

《主 題》

초대용량 광전송 기술

주 무 정 · 심 창 섭
(한국전자통신연구소 광통신연구실)

■ 차 례 ■

- | | |
|--------------------|-------------------|
| I. 서 론 | 나. 광증폭 기술 |
| II. 광통신 기술의 발전 방향 | 다. 광주파수 분할 다중화 기술 |
| 가. 전송 기술 | 라. 코히런트 광전송 |
| 나. 시스템 기술 | 마. 비선형 광전송 |
| III. 광통신 핵심 기술 | IV. 결 론 |
| 가. 광강도 변조/직접 검파 기술 | |

要 約

본고에서는 정보화 사회에서의 핵심 하부구조인 초고속 대용량 통신망 구축에 필요한 광전송 기술 및 시스템 기술의 연구개발 동향을 조사하고 상호 비교하였으며, 현재 한국전자통신연구소 광통신연구실에서 수행중인 2.5 Gbps 광전송 장치 개발 및 광증폭 기술 개발 현황과 실험결과에 대하여 기술하였다.

I. 서 론

광통신 기술의 발전으로 현재 대부분의 국내 기간 전송로는 이미 광케이블화 되어있으며, 고속 대용량 정보를 경제적으로 전송할 수 있게 됨에 따라, 음성통신에 주력해온 기존의 통신기술은 음성, 데이터 및 영상 등의 다양한 정보를 효율적으로 전달할수 있는 고속의 광대역 종합정보통신망(BISDN)을 목표로 발전되고 있다.

광대역 종합정보통신망의 목표는 점차 다양화, 개인화를 지향하는 사용자의 정보통신 서비스 요구를 충족시키는데에 있으며, 이를 위하여 음성, 저속 데이터, 정지영상 등 협대역 서비스 뿐만 아니라 고속 데이터, 고품질의 동영상과 같은 다양한 광대역 서비스를 단일 통신망에서 경제적이고 효율적으로 수용, 처

리할 수 있어야 한다.

기존의 음성 서비스는 PCM 64 Kbps의 전송속도임에 비하여 광대역 종합정보통신망은 약 2000배인 155 Mbps의 가입자 전송속도가 필요하다. 이를 소요되는 전송속도면에서 비교하면, 비동기식 음성신호 전송용 44.736 Mbps DS3 신호에 PCM 음성회선 672회선을 수용할 수 있음에 비하여 10 Gbps급 STM-64 동기식 신호에는 155Mbps ATM(asynchronous transfer mode)64회선 만을 수용할 수 있기때문에, 이러한 광대역 가입자를 수용 전송하기 위해서는 초고속 전송 장치의 개발이 필수적이다.

새로운 통신 수요의 증가와 신기술의 경제성 확보는 급속한 기술 발전을 가능케하는 견인차 역할을 하고 있다. 우선 광기술의 급속한 발전은 가입자망의 광케이블화에 의한 광가입자망 구축이 기술적으로 가

능할 뿐 아니라 경제적으로도 우위에 서게 되었으며, 실리콘 및 GaAs를 사용한 고속 소자기술의 발전으로 수 Gbps 이상의 신호처리 및 ATM 기술의 도입으로 고속 교환이 실현 가능하게 되었다는 점 등을 들 수 있다.

이러한 기술 발전은 전송, 교환 및 소자기술의 혁신에 의해 뒷받침되고 있으며, 광대역 서비스 제공을 위한 하부구조 구축의 핵심인 10 Gbps급 고속 광전송 및 광파통신 기술, ATM교환기 등의 개발이 전진 각국에서 앞다투어 추진되고 있다.

또한 컴퓨터 및 정보통신 단말기의 발전에 따라 기능이 통합된 일련의 시스템에 대해서 문자, 문서, 그림, 음성, 영상 등 여러 미디어가 서로 연계된 형태로 동시에 표현될 수 있고, 사용자에게 정보의 선택권이 있으며, 기계-사용자간의 정보전달과 사용자-사용자간의 실시간 통신기능을 갖는 BISDN 단말기로 가까운 장래에 멀티미디어 통신서비스를 제공받게 될 것이다.

