

## 초고속 광전송 시스템

李 晚 燮, 朴 昌 洙

韓國電子通信研究所

### I. 서 론

광통신 기술의 발전으로 현재 대부분의 국내 기간 전송로는 이미 광케이블화 되어 있으며, 고속 대용량 정보를 경제적으로 전송할 수 있게 됨에 따라, 음성 통신에 주력해 온 기존의 통신기술은 음성, 데이터 및 영상 등의 다양한 정보를 효율적으로 전달할 수 있는 초고속 정보 통신망의 기반이 되는 광대역 종합정보통신망(BISDN)을 목표로 발전되고 있다.

초고속 정보 통신망에서는 다양화, 개인화, 복합화(multimedia), 인간화를 지향하는 사용자의 정보 통신 서비스 요구를 충족시켜야 하며, 이를 위하여 음성, 저속 데이터, 정지 영상 등 협대역 서비스 뿐만 아니라 고속 데이터, 고품질의 동 영상과 같은 다양한 광대역 서비스를 경제적이고 효율적으로 수용, 처리할 수 있어야 한다.

기존의 음성급 서비스는 PCM 64Kb/s의 전송속도 정도만을 제공해도 되지만 광대역 서비스를 제공하기 위하여서는 음성급 서비스의 약 2000배인 155Mb/s급의 서비스 용량을 제공해야 한다. 이와 같은 서비스 용량은 슈퍼 컴퓨터의 데이터 서비스 등과 같은 특수한 서비스를 제외하곤 거의 모든 광대역 서비스를 일반 가입자에게 제공할 수 있다. 이를 소요되는 전송속도면을 보면, 음성급 서비스를 위하여서도 국간 중계용으로 수백 Mb/s급의 전송 시스템 뿐만 아니라 기가(giga) 급 광전송 시스템도 현재 사용하고 있다. 따라서 서비스 용량의 단순 비교만하더라도 ~십 Kb/s 서비스를 제공할 때와 155Mb/s 급 서비스를 제공할 때 전송 용량은 최소한 천 배의 전송 용량이 증가해야 하므로 국간 중계망에서는 수백 Gb/s에서 기가의 천 배인 테라(tera) 급 전송 시스템도 필요할 것이고 가입자계에서도 전송 비용을 낮추기 위한 저렴한 기가 급 전송 기술의 개발이 필요하다. 10 Gb/s급 STM-64 동기식 신호에는 155Mb/s ATM (Asynchronous Transfer Mode) 64회선을, 100G에서는 155Mb/s 640회선을 수용할 수 있고 채널 용량이 증가할 수록 채널 당 가격이 비례하여 하락

하기 때문에 광대역 서비스를 가입자에게 전송하기 위해서는 10Gb/s 급 및 100Gb/s 급 초고속 전송장치의 개발뿐만 아니라 광대역 가입자 망의 기술 개발이 필수적이다.

따라서 초고속 정보 통신망을 위한 가입자 망의 전송에 대한 것이 별도로 언급이 되어야 할 것으로 생각하므로 이 논문에서는 초고속 정보 통신망의 기반이 되는 국간 전송 기술에 대하여 국한하여 언급하고자 한다. 그리고 초고속 정보 통신망에 사용되는 초고속 광전송 시스템의 전송속도는 얼마인가에 대한 특별한 정의가 없으므로 기가 비트(giga bit) 이상의 속도를 갖는 광전송 시스템을 초고속 광전송 시스템의 의미로 이 글에서는 사용하고자 한다.

### III. 멀티기가(multigiga)급 광전송 시스템

초고속 정보 통신망의 기간 전송망에 초기에 요구되는 초고속 광전송 시스템들은 2.5Gb/s 광전송 시스템이나 10Gb/s 광전송 시스템이 될 것으로 예상된다 이러한 시스템들은 BDCS 시스템과 어울려져 융통성과 생존성이 있는 국간 전송을 수행하는 주요한 구성 시스템이 될 것이다. 이러한 10Gb/s 급까지 광전송 시스템 개발은 멀티기가(multigiga) 변조가 가능한 반도체 레이저 및 외부 변조기가 개발되고 또, 멀티기가 급 광 검출기가 개발되면서 활기를 띠기 시작하였다. 특히 처핑(chirping)이 적은 동적 단일 모드 반도체 레이저, 광섬유 증폭기, 분산 천이 광섬유 등이 개발됨에 따라 10Gb/s 급 광전송 시스템의 개발이 가능하게 되었다. 따라서 이 절에서는 이러한 2.5Gb/s 광전송 시스템과 10Gb/s 광전송 시스템 기술에 대하여 기술하고자 한다.

#### 1. 2.5Gb/s 광전송 시스템

STM-16 2.5Gb/s SDH 광전송 시스템은 전화 회선 32,256가입자의 용량을 가지는 광전송 시스템이다. 이는 48개의 DS3(45Mb/s)신호를 수용

할 수 있으며, 16개의 STM-1(155Mb/s)신호 혹은 STM-4(622Mb/s)를 수용할 수 있는 용량이다. 국내에서 한국통신뿐만 아니라 데이콤, 도로공사 등에서 외국의 2.5Gb/s 시스템을 도입하여 사용하고 있다. 이중 데이콤과 도로공사에서 도입한 시스템은 미국 표준인 SONET(Synchronous Optical Network)이다. 우리나라에서는 '89년부터 2.5Gb/s 시스템을 개발하기 시작하였으며 95년 현재 상용화가 완료되어 '96년부터는 국내에서 대량으로 사용될 것으로 전망하고 있다. <표 1>은 한국전자통신연구소에서 개발한 STM-16 2.5Gb/s SDH 광전송 시스템의 제원을 나타낸 것이다. 2.5Gb/s 광전송 시스템은 단국장치, 증계장치, ADM(분기/결합 다중화)국 장치로 구성되어 있다. ADM 국 장치를 사용자가 그 목적에 맞추어 선형, 환형(ring), 허브(hub)형으로 구성하여 사용할 수 있다. 여기서 선형이란 2.5Gb/s 송수신부가 상향(west)과 하향(east)측 단국이 별개로 존재하고 종속부인 DS3, STM-1, STM-4 정합부가 최대 48 DS3용량을 가지는 시스템을 의미한다. 그리고 환형이란 선형 ADM장치의 단국과 단국을 서로 맞물려 연결하여 루프를 형성한 형태를 말한다. 이때 루프 내 모든 종속부의 최대 용량은 48 DS3이상을 넘지 못한다. 허브형이란 데이터의 슬림이 없이 2.5Gb/s 광신호를 받아서 STM-1이나 STM-4신호를 추출하여 종속부 쪽으로 재전송이 가능한 구성을 말한다. 종속 신호의 접속 기능으로 DS3신호를 AU32신호로 변환해 주는 기능과 STM-1/ STM-4 신호를 AU32신호로 변환해 주는 기능으로도 각각 구성할 수 있다.

