 만한 수신감도를 얻기 위하여 avalanche photodiode(APD)를 사용한다. APD의 이득 $\langle M \rangle$ 은 온도변화에 매우 민감하므로 이를 보상하기 위한 온도보상회로가 함께 있는 DC-DC 변환기가 필요하다. 실험에서 사용한 InGaAs APD의 경우 바이어스 전압이 온도변화에 대하여 0.22%/ $^{\circ}\text{C}$ 정도 변화하는 DC-DC 변환기가 요구된다. 그리고 APD의 바이어스 전압원과 APD사이에 큰 저항을 직렬연결하여 입력광의 세기가 증가할 때 저항에서의 전압강하가 증가하여 APD에 가해지는 바이어스 전압을 감소시켜서 입력광의 세기가 클 때 전치증폭기의 포화를 방

지하여 dynamic range를 증가시켰다. 전치증폭기의 특성은 수신감도와 dynamic range를 결정하는 중요한 증폭기인데, 본 실험에서는 InGaAs APD와 GaAs IC transimpedance 형의 전치증폭기가 집적화 된 수신기 모듈을 이용하였다. 실험적으로 측정된 dynamic range는 20dB 이상이다.

주증폭기는 전치증폭기에서 일차 증폭된 신호를 정형부에서 필요한 정도로 증폭하는 역할을 하며, 이득, 주파수 응답, 입출력 정합, dynamic range 등을 고려하여 설계한다. 주증폭기의 잡음지수(noise figure)는 대략 10dB 이하를 만족해야 한다. 주증폭기에서 주로 자동이득제어회로(automatic gain control) 회로를 사용하여 일정한 출력을 얻도록 증폭기 이득이나 APD 바이어스를 조정한다.

정형부는 limiting 증폭기, phase locked loop (PLL), D-F/F² 등이 집적화된 clock & data regenerator(CDR)를 사용하여 2개의 정형된 data 와 2개의 클럭을 얻는다. 그리고 BER이 약 1×10^{-3} 근처에서 광수신기가 데이터를 받아들이지 못함을 알리는 신호인 loss of signal(LOS) 경보신호를 만든다.

4) 광송수신기 결합실험

광섬유와의 전송실험을 위하여 먼저 광섬유 없이 송신기와 수신기를 결합하여 송/수신기의 특성을 조사하였고, 송수신기와 29 km, 47 km, 76 km, 그리고 98 km의 광섬유를 결합하여 2^{23-1} 의 PRBS를 이용하여 광입력전력 대 BER 곡선을 얻는다. 수신 광전력을 계속 높여도 어떤 BER 이하로 더이상 좋아지지 않는 현상(error floor)이 없고, 소광비(extinction ratio)가 좋은, 레이저의 바이어스 전류 값을 여러 길이의 광섬유에 대하여 구하고, 수신기의 정형부에서 '1', '0'을 판단하는 최적의 기준 전압을 찾는다. 이 과정을 통해서 얻은 BER 곡선 그림 7에 보였다. 98 Km에서 수신감도 -32.5dBm (BER 1×10^{-10} , PRBS 2^{23-1}), 소광비와 광섬유의 색분산에 의한 손실인 총 penalty는 3dB이다. 이와같이 구현한 광링크의 시스템 이득(광섬유의 색분산에 의한 penalty를 포함)이 30 dB 이상인 것을 확인하였다. 이는 손실이 0.5dB/km인 국내의 포설된 광섬유의 경우 60 km 정도 무중계 전송이 가능할 것으로 판단된다. 그러나, 이 값들은 송신기와 수신기의 상태가 최적일 때의 경우이므로 실제의 시스템에서 사용하는 경우는 송신기와 수신기의 열화에 의한 특성의 저하, 주변온도 변화에 의한 특성의 변화를 고려하지 않

면 안된다. 이러한 모든 것을 고려하여도 설계/제한된 광링크는 CCITT 권장사항인 전송거리 40 km, 수신감도 -26 dBm을 만족할 것으로 판단된다. [1]