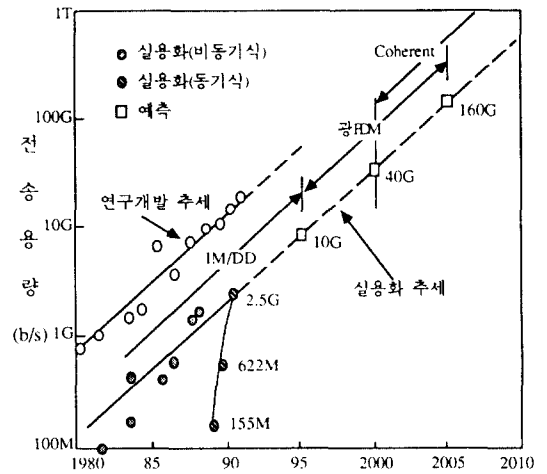
따라서 앞으로의 통신기술은 통신망의 디지털화, 컴퓨터 기술의 향상, 광기술의 적용 범위 확대, 반도체 기술의 발전 등 기반기술의 성장에 따라 급속히 발전할 것으로 보인다.

II. 광통신 기술의 발전 방향

가. 전송 기술

(그림 1)은 광전송 시스템이 대용량화 되고 있는 추세를 나타낸 것으로, 전송용량은 매 5년당 4배로 증가하는 추세에 있으며, 전송 거리도 급격히 늘어나고 있다. 앞으로 이러한 현상은 더욱 가속화 될 것으로 보인다.

광전송 기술에서의 용량 증대는 전송 속도의 증가 및 동시에 전송하는 채널 수의 확장에 의해 가능하다. 기존의 광통신 방식은 광원의 출력 변조에 의한 송신과 광신호의 세기 변화를 직접 검출하는 수신 형태의 강도변조/직접검파(IM/DD) 방식으로, 광/전 변환 및 전/광 변환에 의존하는 전기적 재생형 중계 방식을 기본으로 하며, 대부분의 전송 시스템이 디지털 신호를 취급하기 때문에 광통신 시스템에서도 광의 on/off 변조에 의한 디지털 신호를 전송하고, 전송 용량의 증대는 시분할 다중화(time-domain multiplexing: TDM) 기술을 이용한 변조속도(bit-rate)의 고속화로 달성하고 있다.



(그림 1) 광전송 시스템의 발전 추세

현재 2.488 Gbps의 전송 속도를 갖는 동기식 시스템이 상용화되기 시작하고 있으며, 이 시스템의 다음 계위(hierarchy)인 10Gbps급 전송 시스템은 실험실내 시범 수준에 있어, 95년경에는 실용화 될 수 있을 것으로 예상된다. 2000년대 초까지는 이러한 TDM-IM/DD 방식이 광전송 시장의 중심위치를 고수할 것으로 보인다. 대부분의 전문가들은 그 이상의 전송 속도에서는 기존 광통신 기술의 단순 확장(전송속도 증가)에 의한 전송용량 증대가 곤란한 것으로 보고 있다. 더욱이, 신호의 고속화에 수반되는 주변 전자회로의 급격한 가격 상승은 이 이상의 고속화가 경제성을 잃게 하는 주요 원인이다.

수신감도 및 전송 손실에 의한 제한은 광섬유 증폭기가 등장함으로써 해결 가능케 되었으나, 전송 속도의 증가를 위해서는 궁극적으로 비선형 광전송 방식인 soliton 광전송 기술이 도입되어야 할 것이다.