이 때 종속 신호를 처리하는 저속 모듈은 622Mb/s 단위로 4개의 그룹이 있고 그룹별로 감시 제어 및 절체를 수행하는 제어 장치가 있으며, 각 그룹별로 DS3와 STM-1을 혼합하여 운용할 수 있도록 설계되어 있다. ADM국 장치에서는 상호분배(crosspoint) 스위치가 내장되어 있어서 고속부에서 분리된 AU32나 AU4신호를 저속부로 분기/결합(add-drop)시킬 것인가 그렇지 않으면 그냥 증계를 시킬 것인가를 사용자가 변경 제어할 수 있다. 그리고 TMN(Telecommunication Man-

〈표 1〉 2.5Gb/s 광전송 시스템 제원

항 목		내 용	
전송 용량		PCM 음성급 32,256회선(DS3 48회선 용량)	
절 체 비	종속신호	DS3	1+1
		STM-M 또는 ATM	1+1
	라인신호	1+1	
전송망 소요 기능		단국, 중계기, ADM	
종속신호		48×DS3, 16×STM-1, 4×STM-4, 16×ATM	
광 정 합		광송신 출력	-3dBm 이상 (DFB-LD)
		광수신 감도	-30dBm 이하(InGaAs-APD)
		운용 파장	1.31 $\mu$ m, 1.55 $\mu$ m
감시제어 외부접속		TMN	

agement Network, 통신관리망)과 접속하고 운용 센터의 OS(운용 시스템)와 연결하여 2.5Gb/s 시스템을 원격 제어 및 감시할 수 있도록 망접속 기능을 제공한다. 이 때 STM-16 선형 ADM에서의 분기/결합할 수 있는 최대 용량은 2.5Gb/s의 절반에 해당되는 DS3 신호24개와, STM-1 신호 8 개씩이다.

2. 10Gb/s 광전송 시스템

10 Gb/s 광전송 시스템의 개발 현황을 살펴보면 캐나다의 NT(Northern Telecom)에서 2.5Gb/s 신호만을 접속하는 즉 4개의 2.5Gb/s 신호를 다중화한 10Gb/s 광전송 시스템이 미국의 Nynex에 95년 하반기에 공급되어 상용화된 최초의 시스템 이 되었다. 일본의 NEC는 155Mb/s 신호를 접속 할 수 있는 10Gb/s 광전송 시스템을, 후지즈에서는 2.5Gb/s와 622Mb/s 신호를 접속할 수 있는 시스템을 개발하여 현장 시험을 수행하고 있고, 그 밖에 AT&T는 2.5Gb/s 를 4채널 파장 다중화(WDM ; Wavelength Division Multiplexing)로 10Gb/s 용량의 시스템을 개발하였으나 10Gb/s 비트 속도를 직접 전송하는 TDM의 10Gb/s 광전송 시스템은 96년 현재 개발 중에 있다. 그밖에 알카텔(Alcatel)도 10Gb/s 시스템을 개발 중에 있다. 우리나라에서는 HAN/B-ISDN 과제로 한국전자

통신연구소와 대한전선, 삼성전자, 한화정보통신과 '93년부터 공동 연구 개발 중에 있으며 '96년 말에 개발제품을 개발할 예정이다. 따라서 이 소절에서는 10Gb/s 광전송 시스템에서 해결해야할 핵심 기술인 광링크와 기술적 요구 사항에 관해서 먼저 살펴보고 시스템 구성 및 특성에 대하여 설명하겠다.

광통신 시스템의 핵심인 광 링크는 송신기, 전송 로인 광섬유, 그리고 수신기로 구성된다. 광송신기에서 반도체 레이저를 원하는 전송속도의 전기 신호로 변조하면 이를 직접 변조라 한다. 반면 반도체 레이저는 DC 전류로 안정하게 발진시키고 광신호의 변조는 LiNbO<sub>3</sub> Mach-Zehnder(LN-MZ) 간섭계형 변조기나 화합물 반도체 흡수형(EA ; Electro-Absorption) 변조기를 이용하는 방식을 외부 변조라 한다. 이중 직접 변조 방식의 광링크는 기존의 90 Mb/s, 155 Mb/s, 565 Mb/s, 2.5Gb/s 등의 시스템에서 사용하는 방식으로 다른 방식에 비해서 간단하고 저렴하게 광링크를 구현할 수 있으며, 그 신뢰성도 많은 실험을 통해서 이미 확인된 바 있다. 그리고 10Gb/s이상의 직접 변조에 의한 전송은 단거리에서 사용할 수 있지만 후술할 장거리에는 간접 변조가 필요하다. 따라서 이러한 10 Gb/s급 이상의 광링크에서는 다음과 같은 기술적인 문제들을 해결되어야 한다.

광링크에서의 문제에서 첫째 문제는 광소자 및

전자소자의 스위칭 속도이다. 광소자에는 반도체 레이저(LD)와 광검출기(PD)가 있으며, 반도체 레이저의 변조 폭은 실험실에서는 20GHz 이상이 이미 보고 되었으므로 직접 변조에서 LD의 변조 대역폭은 문제가 되지 않지만 광신호로 변환하는 반도체 레이저의 여러 가지 특성 중에서 변조 시에 생기는 처핑, 타이밍 지터 등이 문제가 된다. 특히 처핑은 반송자 밀도 변화에 따른 현상 때문에 발진 선폭이 넓어지는데 광섬유에서의 색 분산과 결부되어 시스템의 성능을 현저히 저하시킨다. 직접 변조 방식의 10Gb/s 시스템에 반도체 레이저를 사용하기 위해서는 변조 대역폭이 7GHz 이상이며, 변조 시 처핑이 적고(-20dB 발진 선폭 0.5nm 이하), 타이밍 지터가 25ps이하인 특성이 필요하다. 이러한 반도체 레이저의 직접 변조 시에 생기는 처핑, 타이밍 지터 등이 10Gb/s 광링크의 성능을 저하시키는 원인이 되고 있다. 광통신에 사용되는 광검출기로는 PIN(P-type Intrinsic N-type)형 검출기와 APD(avalanche photodiode)가 있으며 대부분 InGaAs 반도체를 이용하여 제작 한다. 10Gb/s에서 PIN 검출기를 사용하여 수신 감도 -19.8dBm, APD를 사용하여 -23dBm까지 얻은 결과가 보고되었다. 실제 APD를 10Gb/s 광링크에 사용하기 위해서는 이득과 대역폭을 곱한 값이 100 GHz정도인 것이 요구된다.