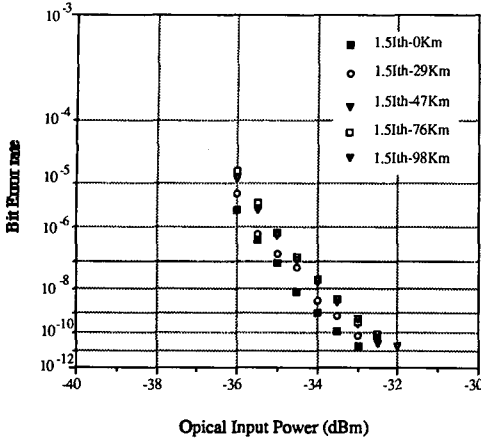


그림 7. 광섬유의 길이 변화에 따른 광입력전력 대 BER 곡선

III. 10 Gbps 광전송 장치

10 Gbps급 광통신 시스템의 광전송 링크의 기본 구성은 현재 개발중인 2.5Gbps 광전송 링크와 동일하다. 그러므로 송신기의 온도제어, 자동광출력제어, 수신기의 APD온도보상회로 등은 2.5 Gbps 광전송 장치에서 습득한 기술들을 활용할 수 있을 것으로 판단되며, 시스템의 운용 및 감시제어 소프트웨어와 하드웨어도 많은 부분 2.5 Gbps 광전송에서의 경험을 활용할 수 있다. 10 Gbps 광전송장치에서 특별히 고려해야 할 부분은 초고속부로서, 2.5 Gbps 신호 4채널을 시간분할 다중화 하는 MUX부 및 역다중화 하는 DMUX부, 그리고 광전송장치의 핵심 광송신기를 포함한 광링크부이다. 그래서 본장에서는 광링크를 중심으로 10Gbps 광전송장치의 구현에 필요한 기술들을 살펴보았다. 이에 대한 자세한 것은 참고문헌 [4]을 참조바라한다.

1. 광송신기

2.5 Gbps 신호를 시간분할 다중화하여 얻은 10 Gbps신호를 전자적으로 증폭하여 DFB 레이저나,

외부변조기를 구동함으로써 광송신기가 구현된다. 표 2에는 반도체 레이저 직접변조 방식과 외부변조기를 이용하는 방식으로 구현한 10 Gbps 광전송 실험 결과들을 나타내었다. 이러한 송신기를 구현하기 위해서 고려되어야 할 사항들은 전자소자의 스위칭 속도, 반도체 레이저 및 외부변조기의 변조 대역폭과 변조시에 유기되는 처핑의 양이다. 광송신기의 대표적인 전자소자는 MUX 및 반도체 레이저 드라이버(혹은 외부변조기 드라이버)가 있다. 이 중에서 특히 구현에 어려움이 있는 것은 대출력을 요구하는 반도체 레이저/외부변조기 드라이버이다. 그러나, 광송신기에서 무엇보다도 중요한 것은 반도체 레이저/외부변조기의 대역폭과 이들의 변조시에 유기되는 처핑이다.

표 2. 10 Gbps 이상의 광전송 실험결과들

전송속도	전송거리	Chirping	광증폭기	기관	비고
10 Gbps	140 Km	0.4 nm at -20 dB	a booster and a preamp. EDFA	Hitachi EOC '91 H. Nakano	Sensitivity -26.5 dBm
10 Gbps	20 Km	0.52 nm at -20 dB	no EDFA	Toshiba EOC '91 H. Yamakawa	Sensitivity -17 dBm
11 Gbps	81 Km		no EDFA	Bellcore EL '89 J.L. Gilett	Sensitivity -19.8 dBm
10 Gbps	50 km	strained MQW DFB laser 0.35 nm at -20 dB	no amplifier	NTT EL '91 Y. Miyamoto	Sensitivity -23 dBm (APD) DSF, 1.3 um
16 Gbps	64.5 km	35 dB SMSR	SL preamp.	AT&T EL '89 A.H. Gnauck	pin-FET receive 1.3 um with normal fiber