TDM 방식 이외의 채널 수 확장에 의한 전송용량 증대는 광파통신 기술의 도입으로 가능하다. IM/DD 방식은 carrier 광파의 위상에 정보를 실지 못하는 non-coherent 방식임에 비하여, 광파통신 방식은 매우 좁은 스펙트럼 폭을 갖는 carrier 광파를 사용하여 광주파수 및 위상에 정보를 실는 coherent 방식으로서 기존의 IM/DD 방식에비하여 광통신의 광대역 특성을 십분 활용할 수 있는 장점이 있으며, 광파의 높은 주파수대(200,000 GHz)에서 주파수 분할 다중화(광 FDM) 함으로써 전송 및 교환 용량의 획기적 증대가

(1,000배 이상) 가능하여, TDM 방식에서의 고속화의 한계를 극복할 수 있는 차세대 대용량 광통신 기술로 주목되고 있다.

광증폭 기술은 전/광 변환에 의한 증계방식에 비하여 증계기의 구조를 단폭 단순화 시킴으로써 기존 광통신 시스템의 경제성 및 신뢰성 향상과 아울러, 광파통신 및 비선형 광통신 기술의 실용화에 핵심으로 등장한 공통 기반기술이다. 초기에는 반도체 레이저 증폭기를 사용한 광증폭 연구가 중심을 이루었으나, 증폭 특성이 편광 상태에 따라 다르고 다채널 증폭시 채널간 누화(crosstalk)가 크다는 점과 광섬유 접속 및 packaging 등의 문제로 실용화 되지 못하던 중, Erbium이 함유(doping)된 광섬유(Er-fiber)가 개발되어 이러한 문제를 일기에 해결함에 따라, 광섬유 증폭기의 실용화를 목전에 두고 있으며, AT&T와 NTT가 계획하고 있는 태평양 구간 장거리 해저광통신 시스템에 증계기로 사용될 예정이다.

나. 시스템 기술

기존의 비동기식 광전송 장치는 애널로그 교환과 디지털 전송로가 통신망의 대부분을 점유하던 때, 즉, 디지털 신호를 형성하는 데 이용되는 클럭들이 독립적으로 운용되던 1960년대 이후부터 현재까지 세계적으로 주로 적용되어온 방식으로서 점대점간(PTP: Point To Point)대용량 신호 반송에 적합한 방식이다.

이는 상위 계위로의 다중화시에 다중화될 입력 신호의 클럭차간 보상을 위해서 각 다중계위 마다 스템핑 비트(Stuffing bit)가 추가되며, 이로 인해 다중 레벨로의 임의저속신호의 직접적인 액세스가 불가능하고, 다중화는 항상 PDH(Plesiochronous Digital Hierarchy) 신호계위에 따라 단계적으로 이루어져야 한다.

또한 정보통신 용량의 급증으로 전송망의 구성이 복잡하게 전개됨에 따라 망관리의 지능화가 크게 요구되고 있으나 기존 PDH 신호상에는 여기에 필요한 오버헤드(overhead)의 확보가 거의 불가능한 상태이다. 이러한 이유 때문에 기존 광/무선 전송시스템에서는 전송구간에 필요한 최소한의 오버헤드를 독자적으로 설정하여 이용함으로써 Multi-vendor망의 구성에 커다란 장애가 되었다.

이러한 불편한 점을 해결하기 위하여 미국의 Bellcore에서 제안한 SONET(50.688Mbps), AT&T의 METROBUS(46.432Mbps) 구조의 동기식 전송방식

을 대상으로 표준화가 논의되기 시작하여 이를 기본으로 '86년도 부터 CCITT 표준화 작업이 시작되었다. 이 작업의 결과로 '88년도에는 기존의 일본식, 미국식, 유럽식 비동기 전송계위를 모두 수용할 수 있으며 향후 BISDN으로의 진화까지를 고려한 동기식 NNI(network node interface)가 간선(trunk)용 단말 국제 표준안으로 채택되었다.

동기식 다중은 서로 동기된 입력 종속신호들을 비트 또는 바이트 단위로 인터리빙(interleaving)하여 고속 다중 레벨상의 고정된 위치에 순차적으로(동기적으로) 배열함으로써 성취된다.