10Gb/s에 사용되는 송신측의 핵심 전자 소자는 직접 변조 방식을 이용하는 경우 송신 단의 다중화기, 반도체 레이저 구동 회로가 있고, 간접 변조인 경우 변조기 구동 회로가 있다. 또 수신 단에는 전치 증폭기, 주 증폭기, 제한 증폭기, 클럭 재생 회로, 결정 회로, 역다중화기 등이 있다. 10Gb/s용으로는 이들의 스위칭 시간이 최소한 50ps 이하가 되어야 한다. 특히 송신 단의 레이저 구동 회로의 경우는 20mA-100mA 정도의 전류를 스위칭할 수 있는 고효율의 디지털 스위칭 소자가 필요하고, 외부 변조기인 경우 2~6 볼트 정도의 구동 전압을 내는 소자가 필요하다. 그 밖의 10 Gb/s의 광링크에 사용하는 선형 증폭기인 전치 증폭기 및 주 증폭기는 증폭기의 대역폭이 수 KHz-7GHz 정도는 되어야 한다.

10Gb/s 급 이상의 클럭 재생 회로에는 기존의 SAW(Surface Acoustic Wave) 필터를 사용하기가 어려우므로 유전체 공진기 등을 이용한 협대역 대역 통과 필터를 사용하여야 한다. 유전체 공진기는 높은 유전상수를 갖는 세라믹 물질을 사용하여 마이크로웨이브 공진 기능을 유발시키며, 일반적으로 링 모양이나 원통형으로 구성되고 2-50GHz 대역에서 필터나 발진기로 많이 사용된다. 10Gb/s용으로는 깨끗한 클럭 추출을 위해 Q 값이 높은 협대역 필터가 필요하며, 10Gb/s용 유전체 공진기의 특성에 관한 요구 사항은 중심 주파수가 10GHz, Q(quality factor)가 700~1000 사이의 값을, 삽입 손실이 3dB 이하가 되고, 온도 보상 기능이 있어야 한다. 여기서 온도 보상 기능이란 유전체 자체의 온도에 의한 특성 변화가 발생하므로 온도 변화에 대한 특성 보상기능이 요구되며, 또 정확한 필터를 위해 튜닝 기능도 요구된다.

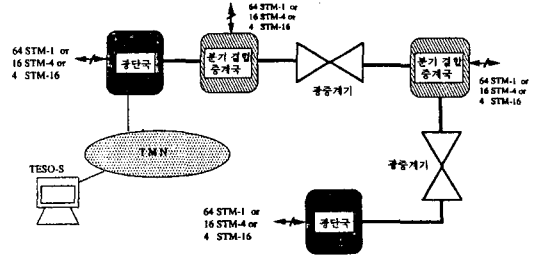
둘째 문제는 광섬유의 감쇠 및 분산 특성이다. 앞에서 설명한 반도체 레이저의 직접 변조 시에 생기는 처핑은 우리가 사용하는 단일 모드 광섬유가 이상적인 전송로라면 아무런 문제가 되지 않으나, 실제 광섬유를 진행하는 신호는 광섬유의 손실에 의해서 감쇠되고, 색 분산에 의해서 왜곡된다. 이들 중 손실은 광증폭기로 보상 가능하므로 광 링크의 특성에 영향을 미치는 광섬유의 특성은 광섬유의 색 분산이 된다. 색 분산의 영향은 전송 파장이 1,550nm 대(색 분산이 1,310 nm 영역의 10 배)로 이동하고, 전송 속도가 증가하고, 전송 거리가 길어지면서 그 영향이 더 심각해진다. 정상적인 광섬유(색 분산 계수=17ps/(nm.km))를 사용하면 10Gb/s(처핑의 영향을 무시한 경우) 신호의 전송 거리는 색 분산에 의해서 60km(2.5Gb/s는 480km)로 제한된다. 그리고 이 위에 처핑에 의한 LD출력의 스펙트럼이 변조 신호의 스펙트럼 보다 3~10배 크다는 것을 고려하면 전송 거리는 10km이하로 감소한다. 이는 10Gb/s급 이상의 광통신 시스템에서는 색 분산의 영향을 보상해 주지 않으면 장거리 전송이 불가능하다는 것을 의미하게 된다. 색 분산을 보상해 주는 가장 근본적인 방법은 분산 전이 광섬유를 사용하는 것이다. 1,550nm

부근에서 색 분산이 약  $\pm 2\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$  정도로 최소값을 갖는 분산 천이 광섬유(DSF ; Dispersion Shifted Fiber)를 사용하는 것이다. 처핑에 의한 발진 선폭 확대를 방지하기 위해서는 외부 변조기를 이용하여 송신 광원을 변조하는 방식이 있다. 즉 앞에서 언급한  $\text{LiNbO}_3$  Mach-Zehnder(LN-MZ) 간섭계형 변조기나 화합물 반도체 흡수형(EA ; Electro-Absorption) 변조기를 이용하는 방식이다. 외부 변조기를 사용하면 주파수 및 위상 변조가 거의 없이 광세기만 변조할 수 있으므로 레이저의 발진 선폭을 좁은 상태로 유지시킬 수 있다.

1) 10Gb/s 광전송 시스템 구성 및 특성

앞에서 언급한 기술적 사항을 고려하여 현재 우리나라에서 개발 중인 STM-64 10Gb/s SDH 광전송 시스템은 전화 회선으로 약 13만에 달하는 대용량 광전송 시스템이다. 이것은 64개의 STM-1(155Mb/s) 신호를 수용할 수 있는 용량이고 종속 신호로는 STM-1(155.520Mb/s), STM-4(622.080Mb/s), STM-16(2488.320Mb/s) 등을 접속할 수 있다. 2.5Gb/s 시스템과는 다르게 10Gb/s 광전송 시스템에서는 DS3 신호를 종속 신호로 접속하지는 않는다. 10Gb/s 광전송 시스템은 단국 서브시스템, 광중계기 서브시스템, 분기 결합(ADM) 서브시스템 및 운용관리(TESO-S) 서브시스템 등으로 구성된다. 광단국에 대한 운용관리는 TMN(Telecommunication Management Network)을 통해 운용관리 서브시스템(TESO-S)에 의해 수행된다. 그리고 중계 기능으로는 기존의 광전송 시스템에서 채택하고 있는 3R(regenerating, retiming, and reshaping) 방식 중계 기능 대신에 순수한 광신호를 증폭하여 중계하는 광증폭기 장치만을 사용한다는 것이다. 분기 결합 서브시스템은 2.5Gb/s 장치에서와 마찬가지로 사용자가 그 목적에 맞추어 선형, 환형, 허브형으로 구성하여 사용할 수 있다.