(a) 반도체 레이저 직접변조 방식을 이용한 결과

전송속도	전송거리	변조/복조	광증폭기	기관	비고
20 Gbps	100 Km	EM/DD 10Gbps * 2	고출력 EDFA for receiver	NTT OFC '92 K. Hagiwara	3 dBm signal is coupled to PIN
10 Gbps	220 Km	EM /DD	a booster (2m) a pre-EDFA (20 GHz)	AT&T PTL '92 A.H. Gnauck	Unchopped power 17 dBm Sensitivity -36 dBm
17 Gbps	150 Km	EM/DD	a booster and a pre-EDFA	NTT Opt. Amp. and their Appl. '90 H. Hagiwara	Dis. compen. with normal SMF Sensitivity -24.8 dBm
10 Gbps	140 Km	Electroabs. modulation Tx and Rx mod. EM/DD	a booster and a preamp. EDFA	NEC OFC '92 T. Suzuki	Sensitivity -12.3 dBm with 24db EDFA -28.5 dBm
20 Gbps	100 Km	Electroabsorp. Modulation/DD	a booster and a pre-EDFA	NTT EL '92 T. Katoaka	No modulator driver
10 Gbps	4500 Km	Electroabsorp. modulation/DD Extinction ration 20 dB	138 EDFA 30km span DSF a booster and a pre-EDFA	KDD R&D Lab. H. Tags OFC '92	Sensitivity -29.5 dBm

(b) 외부변조기를 이용한 결과.

특히 10Gbps이상의 광통신에서는 처핑의 양과 광섬유에서의 색분산이 전송거리를 결정하기 때문에 장거리 전송에서는 DFB 레이저 대신에 처핑이 적은 외부변조기를 사용하는 것이 바람직 할 것으로 예측되고 있다. 외부변조기에는 전기장으로 매질의 굴절율을 변화시켜서 빛을 변조하는 간섭계형과, 전기장으로 매질의 흡수율을 변화시켜서 빛을 변조하는 흡수형이 있다. 일반적으로 흡수형이 간섭계형보다 작고 변조 대역폭이 넓다. 외부변조기를 사용하는 경우는 변조기에서의 손실을 보상하기 위해서 송신단에서 광증폭기를 사용하여야 하는 등 송신기가 복잡해지고 신호성이 떨어지므로 최근에는 변조시의 처핑이 적은 양자구조 DFB 레이저를 개발하려는 노력이 진행되고 있다.^[5]

2. 광섬유

광섬유를 진행하는 신호는 광섬유의 손실에 의해서 감쇄되고, 색분산에 의해서 왜곡된다. 광섬유에서의 감쇄정도는 보통의 단일모드 광섬유의 경우는 1,310 nm에서 약 0.45 dB/km, 1,550nm 약 0.25 dB/km 이다(현재 국내에 포설된 광섬유의 경우는 splicing 손실 0.15 dB를 포함하여 1,310 nm 에서 0.65 dB/km, 1,550nm에서 손실이 0.5 dB/km이다.^[6]). 광섬유의 손실은 1,550 nm에서 제일 적기 때문에 이 파장대에서의 광통신이 많이 연구되고 있다. 특히, Er-doped fiber amplifier (EDFA)는 1,550 nm 영역에서의 광섬유의 감쇄를 보상할 수 있는 이상적인 광증폭기로 최근에는 전자적인 증계기 대신 EDFA를 사용하는 광증계기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 광증폭 증계기는 기존의 전자적인 증계기에서와 같은 retiming 및 regeneration 기능이 없으므로 전송속도에 무관한 증계기를 구현할 수 있는 장점이 있으나, 색분산 및 광섬유의 비선형성에 의한 신호의 왜곡이 보상되지 않는 문제점도 지니고 있다.^[7] 1,310 nm 영역에서의 광증폭기로는 기존의 반도체 레이저 광증폭기이외에도 최근에 연구되고 있는 Pr³⁺-doped fluoride fiber 증폭기가 연구되고 있으나 아직 초보적인 단계이다.^[8]

광섬유의 색분산은 광섬유에서의 군속도가 파장에 따라 다르기 때문에 생기는 현상으로 광펄스가 진행하면서 펄스폭이 넓어지는 정도를 나타낸다. 색분산은 ps/nm-km로 나타내고 1,310 nm 부근에서 ± 2 ps/nm-km이고 1,550nm 부근에서 17 ps/nm-