SDH(Synchronous Digital Hierarchy)기본 전송방식은 광대역 광섬유 전송을 바탕으로 하면서 CCITT 권고 G.703에 규정된 PDH 신호의 수용, 전송 네트워크에 필수적인 다중신호내의 임의 저속신호에 대한 직접 액세스, 그리고 전송망의 지능화 실현에 필요한 충분한 양의 오버헤드 채널의 확보등을 바탕으로 함으로서 기존망과의 호환성, 향후 전송기술의 발전성 등이 모두 고려되고 있다. <표 1>은 기존 비동기식 다중 방식 대 동기식 다중방식의 차이를 비교한 것이다.

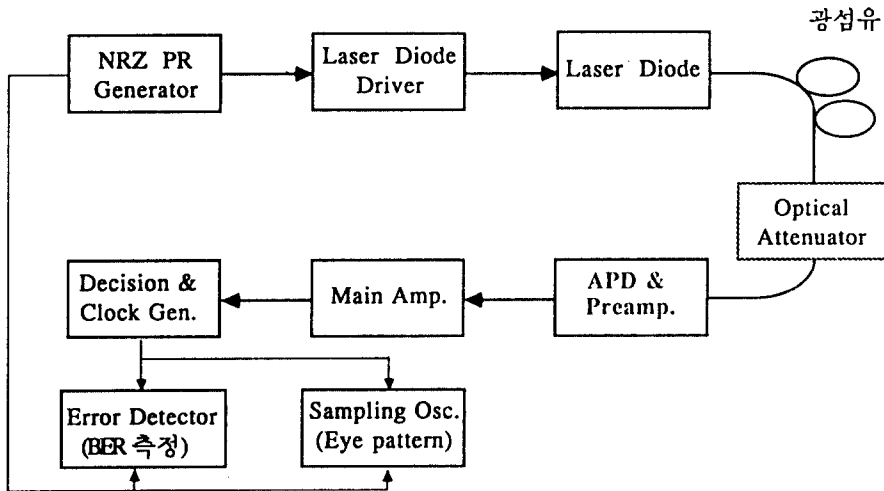
SDH 전송로는 크게 2가지의 전달형태 즉, 기존 시분할다중(TDM)과 호환성을 갖는 STM(Synchronous Transfer Mode)과 준 패킷형 셀(Cell) 구조를 갖는 ATM(Asynchronous Transfer Mode) 정보를 수용할 수 있다. 여기서 STM은 125 μ s 주기의 정방형 바이트 단위 프레임내에 미리 정의된 채널이나 타임 슬롯을 할당하는 TDM에 기본을 두며, ATM은 53 octet의 고정된 길이로 이루어진 cell단위로 전달하는 패킷 다중방식에 기본을 두는 전달형태이다. 따라서 SDH는 기존 PDH망으로 부터 SDH망으로, 그리고 ATM기본 B-ISDN으로의 점진적, 경제적인 진화를 허락하는 가교 역할을 담당할 수 있을 것이다.¹¹

III. 광통신 핵심 기술

가. 광강도 변조/ 직접 검파 기술

선진국에서는 현재 565 Mbps~1.7 Gbps급 광강도 변조/ 직접 검파 방식의 시분할 다중화 시스템이 상용화되어 운용되고 있으며, 91년도에 2.5 Gbps급 시스템이 상용화되었다.(Canada, NT) 한국전자통신연구원 광통신연구실에서는 94년도 상용화를 목표로 2.5 Gbps 시스템을 개발중에 있으며, 92년도 상반기에 1310 nm 파장에서 2.5Gbps 광신호의 40 Km 전송 실