10Gb/s 광전송 시스템 기술적 해결 사항을 고려하여 선형 구조인 10Gb/s 광전송 시스템의 구성을 예시하면 (그림 1)과 같고, 이를 위한 장치의 주요 특성은 <표 2>과 같으며, 앞에서 언급한 것처



<그림 1> 10G광전송 시스템 구성(선형구조)

<표 2> 10Gb/s 광전송 시스템의 주요 특성

항 목	특 성
전송 신호	STM-64(9.95328Gb/s)
종속 신호	STM-1, STM-4 및 STM-16
구성 형태	단국, 선형 ADM, BLS/2
사용 파장(STM-64)	1530-1560nm
종속 신호 접속부 사용 파장	1550/1310nm
광증폭기	전송 거리에 따라 사용
중계기	광증폭기 사용

럼 LD를 직접 변조하면 처핑 등에 의해 중계 거리가 제한 되므로, 짧은 거리는 LD를 직접 변조를 이용하여 경제성 있게 구성할 수 있도록 하고, 전송 거리가 긴 경우(40km 이상) 송신측에서 외부 변조기와 광전력 증폭기를, 그리고 수신측에서 광전치 증폭기를 각각 사용하게 된다. 그리고 광증폭기 중계기를 사용하면 중계기 간격을 120km까지 연장할 수 있다. 따라서 장거리의 중계 거리가 필요한 경우는 광송신기의 간접 변조와 광전력 광증폭기나 광전치 증폭기를 이용하거나 광중계기를 이용하여 중계 거리를 선택할 수 있도록 고려한 것이다.

2) 다중화기

10Gb/s 광전송 시스템의 다중화부는 기본적으로 2.5Gb/s 광전송 시스템과 동일한 SDH 표준 안을 채택하고 있으므로 논리적인 구조는 동일하나

수용하는 종속 신호 종류와 내부 신호 처리 속도가 다르다. 10Gb/s 광전송 시스템의 다중화부에서 처리하는 기능은 STM-i(i=1,4,16) 종속 신호 정합, STM-1 단위의 신호 경로 제어, AU 포인터 처리, STM-64 신호에 대한 SOH 처리, 종속 신호를 10Gb/s로 다중화/역다중화 기능을 수행한다. 이러한 기능을 수행하는 다중화기는 다시 종속 신호 정합부, 다중화부, 분기 결합부, 역다중화부로 구성된다. 이중 분기 결합부는 STM-64 시스템의 적용 망 형태(단국, 선형 ADM, BLS/2 링)에 따라 종속 신호의 자유로운 분기 결합이 가능하도록 해주는 부분이다. 분기 결합부에서 처리하는 신호의 최소 단위는 STM-1이며, 신호의 형태는 종속 신호가 10Gb/s 로 다중화되는 삽입(add) 신호, 10Gb/s 신호에서 종속 신호로 분리되는 추출(drop) 신호, 신호의 추출이나 삽입 없이 전송되는 통과(through) 신호, BLS/2 루프백(loopback)을 위한 루프백 신호로 구분된다. 분기 결합부에 접속되는 신호 용량은 최대 60Gb/s로 하나의 유니트로 STM-64 시스템에서 요구되는 분기/결합 기능을 모두 처리할 수 없기 때문에 하나의 유니트당 2.5Gb/s의 신호 용량을 처리하도록 구성되어 있다.

3) 광송신기

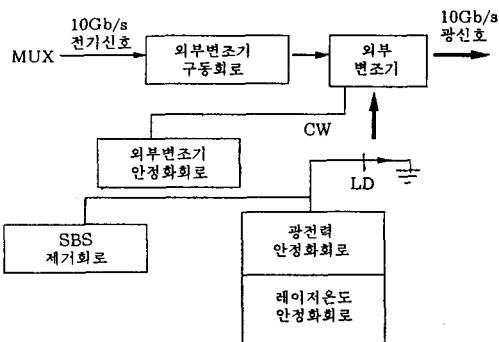
10Gb/s 광전송 시스템에서 광송신기는 직접 변조의 광송신기와 외부 변조 방식에 의한 광송신기의 2 종류를 제공한다. 외부 변조 방식에 의한 광

송신기는 (그림 2)와 같이 DFB-LD(Distributed Feedback-Laser Diode) 모듈, LN-MZ 간섭계형 외부 변조기, 구동 증폭기, 외부 변조기 제어부, LD 모듈 안정화를 위한 제어부, 그리고 경보 발생부로 구성된다. 외부 변조기를 사용하는 경우 환경 변화로 인한 외부 변조기의 열화를 보상해 주기 위한 제어 기능이 추가로 필요하다. 제어부 구현은 수 kHz의 정현파 디더링(dithering) 신호를 외부 변조기 바이어스 입력 단에 인가하여, 오차(error) 신호를 로킹(lock-in) 증폭기를 사용하여 검출한 후 그 차에 해당되는 오프셋(offset) 신호를 외부 변조기의 바이어스 입력 단에 중첩 시키는 방법으로 가능하다. 또한 LD 모듈 제어부에는 신호 전송시 발생하는 SBS(Stimulated Brillouine Scattering)에 의한 잡음을 제거하기 위하여 LD에 약간의 변조 전류를 가하여 발진 선폭을 수백 MHz로 넓혀주는 기능을 포함한다.

4) 광증폭기

10Gb/s 광전송 시스템에서는 광 선로의 손실을 보상하기 위하여 10Gb/s 송수신 단에 광증폭기를 사용하고 또, 중계기로서 순수한 광증폭 기능만 갖는 광증계기를 채택하고 있다. 이것은 앞에서 언급한 대로 기존의 광전송 시스템과는 다른 구조를 갖는 것이다.

광증폭기는 사용 목적에 따라 전력 증폭기와 전치 증폭기로 나뉜다. 광전력 증폭기의 경우 ASE 잡음의 영향이 수신 감도에 거의 무관하며, 제작이 간단하고 감시 제어의 용이한 점 등으로 보편적으로 사용하고 있다. 10Gb/s 장치에서 요구하는 광증폭기의 특성은 <표 3>과 같다. 이러한 광증폭기는 최적화된 에르븀 광섬유를 양방향에서 여기시키는 구조를 갖고 있으며, 여기 광원으로 980nm 반도체 레이저와 1,480nm 반도체 레이저 모두 사용 가능하도록 하였다. 기능적 측면에서 볼 때 광증폭기는 자동 광이득 조절 기능, 입력 신호 손실 경보 기능, 자동 광출력 차단 기능 및 감시/경보 신호 발생 기능을 갖는다. 자동 광이득 조절은 여기용 레이저 중 순방향 여기용으로 사용되는 레이저의 여기 광출력은 일정하게 고정시켜 놓고 역방향 여기용 레이저의 여기광 출력을 조절하여 실현