km이다. 색분산의 영향은 전송파장이 1,550 nm (색분산이 1,310 nm 영역의 10 배)로 이동되고, 전송속도가 증가하고, 전송거리가 길어지면서 그 영향이 더 심각해져서, 이제는 광섬유의 색분산이 광통신의 용량을 결정하는 주 요인이 되고 있다. 여기서 한 가지 언급하고 싶은 것은 반도체 레이저의 직접변조시 생기는 처핑에 의한 발진선폭의 증대는 색분산의 영향을 더욱 증대시켜서 전송거리를 단축하는 요인이 되고있다. 정상적인 광섬유 ($D = 17$ ps/(nm.km))를 사용하면 색분산에 의해서 제한되는 1,550 nm대의 10 Gbps (처핑의 영향을 무시한 경우) 신호의 전송거리는 60 km (2.5Gbps는 480 km)이다. 그러나, 직접변조한 반도체 레이저의 처핑을 고려하면 전송거리가 10 km이하로 감소한다. 색분산을 보상해주는 가장 근본적인 방법은 분산천이 광섬유를 사용하는 것이다. 분산천이 광섬유의 경우 손실은 보통의 단일모드 광섬유보다 약 10% 정도 많으며 색분산은 1,550 nm 부근에서 약 ± 2 ps/nm-km정도로 최소값을 갖는다. 이 경우는 보통의 단일모드 광섬유와 비교하여 약 10 배정도 전송거리를 길게할 수 있다.

3. 광수신기

직접검출 방식의 광수신기는 광검출기, 전치증폭기, 주증폭기, limiting amp., 클럭재생회로, decision회로, DMUX로 구성되어 있다. 디지털 스위칭소자인 DMUX, 클럭 재생회로, decision회로의 경우 10Gbps용으로는 스위칭 시간이 최소한 50ps 이하가 되어야 한다. 10 Gbps의 광링크에 사용하기 위해서는 선형 증폭기인 전치증폭기 및 주증폭기는 대역폭이 수 KHz-7GHz 정도 되어야 한다. 또한 전치증폭기는 대역폭도 중요하지만 수신감도를 높이기 위해서는 잡음지수도 낮아야 한다. 10 Gbps급 이상의 클럭재생회로에는 기존의 SAW 필터를 사용하기가 어려우므로, 유전체 공진기등을 이용한 협대역 밴드 통과 필터를 사용하여야한다.

광통신에 사용되는 광검출기로는 대부분 InGaAs 반도체를 이용하여 제작하며 PIN 검출기와 APD가 있다. PIN 검출기는 대역폭이 넓고 사용이 간편하나, 얻을 수 있는 수신감도(receiver sensitivity)가 열잡음에 의해서 결정되므로 APD를 사용하는 경우보다 수 dB 정도 떨어진다. APD는 PIN검출기에 비해서 대역폭이 좁고 사용이 불편하나 수신감도가 열잡음이 아닌 양자역학적 한계인 산탄잡음(shot

noise) 및 무작위적인 전자 정공의 증배(전자와 정공의 증배율이 차이)로 인한 잡음에 의해서 결정되므로 높은 수신감도를 얻을 수 있다. 10 Gbps에서 PIN 검출기를 사용하여 수신감도 -19.8 dBm, APD를 사용하여 -27 dBm까지 얻은 결과가 보고되었다.^[10] APD를 10 Gbps 광링크에 사용하기 위해서는 이득과 대역폭을 곱한 것이 100 GHz정도인 것이 요구된다. 최근의 동향은 사용이 간편한 PIN 검출기를 이용하고 EDFA를 pre-amp.로 이용하여 수신감도를 높이려는 연구가 진행되고 있으며 최근에 10 Gbps에서 -36dBm의 수신감도를 얻은 결과가 보고되었다.^[11] 이 때의 수신감도는 광파통신에서 얻은 수신감도에 육박한다.

4. 기타고려사항

지금까지 설명한 바와 같이 광자소자나 전자소자의 속도제한으로 인한 광 링크의 전송 속도 제한을 극복하고 보다 고속 전송이 가능한 광 링크를 구현하기 위해 광을 이용한 MUX / DMUX 와 optical clock 재생 방식들이 연구되고 있다.^[12] 또, 광섬유의 색분산의 영향을 제거하기 위한 여러가지 색분산 보상법과 soliton 전송방법도 연구되고 있다.^[13]

또한, 반도체 레이저를 직접변조하면서(외부변조기를 사용하지 않고) 처핑 및 색분산에 의한 전송거리의 제한을 극복하고자하는 연구도 진행되고 있다. 예를 들면 반도체 레이저를 주파수 변조하고 이를 MZ 간섭계를 통과시켜서 진폭변조된 신호로 바꾸어서 전송하여 수신하는 방식(FSK-IM 방식)^[14] 과, 주파수변조된 신호를 전송하고 광섬유의 색분산을 이용하

여 주파수 변조된 신호를 진폭변조된 신호로 바꾸어서 수신하는 방식^[15] 이 있다. 두가지 방식 다 반도체 레이저에서의 처핑을 오히려 역으로 이용하는 전송방식으로 앞으로 계속 연구할 가치가 있다.