구분	비동기식 다중(기존)	동기식 다중(향후)
기본 원리	<p>속도가 약간 다른 전송정보들을 Package화(DSn)하여 이들을 두 지점간에 전달</p>	<p>전송정보들을 가상 컨테이너(MCh STM-N)에 넣어서 컨테이너단위로 다지점 전달</p>
다중 구조	<ul style="list-style-type: none"> - 다중계층별 단계적인 다중 - Package의 완전 해체를 통한 신호분리 	<ul style="list-style-type: none"> - 다중계층에 관계없이 한단계 다중 - 임의 컨테이너에 대한 다중레벨상의 가시성
망구성	<p>교환국</p> <p>FULL MESH</p>	<p>교환국</p> <p>STAR/RINGMESH</p>
전송망 OAM	수동/반자동의 운용 및 유지보수	<ul style="list-style-type: none"> - 전송로 장애시 Network Protection 용이 - 전국적인 통신관리망(TMN)의 기간 전송로
망의 진화성	<ul style="list-style-type: none"> - 139M 이상 속도에 대한 국제 표준 부재 - 다중장치와 광단국 분리 존재 	<ul style="list-style-type: none"> - 초고속 다중(Gb/s급) 화의 용이 - 다중기능과 광전송기능의 통합 - 광대역 ISDN의 Backbone Network
국제 계층 표준	<ul style="list-style-type: none"> - 북미식 계층(1544M 기본) - 유럽식 계층(2048M 기본) 	국제 단일 표준(15552M 기본)



(그림 2) 2.5Gbps 광신호의 전송 실험장치 개략도

표 2. 2.5Gbps 광전송 시스템 제원

항 목		내 용	
전 송 용 량		PCM 음성급 32,256회선 (DS3 48회선용량)	
절 체 비	종 속 신 호	DS3	1+1
		STM-M 또는 ATM	1+1
	라 인 신 호	1+1	
전송망 소요기능		단국, 중계기, ADM	
종 속 신 호		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)
		운 용 파 장	1.31 μ m, 1.55 μ m
감시제어 외부접속		T M N	

험에 성공하였다. (그림 2)는 2.5 Gbps 전송 실험장치의 개략도이다.

2.5 Gbps 광전송 시스템을 이용하여 하나의 광섬유로 전송할 수 있는 64Kbps PCM 음성회선은 32,256회선이 되며, 시스템의 제원은 <표 2>와 같다. 2.5 Gbps 동기식 전송망은 단국, 중계기, 삽입/추출 중계국(ADM)으로 구성될 수 있으며 향후 개발 예정인 BDCS(broadband digital cross connect system)와 연동하여 환(Ring)형, 스타(Star)형, 메쉬(Mesh)형 등, 보다 효율적인 전송망으로 구축 될 수 있다.

동기식 광전송 방식 상위 계위인 10 Gbps급 시스템은 95년경 이후에 시장에 등장할 것으로 예상되며, 따라서 현재 사용되는 TDM-IM/DD 방식은 2000년대 초까지 광전송 분야의 중심위치를 고수할 것으로 보인다.

여기서 기대되는 변화 및 신기술과의 접목은 광증폭 기술과 송신광 선폭 축소 기술이다. 광증폭 기술은 시스템의 경제성 제고를 위하여 무중계 장거리 전송에서의 송신출력 증폭기(booster amp) 및 광 전치 증폭기(optical pre-amp)와 장거리 중계전송 시스템의 중계기에 우선 사용되기 시작하여, 광가입자망의 보급에 따라 분배증폭기에도 사용될 것으로 예상된다.