<그림 2> 외부 변조 방식에 의한 10Gb/s 광송신기 구성도

〈표 3〉 광전력 증폭기 성능 요구 사항

항 목	내 용	비 고
출력	최소 12dBm	
	최대 15dBm	
입력 신호 레벨	최소 -5dBm	
	최대 0dBm	
입력 파장 범위	1,530-1,560nm	
동작 온도 범위	0-50°C	주위 온도
광출력의 편광 의존성	0.5dB 이하	자동 광이득 조절 회로 동작 시
광출력의 온도 의존성	1dB 이하	"
광출력의 입력 파장 의존	1dB 이하	"

하였다. 또한 입력 신호 손실이 발생하였을 때 광전력 증폭기는 신호광이 출력되지 않고 이 보다 세기가 낮게 증폭된 자연 광출력만 출력된다. 이 경우 경보 출력과 함께 자동 출력 조절 기능에 의해 여기용 레이저 바이어스가 증가되는 것을 억제시켜 준다. 자동 광출력 차단 기능은 차단 신호 명령이 입력되면 두 여기용 레이저의 출력을 모두 차단시켜 준다. 감시/경보 신호 발생 기능으로 설정 온도 초과 경보, 저 출력 경보, 고 바이어스 전류 경보 등을 갖고 있다.

광전치 증폭기는 광전송 시스템의 수신기 앞에서 신호 광을 증폭하여 수신기의 수신 감도를 개선하며, 현재까지 10Gb/s 광전송 시스템에서 PIN을 사용하여 얻어진 10Gb/s에서 수신 감도는 -9.7dBm (BER=10<sup>-9</sup>)이나 이 수신 감도는 향후 개선이 될 전망이다. 광증폭기를 이용하여 광신호를 증폭하면, 열 잡음에 의한 한계를 극복하여 광전치 증폭기 전단에서의 수신 감도가 개선된다. 광전치 증폭기 이득이 어느 수준 이상일 때 광전치 증폭기 전단에서의 수신 감도는 광전치 증폭기의 잡음 지수에 의해 결정된다. 광증폭기의 잡음 지수에 영향을 주는 요소로는 입력 결합 손실, SEF(Spontaneous Emission Factor), 광학 필터의 대역폭, 편광 의존 손실 등이 있는데, 이득에 의한 잡음 지수를 최소로 하도록 광전치 증폭기를 설계하여야 한다. 10Gb/s 광전송 시스템에서 광전치 증폭기를 사용한 경우의 수신 감도는 -28.0dBm이다.

(back-to-back, 입력 단 손실 포함, 2<sup>15</sup>-1 PRBS, BER = 10<sup>-9</sup>).

### III. 100Gb/s급 광전송 시스템

기존의 동기식 전송방식에서는 전기적 형태의 종속 신호를 시분할 다중화하는 방법에 의해 전송 용량을 늘려 왔으나, 신호 속도가 10Gb/s를 넘는 경우 광소자 및 전자 소자의 주파수 특성 저하(20Gb/s 이하)로 인해 시스템 구현에 제한을 받게 된다. 이를 해결하기 위한 방법으로 기본 전송 속도를 높이는 동시에 광파장을 다르게 사용하여 채널 수를 늘리는 연구가 시도되어 왔고, 특히 광섬유가 갖고 있는 넓은 대역폭(30THz 이상)을 활용하기 위한 방법으로 광주파수 다중(OFDN; Optical Frequency Division Multiplexing) 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

광주파수 다중 방식은 전기적인 영역에서의 사용되는 주파수 분할 다중 방식과 유사한 개념을 갖고 있다. 주파수 분할 다중 방식에서 각 채널로 들어 오는 신호가 각기 할당된 주파수에 맞추어 다중화 되듯이, 광주파수 다중 방식은 각 채널에 들어 오는 신호가 각기 다른 광주파수에 할당되어 다중화 된다. 이 광주파수 영역에서 다중화가 이루어지므로 각 채널로 들어오는 신호의 비트 율은 광주파

수 각각의 채널의 전송속도와 같게 되지만 다중화되는 광주파수의 수가 증가함에 따라 전체 전송 용량은 증가한다. 이와 같이 다중화되어 전송된 신호는 수신측에서 특정 광주파수를 분리, 추출할 수 있는 광 필터에 의해 선별되며, 선별된 주파수에 실려 있는 신호는 기존 형태의 수신부에 의해 관독된다.

점대점 전송을 목적으로 하는 100Gb/s급 시스템 구현은 WDM 방식으로도 가능하나, 시스템이 망에 적용되는 경우 타 시스템과의 호환성에 문제가 발생하고, WDM 방식으로는 다중화 용량의 확대에 제한이 있어 향후 용량 확장 시 체계적인 확장이 불가능하다. 따라서 간단한 시스템 응용을 위해서는 수 nm 정도의 채널 간격을 갖는 WDM 방식도 고려할 수 있으나 미래의 정보화 사회에 대비하기 위한 초대용량 시스템 구성을 위해서는 가능한 한 채널간 간격을 좁혀 광섬유의 대역폭을 최대한 활용하는 기술 개발이 필요하다. 광주파수 다중 방법에 의한 시스템 구현은 서로 다른 파장에 대한 광 선로의 개별 전파 특성(선형 동작 영역에서)에 의해 가능하며, 다중화 정도는 광원의 파장 범위와 채널 분리 능력에 의해 좌우된다. 최근 넓은 범위에 걸쳐 파장을 가변 시킬 수 있는 파장 가변 레이저의 개발과 함께 채널 간격을 1nm(1550nm 대역에서 120GHz)이하로 다중 시킬 수 있는 광주파수 다중 시스템이 가능하게 되었다. 이러한 시스템과 관련된 기술로는 좁은 주파수 간격을 고려한 개별 광원의 주파수 안정화, 채널 간격 안정화, 고밀도 채널 분리 기능 등과 같은 광신호 처리 기술이 요구되며, 이외에도 채널 수 증가로 초래되는 광섬유 비선형 효과에 의한 잡음을 제거하기 위해 비선형 특성에 관한 연구도 필요하다. 또한 신호가 차지하는 대역폭을 줄일 수 있는 코히어런트(coherent) 기술과 접목하여 다중 채널 수를 늘림으로써 궁극적으로는 테라 비트급 전송 시스템 기술 개발이 가능하게 된다.

광주파수 다중 방식에 의한 시스템 구성은 채널간 주파수 간격을 1nm이하로 잡을 수 있어 광섬유의 활용 대역폭 내에서 충분한 예비 채널의 확보가 가능하며, 절대기준 주파수 개념을 도입하여 모

든 시스템을 광 동기화하고 채널 간격 및 채널 위치를 표준화함으로써 타 시스템과의 호환성을 높일 수 있어 분배망 구조와 전광통신 망에 사용될 수 있는 장점을 갖고 있다.