IV. 100Gbps급 광통신

시간를 분할하여 다중화하는 방식의 광통신의 소자는 스위칭속도 및 광송신기에서의 처핑과 광섬유의 색분산으로 인한 제한 때문에 10 Gbps이상에 적용하기에는 많은 어려움이 있을 것으로 예측된다. 100 Gbps급 광전송 장치는 10 Gbps급 광전송 링크가 개발되면 이를 광학적 파장분할 다중화하여 구현한다. 이 방법은 광전송장치의 전송속도를 대폭 높일 수 있는 다중화 방법으로 기존의 초고주파 통신에서 주파수를 분할하여 다중화 하는 방법에서 아이디어를 얻은 것으로 약 2000GHz 정도되는 광섬유의 전송대역폭(분산이 최소인 영역에서의 산출한 값임)을 충분히 이용할 수 있는 방법이며, 채널간의 주파수 간격이 nm 정도로 전송신호의 대역폭보다 훨씬 넓은 경우를 파장분할 다중화(WDM : Wavelength Division Multiplexing)라고 한다. 반면에 채널간의 주파수 간격이 전송신호의 대역폭과 유사한 경우를 주파수분할(FDM : Frequency Division Multiplexing)부르며, 100Gbps급 광통신 (160 Gbps)에서는 10 Gbps 16개를 WDM하여 구현한다. 그림 8은 파장분할 방식의 광 링크의 구성도를 나타내었다. WDM을

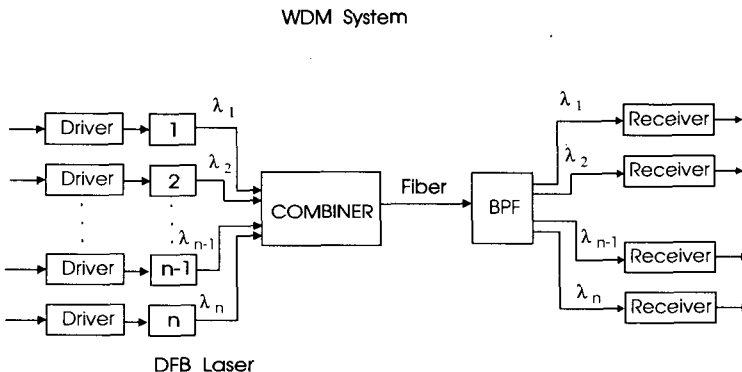


그림 8. 파장분할 다중화 광링크의 구성도

위해서는 송신단에서는 각각 다른 파장의 신호를 하나의 광섬유에 보낼 수 있도록 해주는 광결합기와, 수신단에는 송신단에서 보낸 단일 파장의 신호만을 선택할 수 있는 광 필터가 필요하다.

파장분할 다중화 시스템의 상용화를 위해서 해결해야 될 문제점으로는 제일 먼저 광원인 DFB레이저의 수율 및 파장의 재현성이다. 시분할 방식에서는 광섬유의 대역폭이 넓고 광검출기의 수신 대역폭도 매우 넓으므로 전송 파장의 절대값은 중요하지 않다. 그러나, 파장분할 방식에서는 각 채널의 파장이 명확히 정해져 있고 여기에 상응하는 필터를 수신단에서 사용하므로 상황이 매우 다르다는 것을 쉽게 알 수 있다. 그러므로 시간분할 방식과 달리 송신용 레이저 선택의 자유도가 없고 결정된 전송파장에 맞는 레이저를 선택해야 한다. 그래서 파장을 연속적으로 가변할 수 있는 반도체 레이저인 multisection DFB 레이저^[16], 파장가변 DBR 레이저^[17], 그리고 파장가변 파이버 레이저^[18] 등을 연구하고 있으나, 그 가변폭이 충분히 넓지 못하다. 파장분할 광 링크에 사용할 레이저의 또하나의 요구조건은 발진 파장이 장시간 (20년) 동안 매우 안정해야한다는 것이다.