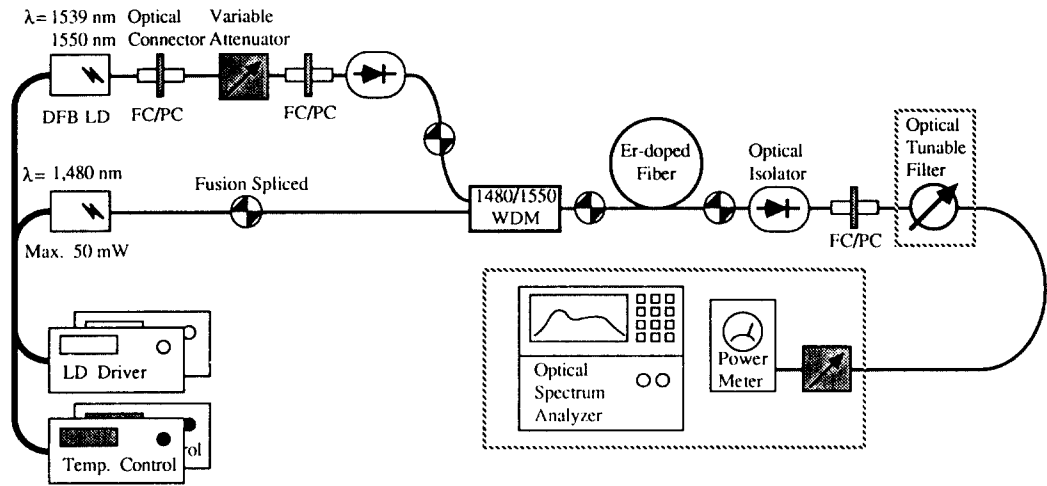
송신광의 선폭 축소 기술은 전송 속도의 증대에 따른 전송로에서의 분산 제한 극복에 매우 중요한 문제이며, 특히 기존의 1300 nm 대역 광통신용으로 포설되어있는 광선로에 광증폭 기술을 활용한 1550 nm용 시스템을 운용할 수 있도록 하는 기술이다. 이는 송신

광원으로 사용되는 LD의 특성 개선과 외부 변조기에 의해 가능하며, 광선로를 1550 nm 대역 전용으로 분산선이 광섬유(DSF)를 신규 포설하는 경우에는 LD 직접변조 방식이 10 Gbps급까지 기술적으로 별 문제가 없으나, 기존 1300 nm 대역용 광선로를 활용하고자 하는 경우에는 더욱 엄격한 조건이 요구되기 때문에 LD의 특성을 개선하는데에는 한계가 있으므로 외부 변조기를 사용하는 것이 유일한 대안이다. 이러한 연구는 현재 실험실 수준에서 활발하게 전개되고 있으며, 92년 AT&T의 박용관 등이 EDFA와 외부 변조기를 사용하여 2.5 Gbps 신호를 318 km의 일반 광섬유로 무중계 전송한 바 있다.^[2]

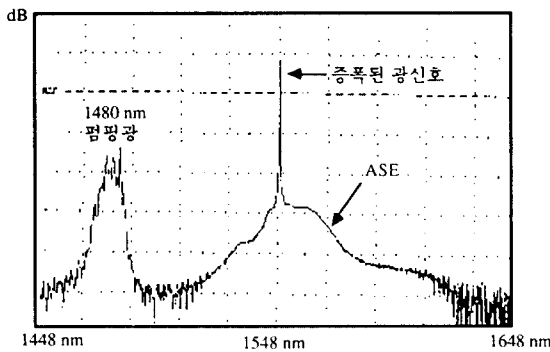
나. 광증폭 기술

미량의 희토류 원소가 doping된 석영계 유리 섬유에 대한 연구는 1960년대 초 C.J. Koester와 E. Snitzer가 neodymium-doped 유리섬유를 flash-pumping한 것으로부터 시작하여, 주로 1060 nm에서의 도파로형 레이저(waveguide laser)에 대한 연구가 진행되었다. 한편, 광통신 분야에서는 광/전 변환없이 직접 광을 증폭시키는 방법의 장점을 활용하기위한 노력으로 레이저 다이오드 구조를 이용한 반도체 광증폭기의 개발이 활발히 진행되었으나, 채널간 누화, 편광 의존성, 잡음 특성, 고출력화의 어려움, 광섬유와의 결합 손실(coupling loss)에 의한 전체 이득의 감소 등으로 실용화에는 미치지 못하고 있었다.