100Gb/s 급 광전송 기술의 현황은 수십 채널의 광 다중에 대한 실험실에서의 성공 사례 보고되고 있다. 우리나라에서는 93년부터 2001년도에 상용 수준의 시스템을 개발 완료하는 것을 목표로 두고 광파장 다중 전송 기술에 대한 기초연구를 수행하고 있다. 이 절에서는 100Gb/s 급 광전송 기술에서 해결해야 할 기술적 문제점을 설명하고 현재 국내에서 연구 개발하고 있는 100Gb/s 시스템의 기능이 점대점 전송기능, 광주파수 다중 및 역다중기능, OAM 기능 및 다채널 광증폭 기능으로 구성되어 있으므로 여기서는 장치 개발과 관련된 광전송 기술과 시스템 구성에 따른 개요 및 시스템 구성에 대해 기술하고자 한다.

먼저 100Gb/s 급 광주파수 다중 시스템 구현에 필요한 관련 기술은 <표 4>와 같다. 이밖에도 동기화를 위한 절대기준 광주파수 발생 기술과 비선형 효과로 인한 전송 거리 감소를 극복하기 위한 기술도 요구된다.

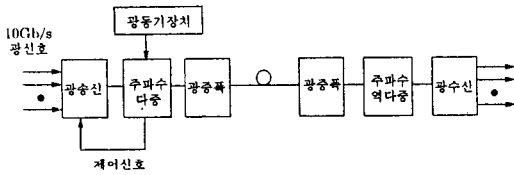
<표 4> 광주파수 다중화를 위한 관련 기술

항 목	주요 기술
광 원	- 광주파수 제어 기술 - 광주파수 안정화 기술 - 광주파수 간격 안정화 기술
다중/역다중	- 협대역 필터/커플러 설계 - 중심 주파수 안정화 기술 - 주파수 간격 안정화 기술
광섬유	- 광섬유 비선형 효과에 의한 누화 해결

1. 100Gb/s 광전송 시스템의 구성 및 특성

100Gb/s 광전송 시스템 구성은 (그림 3)과 같이 송신부, 다중부, 역다중부 및 수신부로 구성되며, 광동기 신호 발생 장치와 보조 기능으로 광 ADM(Add-Drop Multiplexing) 기능 및 OAM





〈그림 3〉 100Gb/s 광전송 시스템 구성도

(Operation Administration & Maintenance) 기능을 갖는다. 시스템 구성을 위한 주요 특성 사항은 〈표 5〉와 같다. 절대기준 광주파수와 채널 간격 설정은 현재 ITU에서 논의 중에 있으므로 추후 다시 고려할 예정이다.

〈표 5〉 100Gb/s 시스템의 주요 특성

항 목	내 용	비 고
채널 파장 범위	1540-1560nm	
광원 선폭	<100MHz	CW
중심 주파수 변위폭	<15MHz	
채널 주파수 간격	100GHz	잠정
채널당 송신 출력	<1mW	비선형효과
채널간 간섭	<20dB	
동작 온도 범위	0-50℃	

### 2. 동기 장치

국간 전송망을 위한 광전송 시스템은 상대 시스템과 호환성을 가져야 하며, 따라서 SDH 또는 SONET과 같은 체계화된 구성을 가져야 한다. 다만, 광 주파수 다중 방식에 의한 전송 시스템은 현재까지의 TDM 방식에 의한 시스템 구성과는 다르므로 새로운 체계화된 시스템 구성이 필요하다. 이러한 점에서 볼 때 두 가지 측면에서 다음과 같은 절대기준 광주파수의 도입이 필요하다. 첫째는 반도체 레이저에서 나오는 불안정한 빛을 안정화시키기 위해 어떤 상위의 안정화된 빛에 로킹시키는 개념이 필요하며, 둘째로는 표준화 차원에서 시스템이 위치한 장소에 구애 받지 않고 같은 주파수를 얻을 수 있어야 한다. 즉, 다중에 관계되는 임의의 특정 채널을 기준 신호에 일치시킴으로써 다른 채널들의

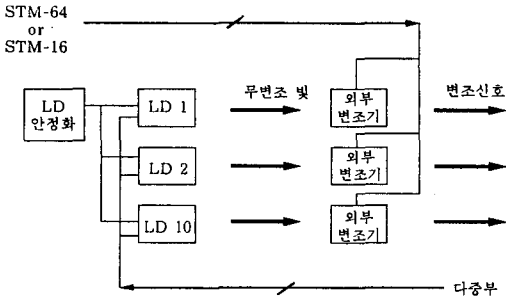
위치가 정의될 수 있는 동기화 개념이 필요하다. 이는 광 삽입 추출(add-drop) 기능이나 타 시스템과의 신호 후회(routing)시 중요한 의미를 갖는다.

절대기준 광주파수를 발생시키는 방법으로는 여러 가지가 있을 수 있다. 즉 크립톤(Krypton) 가스를 이용하여 opto-galvanic 방법으로 발생시키거나 또는 HCN이나  $^{13}C^2H_2$ 를 이용하여 분자 또는 원자 개스의 빛에 대한 흡수 현상을 이용하는 방식이 있다. 현재 ITU에서는 광과장/주파수 다중 시스템의 채널 표준화를 위해 이 문제가 현안으로 다루어 지고 있으나, 100Gb/s 광전송 시스템에서는 분산 전이 광섬유의 영분산 값(1,550nm)에 가까운 과장(1,549nm)을 보이는  $^{13}C^2H_2$ 를 선정하였고 이러한 광동기 장치로서는 대략 0.5~16MHz 정도의 안정도를 얻을 수 있다.

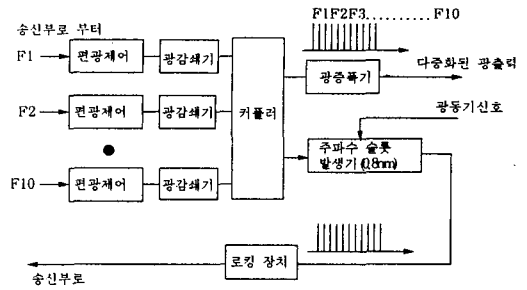
### 3. 100Gb/s 송수신부

100Gb/s급 전송 시스템의 송신부는 (그림 4)와 같이 구성된다. 다채널 전송을 위한 송신부는 신호 변조 외에 광원의 중심 파장을 이동시켜 줄 수 있어야 한다. 다채널 광원으로는 1,550nm 에서 동작하는 DFB-LD를 사용하며, 보드에 실장 되기 전에 주어진 채널 주파수 슬롯과 거의 일치하는 중심 파장을 갖는 레이저가 선정된다. 각 레이저는 광주파수 다중화되기 전에 온도와 바이어스 전류를 조정하여 개별적으로 안정화된다. 100Gb/s 시스템에 사용된 DFB-LD 의 경우 전류 변화에 대한 과장(또는 주파수)변위는 대략 -330MHz/mA 정도나, 반도체 레이저의 경우 최대 변화시킬 수 있는 과장 범위는 대략 10-15nm 이므로 바이어스 전류만으로 중심 파장을 정해진 채널 파장으로 이동시키는 것이 가능하다.