송신단의 반도체 레이저에서 제기됐던 문제점이 수신단의 광필터에도 그대로 적용된다. 즉 장시간동안 매우 안정된 통과파장가변 필터가 필요하다. 회절격자 필터를 사용하는 경우 회절격자의 회절효율이 입사광의 편광에 의존하기 때문에 시스템의 성능을 저하되고, PZT를 사용하는 파이버 Fabry-Perot 필터는 아직 수명이 보장되지 않고 있다. 저가의 신뢰도가 높은 파장가변을 개발하기 위해서 ZnS를 이용한 temperature tuning filter가 연구되고 있다.^[19]

파장분할 다중화 광링크에서 중요한 변수 중에 하나는 채널간의 파장 간격이다. 파장간격이 너무 좁으면 수신단에서 필터를 구현하기가 힘들어질 뿐만아니라, 근본적인 문제인 광섬유에서의 비선형성에 의한 four wave mixing, stimulated raman scattering, stimulated brillouin scattering 등이 영향을 미치기 시작하여 광 링크의 성능을 저하시킨다. 일반적으로 광학적 비선형 현상은 광섬유 코어의 직경이 가는 분산천이 광섬유에서 보통의 단일 모드 광섬유보다 훨씬 크게 나타난다. 이는 파장분할 다중화 방식에서 분산천이 광섬유를 사용하지 않고 보통의 단일모드 광섬유를 사용하는 또 다른 이유이다. 또한, 채널폭을 넓게하는 것은 장거리 전송을 위해서 사용해야하는 EDFA의 대역폭

에 의해서 제한된다. 이러한 영향을 고려해서 10Gbps 신호를 파장분할로 다중화하는 경우 채널폭은 수 nm 정도가 적당할 것으로 예측하고 있다

V. 결론

지금까지 고속 광전송기술에 대해서 알아보았다. 2.5 Gbps 광전송장치는 이제 실용화 단계에 있으며 앞에서 설명 했듯이 광전송 장치를 개발하기 위해서는 소프트웨어에서 주문형 반도체 및 초고주파기술, 그리고 광전자기술까지의 종합적이고 체계적인 연구가 필요하다.

10 Gbps광전송 장치에서는 광링크 및 MUX/DMUX기술을 제외한 많은 분야의 기술이 2.5Gbps에서 습득한 것을 토대로하여 개발할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나, BISDN등과 연계되므로 통신망관련 기술과 보다 많은 교류 및 상호보완이 이루어져야 할 것으로 예측된다.

10Gbps 광링크와 100Gbps급 광링크의 전송거리를 제한하는 요인은 1) 전자소자 및 광자소자의 스위칭 속도, 2) 광섬유의 색분산, 3) 광섬유의 광학적 비선형성을 들 수 있다. 반도체 레이저의 성능은 10 Gbps급의 광통신 링크에서 직접변조방식을 택하느냐 아니면 외부변조기를 이용하는 방식을 하느냐를 결정하게 되므로 이에 대한 연구는 매우 중요하다. 색분산 보상법으로는 분산천이 파이버를 사용하는 방법등 여러가지 대안이 연구되어야 한다. 색분산에 의한 전송거리의 제한 및 소자의 스위칭 속도에 의한 전송거리의 제한을 극복하고 기포설된 단일모드 광섬유를 이용하고자 하는 열망이 파장분할 다중화 방식의 광링크 개발의 동기를 부여해주고 있다. 어떠한 다중화 방식을 택하건 초고속 장거리 전송에서는 광섬유에서 전송되는 빛의 세기를 증가시키기 위해 송신단에서 booster 광 증폭기를 사용하고 또, 증계기대신 EDFA를 사용한다. 그리하여 광섬유의 비선형성에 의한 신호의 왜곡이 광링크의 성능을 저하시키는 또 하나의 요인으로 대두되고 있다.

감사의 글

본 2.5Gbps 광전송 시스템개발은 한국통신 출연금

으로 수행하였으며, 본 논문은 이 연구에 참여한 이창희, 윤태열, 고정훈, 전경규씨의 협조로 작성되었습니다.