1980년대 초반에는 대부분의 광통신 관련 연구가



(그림 3) Erbium-doped Fiber Amplifier 구조도



(그림 4) 1480 nm 여기광에 의해 발생된 ASE 및 증폭된 1550 nm 파장의 신호광

1300 nm 대역에서 이루어지고 있었으며, 1550 nm의 저손실 영역은 관련 소자의 개발 비효 등으로 특수한 장거리 전송분야에만 한정되어, 일본의 경우 국내용으로는 1300 nm만 사용한다고(장거리 광전송의 필요성이 적으므로) 공식 발표할 정도였다.

1980년대 중반 영국 University of Southampton의 D. Payne 등이 erbium이 doping된 광섬유로 1550 nm 대역에서 광증폭이 가능함을 실증하면서 상황은 역전되었다. Er-doped optical fiber amplifier(EDFA, 혹은 EFA)는 편광에 무관한 높은 증폭율 및 고출력, 채널 간 누화가 없고 낮은 잡음지수 및 전송 속도와 신호

방식에 무관한 특성뿐 아니라, 광선로와의 결합이 손쉽고 1480 nm 혹은 980 nm 레이저 다이오드를 여기 광원으로 사용하여 소형화 할 수 있다는 실용성때문에, 상대적으로 소외되었던 1550 nm 대역을 일약 광통신 기술의 주역으로 밀어올렸다.

(그림 3)은 한국전자통신연구소 광통신연구실에서 제작한 EDFA의 구조이고, (그림 4)는 여기광(1480 nm)과 증폭된 자연방출광(amplified spontaneous emission : ASE) 및 1550 nm 파장의 신호광을 보여주는 측정 결과이다. 이 분야의 최고수준을 살펴보면, 최저 입력신호 40dBm, 최대 이득 40 dB이상, 최대 포화출력 15 dBm에 이르는 한계에 가까운 잡음지수(3.5dB)를 달성하고 있다.¹⁾

연구용 광섬유 증폭기를 생산 판매하는 회사의 수는 92년도 1/4분기에 9개사 25개 모델에 달하고 있으며, 이 중에는 시스템 실장용 모듈 형태의 EDFA도 있다. 대부분의 EDFA는 1480 nm LD를 여기용 광원으로 사용하며, 일부는 980 nm LD 혹은 800 nm LD pumped Nd-YAG 레이저(파장 1060 nm)를 사용하는 것도 있다. 증폭률(gain)이 낮고 저출력인 모델에서는 여기용 광원을 하나만 사용하며, 고이득 고출력 모델에서는 2개의 여기광원을 사용하는 것이 일반적이다.

Er-doped 광섬유는 상용화 되어있으며, 이를 판매하는 회사는 York(영), AT&T(미), Photonics(불),

GPI(소) 등이다. 이를 제작하거나 관련 기술을 보유한 기관 및 업체는 많으나, 특허 및 기타 이유로 광섬유만을 판매하는 곳은 많지않다. 진행중인 관련 연구로는 광섬유 구조의 최적화와 여기광의 파장 및 세기에 따른 Er 농도의 변화, core 직경 차이에 따른 splicing 손실의 감소 방법, Ytterbium 등을 co-doping 하여 여기 효율을 높이는 방법 등이 있다.

여기용 광원으로 사용되는 LD는 1480 nm 및 980 nm LD 모두 상용화 되어있으나 신뢰도 및 출력면에서 1480 nm 쪽이 1-2년 정도 앞서있다. 현재 시판되고 있는 EDFA 모듈의 대다수가 1480 nm LD를 사용하고 있으나, 92년 들어 980 nm LD를 사용하는 EDFA 모듈이 다수 등장하고 있으며, 신뢰성 및 양산성 문제가 해결되면 고효율 및 저잡음 특성으로 인하여 많이 사용될 것으로 예상된다.