광신호 변조는 직접 변조 방식과 외부 변조 방식 둘 다 가능하나 채널 다중을 위해 레이저의 중심 파장의 제어가 불가피하므로 신호 변조와 독립적으로 다룰 수 있는 외부 변조 방식이 적합하다. 외부 변조 방식은 레이저에 dc 바이어스 전류를 인가하여 일정한 과장(또는 주파수)을 갖는 빛을 발생시키고 이 빛을 외부 변조기에 통과시켜 외부에서 걸어 준 신호 전압에 의해 변조시키는 방법으로 최



〈그림 4〉 100Gb/s광송신기 구성도



〈그림 5〉 100Gb/s다중부 구성도

근 InP를 이용한 M-Z(Mach-Zehnder)형이나 E-A(Electro-Absorption)형 변조기를 DFB-LD와 함께 집적화 시킨 광원 모듈이 단일 칩으로 개발되고 있어 광주파수 송신용으로 앞으로 사용될 전망이다.

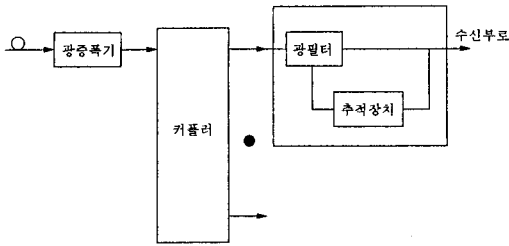
광전송에 사용되는 외부 변조기에 대한 기본적인 요구 사항은 고주파 대역폭, 낮은 동작 전압, 소광비(extinction ratio), 낮은 삽입 손실과 낮은 처평을 들 수 있다. 최근 개발된 외부 변조기는 2 내지 6V의 전압으로 10-25dB 소광비를 얻을 수 있으며 10-40GHz의 고속 변조도 가능하고, 5nm 내에서 동작 파장에 무관한 변조 특성을 보이고 있어 10Gb/s용 변조기로 사용 가능하다. 수신부는 10Gb/s 광전송 시스템에서 사용되는 직접 검출(direct detection)방식을 사용한다.

#### 4. 다중 및 역다중부

100Gb/s 시스템은 광주파수 다중 방식을 택하고 있으며, 다중 및 역다중부 구성은 채널간격이 등 간격이나 비등 간격이나에 따라 달라질 수 있다. 비등 간격으로 채널을 설정하는 경우 4광파 혼합 효과로 인한 잡음을 배제할 수 있어 시스템 구성이 단순해지는 장점이 있으나, 표준화 차원에서 볼 때 타 장치와의 접속 시 문제가 된다. 현재 100Gb/s 시스템은 등 간격 채널을 고려하고 있으며 상용하는 다중부 구성도는 (그림 5)와 같이 결합부, 주파수 슬롯 발생부, 로킹 시스템 등으로 구성된다. 결합부는 광섬유 커플러를 사용하며, 주파수 슬롯 발생기는 광섬유 필터의 공진 특성을 이용

하며, 안정된 주파수 슬롯 발생을 위해 광섬유 필터의 안정화는 필요하다. 일반적으로 광섬유 필터를 안정화 시키기 위해 사용되는 방법으로 공진기를 절대기준 광주파수에 로킹시키는 방법이 있다. 로킹시스템은 각 광원의 중심 주파수를 할당된 주파수 슬롯에 일치시키기 위한 기능을 갖고 있다.

주파수 슬롯(또는 채널간격, 여기서는 공진기의 공진 주파수 간의 차=free spectral range)의 설정은 인가되는 신호가 차지하는 주파수 대역과 채널 분리를 위해 역다중부에서 사용되는 필터의 분해 능력을 고려하여 결정된다. 역다중부에 단일 파브리-페로(Fabry-Perot) 필터를 사용하는 경우에 채널 간격은  $f_c \geq 6.4B$  ( $f_c$ 는 채널 간격, B는 비트율)이어야 하며, vernier tandem 방식으로 사용되는 경우  $f_c \geq 3.0B$ 가 요구된다. 다채널 전송에 따르는 누화(crosstalk)를 고려하여 본 시스템에서는 채널 간격을 대략 신호가 차지하는 대역폭의 10배인 100GHz로 설정하였다. 정해진 간격으로 설정된 다중부의 채널은 타 시스템과의 호환성 문제로 서로 일치된 주파수 값을 가져야 하며, 따라서 각 시스템의 특정 채널 주파수는 광동기 장치에서 발생하는 절대기준 광주파수와 일치되어야 한다. 동기화 된 채널들은 역다중부에서 채널 중심 파장에 맞추어 미리 조정되어 있는 광필터에 의해 선별 추적되므로 각 노드에 사용되는 역다중부 구성을 동일하게 할 수 있을 뿐만 아니라, 동기화하는 과정에서 채널의 주파수는 절대기준 주파수의 안정도(10MHz 이하)내에 유지되므로 동시에 안정도가 높은 채널 슬롯을 얻을 수 있다. 다채널 광



(그림 6) 100Gb/s역다중부 구성도

원의 중심 파장을 기준 공진기에서 발생된 주파수 슬롯에 정렬시키기 위한 로킹 시스템은 디더링(dithering)에 의한 오차 신호 검출 방법을 사용하여 구현 시켰다. 현재 이러한 기술을 사용하여 광원의 중심 파장의 변동을 정해진 주파수 슬롯에 30MHz 내로 유지시킬 수 있다.