参 考 文 献

- [1] 한국전자통신연구소, 2.5 Gbps 광전송 시스템 개발, 연구보고서, 1992.
- [2] CCITT recommendation G. 957
- [3] M. Fukuda, Reliability and Degradation of Semiconductor Lasers and LEDs, Artech House, Boston, 1991.
- [4] 이창희, 심 창섭, "10 Gbps이상의 광통신 기술동향," 전자공학회지, 20, no. 1, pp. 62-80, 1993.
- [5] Y. Suematsu, K. Iga, and S. Arai, "Advanced semiconductor lasers," Proceedings of IEEE, 80, pp. 383-397, 1992.
- [6] 한국통신, "광섬유, 광케이블 규격," 통신 6145-3281-바, 1991.
- [7] C. Rolland, L. E. Tarof, and A. Somani, "Multigigabit networks : The challenge," IEEE Lightwave Telecommunication Systems, pp. 16-26, May, 1992.
- [8] Y. Miyajima, T. Sugawa, and Y. Fukasaku, "38.2 dB amplification at 1.31 μ m and the possibility of 0.98 μ m pumping in Pr³⁺ doped Fluoride fiber," 1991 Topical meeting on Opt. Amplifiers and thier Applications, paper PdP1-1, Snowmass, Colo., USA, 1991.
- [9] P. Monteiro, J.N. Matos, A. Gameiro, and J.R.F. da Rocha, "10 Gbit/s timing recovery circuit using dielectric resonator and active bandpass filters," Electron. Lett., 28, pp. 819-821, 1992.
- [10] A. H. Gnauck, C. A. Burrus, and D. T. Ekholm, "A transimpedance APD optical receiver operating at 10 Gb/s," *IEEE Photonics Tech. Lett.*, 4, pp. 468-470, 1992.
- [11] A. H. Gnauck and C. R. Giles, "2.5 and 10 Gb/s transmission experiments using a 137 photon/bit Erbium-fiber preamplifier receiver," *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 4, pp. 80-82, 1992.
- [12] N.A. Olsson and P.A. Anderkson, "Optical technique for beyond 10-Gbit/s systems," Digest of Optical Fiber Communication Conference, pp. 46-47, paper Tull, San-Jose, CA, USA, Feb. 2-7, 1992.
- [13] L.F. Mollenauer, E. Lichtman, G.T. Harvey, M.J. Neubelt, and B.M. Nyman, "Demonstration of error-free soliton transmission over more than 15,000 km at 5 Gbit/s, single channel, and over more than 11,000 km at 10 Gbit/s in two-channel WDM," *Electron. Lett.*, 28, pp. 792-794, 1992.
- [14] U. Fischer, "10 Gbit/s transmission over 69 km of non-dispersion-shifted singlemode fiber with CPFSK direct modulation of 1.55 μ m BH DFB laser," *Electron. Lett.*, 28, pp. 1305-1306, 1992.
- [15] W. Wedding, "New method for optical transmission beyond dispersion limit," *Electron. Lett.*, 28, pp. 1298-1230, 1992.
- [16] U. Ohlander, D. Karlsson-Varga, S. Nilsson, J. Andre, J. Wallin, S. Lindgren, S. Lourdudoss, O. Kjebon, B. Broberg, and G. Landgren, "Three section GRIN-SCH SI-MQW 1.55 μ m SI-DFB lasers for coherent telecommunications," Digest of 18th European Conf. on Optical Communications, pp. 181-184, paper TuB5.4, Sept. 27 - Oct. 1, Berlin, Germany, 1992.
- [17] T. Takano, T. Morimoto, H. Hasum,

T. Nakamura, M. Yamaguchi, T. Sakai, and I. Mito, "1.55 μm wavelength-tunable MQW-DBR-LDs employing bandgap energy control in all selective MOVPE growth," Digest of 18th European Conf. on Optical Communications, pp. 177-180, paper TuB5.3, Sept. 27 - Oct. 1, Berlin, Germany, 1992.

[18] J.L. Zyskind, J.W. Sulhoff, J. Stone, D.J. Digiovanni, L.W. Stulz, H.M.

Presby, A. Piccirilli, and P.E. Praymon, "Electrically tunable, diode-pumped erbium-doped fiber ring laser with fiber Fabry-Perot etalon," *Electron. Lett.*, 27, pp. 1950-1951, 1991.

[19] Y.C. Chung, "Temperature-tuned ZnS etalon filters for WDM systems," *IEEE Photonics Tech. Lett.*, 4, pp. 600-602, 1992. 

/.筆者紹介



沈昌燮

1952年 5月 6日生

1975年 2月 서울대학교 응용물리학과(학사)

1987年 7월 한남대학교 대학원 물리학과(석사)

1988年 2월 한국과학기술원 전기전자과 박사과정

1975年 2月 ~ 1982年 12月 국방과학연구소 선임연구원

1983年 3月 ~ 현재 한국전자통신연구소 책임연구원(광통신 연구실장)

주관심분야: 광통신시스템 및 반도체레이저 개발