역다중부의 중요한 역할은 다중화 되어 들어온 채널의 분리 및 추출에 있으며, 이는 필터의 분해능과 안정성에 의해 크게 좌우된다. 현재 100Gb/s급 시스템에서는 광섬유 필터를 사용하여 구현하고 있으며, 그 구성은 (그림 6)과 같다. 채널 분리를 위한 분기 시 신호 출력이 저하되는 것을 보상하기 위하여 광증폭기를 사용하여 신호를 증폭시켜 준다. 증폭된 신호는 채널 수 만큼 분기되며, 각각의 출력은 채널 분리를 위한 광필터에 입력된다. 채널이 대략 100GHz 간격으로 배열된 주파수 다중 시스템의 경우 누화 없이 원하는 채널을 적절히 분리하기 위해서는 고 분해능의 필터가 요구된다. 필터의 분해능을 높이기 위한 방법으로 2개의 필터를 버니어(vernier)로 연결하여 사용하여, 대략 3000 정도의 피네스(F; Finesse)를 얻을 수 있으나, 2개의 필터를 동시에 변화시켜야 하는 작동상의 어려움이 있다. 세부적인 튜닝은 PZT (piezo-electric transducer)를 이용하여 얻어진다. 파브리-페로 필터의 3dB 대역폭  $f_{FP}$ 는  $f_{FP} = FS \cdot R/F$  (FSR은 공진기의 길이에 의해  $c/(2nL)$ 로 결정되며  $L$ 은 공진기 길이,  $n$ 은 매질의 굴절률)에서 얻어지므로 필터 선정 시 전체 채널이 차지하는 대역폭을 고려하여 필터의 FSR은 이 값보다 커야 하며,  $f_{FP}$ 는 신호가 차지하는 대역폭 B에 의

해 결정되므로 채널 분리에 필요한 필터의 F를 결정할 수 있다. 송신광 주파수와 필터의 최대 투과 주파수의 드리프트(drift) 때문에 고밀도 광다중 시스템에서는 정확한 광채널 추적과 선별 기능이 요구된다.

100Gb/s 시스템의 분기결합 기능 구현은 동기식 전송 시스템에 비해 광주파수를 자유로이 할당 및 추출할 수 있다는 점에서 쉽게 ADM 기능을 구현할 수 있다.

### 5. 다채널 광증폭 기능

광주파수 다중 시스템에서 사용되는 광증폭은 다채널을 동시에 균등한 이득으로 증폭시킬 수 있는 기능을 가져야 한다. 광증폭기로는 SOA(Semiconductor Optical Amplifier)와 EDFA(Erbium-doped Fiber Amplifier)가 있으며, SOA는 OEIC(Opto-Electronic Integrated Circuits)화와 소형화가 가능하다는 이점이 있으나, 신호 왜곡을 초래하고 특히 다채널 전송 시 증폭기 자체 내의 4광파 혼합 효과에 의해 누화를 발생시킨다. 따라서 1,530-1,560nm 영역에서 다채널 전송을 위한 전력 및 증계 증폭기로서 EDFA가 SOA보다 더 적합하다.

다채널 전송 시 사용되는 광증폭기의 또 다른 주요 특성으로 균등한 대역 이득을 들 수 있는데, EDFA는 SOA에 비해 비교적 평탄한 대역 특성을 갖고 있고 특히 EDFA내에 삽입된 광필터를 적절히 설계하여 저 잡음 및 고출력과 함께 평탄한 이득 특성을 얻을 수 있으므로 다채널 전송에 유리하다. 그러나, 출력 레벨, 온도 등에 대한 주의 깊은 조절기능이 없는 한 시스템에서 요구되는 넓은 범위의 대역폭에 걸친 평탄한 이득 특성을 얻기 힘들므로 정밀한 제어 기능이 부가되어야 한다.

EDFA를 사용하는 다채널 전송 시 증폭 특성에 제한을 주는 요인은 이득 포화와 누화이며, EDFA가 이득 포화 영역에서 동작될 때 이득 불균형 현상이 초래된다. 즉, 3준위계로 동작하는 EDFA에서 바닥상태(ground state) 흡수 파장이 단파장쪽에서 더 높아 이득 피크 치가 장파장쪽으로 이동하기 때문에 발생되며, 이 현상을 피하기

위해 입력 신호의 크기를 낮추어 이득 포화 아래에서 동작시켜야 한다.

#### 참 고 문 헌

#### IV. 결 어

초고속 정보통신망에 사용될 초고속 광전송시스템인 2.5Gb/s 광전송 시스템과 10Gb/s 광전송 시스템 특성과 개발 현황에 대해 살펴보았다. 그리고 100Gb/s 광전송 시스템의 특성과 요구 사항, 그리고 향후 고려 사항에 대하여도 살펴보았다. 10Gb/s 시스템 경우 외부 변조 필요성과 전송 거리를 높이기 위해 수신 감도를 높일 수 있는 시스템 구성과 특성, 광증폭기 등을 다루었다. 현재 10Gb/s 광전송 시스템은 1차 시작품 개발이 완료 단계에 있으며 96년도에 개발 제품이 개발이 되어 97년도 말 혹은 98년 초에는 현장에 사용될 수 있을 전망이다. 100Gb/s 광전송 시스템은 광주파수 안정화, 절대기준 광주파수 개념을 비롯하여 다채널 광주파수 다중화와 관련된 핵심 기술 개발에 전념하고 있으며 특히 국내 표준화가 안되어 있는 다채널 전송과 관련된 표준화 방향에 대해 연구하고 있다. 이러한 100Gb/s 광전송 시스템에 관련 기술은 향후 Tera b/s 전송을 위한 기반 기술에 해당된다.

- [1] B. Glance et al., "Densely spaced FDM coherent star network with optical signals confined to equally spaced frequencies," *J. Lightwave Technol.*, vol. 6, pp. 1170-1781, 1988.
- [2] N. Takachio et al., "10Gb/s-10ch optical FDM transmission experiment over 300km using in-line optical fiber amplifiers and dispersion-shifted fiber," in *Proc. ECOC'93*, pp. 1-4, 1993.
- [3] S. Sudo et al., "Frequency Stabilization of 1.55m DFB Laser Diode Using Vibrational-Rotational Absorption of  $^{13}\text{C}^{2}\text{H}_2$  Molecules," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 1, no. 11, pp. 392-394, 1989.
- [4] 이만섭, 이병기, 초고속 정보통신망에서의 국간 전송 기술, 정보통신, 제11권 12호, 47-58, 12. 1994
- [5] 이만섭, 박창수, 최준균 광전송 장치 개발, 정보통신, 제12권 4호, 89-104, 4. 1995

## 저 자 소 개



朴 昌 洙

1955年 1月 1日生  
 1979년 2월 한양대학교 전자공학과졸(학사)  
 1981년 2월 서울대학교 대학원졸(석사)  
 1990년 12월 Texas A&M Univ. 전기전자과졸(박사)

1982年 7월 한국전자통신연구소 입소  
 1893년 3월 한국전자통신연구소 책임연구원  
 1993년 4월 광파통신연구실장

주관심분야: 광통신기술, 전송시스템기술, 광전달망기술



李 晚 燮

1952年 12月 25日生  
 1976年 2월 부산대학교 전자공학과졸(학사)  
 1978년 2월 부산대학교 대학원졸(석사)  
 1991년 2월 KAIST 전기 및 전자공학과졸(박사)

1979年 6월 한국전자통신연구소 입소  
 1991년 3월 한국전자통신연구소 책임연구원  
 1989년 1월~1993년 3월 평가입자연구실장  
 1993년 4월 광대역전송연구부장

주관심분야: 광통신기술, 국전송시스템기술, 평가입자 전송기술