EDFA를 시스템에 활용하는 방식에는 송신출력 증대용 booster 증폭기와 수신용 저잡음 전치증폭기 및 증계기, 그리고 분배식 광가입자망용으로 분배손실 보상용 분배증폭기가 있다. 상용화 되어있는 EDFA 모듈의 기본구조는 대동소이하며, 용도 및 제작사별로 사용 부품의 종류 및 수량에 약간씩 차이가 있다. 기본적으로는 desk-top형과 시스템내 실장형으로 구분할 수 있으며, 전자는 상용전원을 이용하는 전원장치와 각종 기능을 제어하는 제어반(controller-panel) 및 표시장치를 내장하는 반면, 후자는 표시부 없이 제어를 위한 외부와의 인터페이스만을 갖추고 있으며, 일체의 전자회로를 배제하고 여기용 광원(LD)과 광결합기 및 Er-광섬유만으로 구성하는 경우(Corning)도 있다.

실용화를 위한 연구로는 EDFA를 사용한 시스템 설계, EDFA 증계기를 다수 사용하는 시스템의 특성 예측, 시스템 감시 및 유지보수 기술 등이 있다.

EDFA가 이와 같이 짧은 기간 안에 놀라운 발전을 이룩하게 된 것은, 우수한 특성뿐 아니라 기존 광섬유와의 matching이 뛰어나고 기본 구조가 간단하기 때문에 신뢰성이 높고 소형화시킬 수 있으므로 실용화를 목표로 집중적인 연구개발이 있었기 때문이다. 특히, 기존 광통신 시스템의 고속화에 따른 증계기 및 수신기의 비용 증가 및 기술적 어려움을 극복할 수 있다는 것과 다음에 설명한 광주파수 분할 다중화 기술 및 비선형 광통신 기술의 기반기술이라는 점에서, 광증폭 기술의 확보 없이 광통신 기술의 발전을 도모한다는 것은 상상할 수 없는 일이다.^[5]

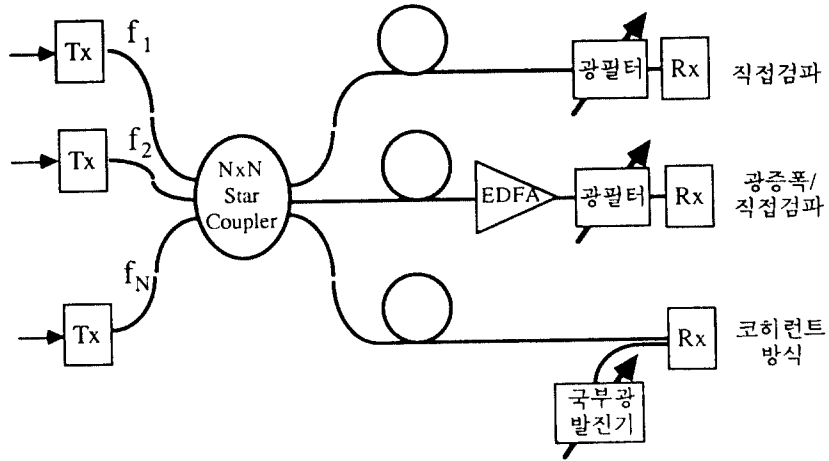
Neodymium 이온이 1060 nm뿐 아니라 1310 nm에서 이득을 갖는 것을 이용하여 1300 nm 대역의 기존 광통신에 활용할 수 있는 Nd-doped 광섬유 증폭기를 제작하려는 시도가 있었으나, 석영계 광섬유 내에서의 이득은 1320 nm 대역에서 나타날 뿐아니라 E:SA (excited-state-absorption) 현상으로 인하여 사용 불가능함이 판명되어, 1300 nm 대역의 광섬유 증폭기로는 Pr-doped 불화유리(ZBLAN) 광섬유가 대안으로 등장하였으며, NTT에서는 이를 사용하여 1310 nm 신호광에 대해 38dB의 이득을 얻은 바있다.^[6]

다. 광 주파수 분할 다중화 기술

석영계 유리 광섬유의 최저손실 대역인 1550 nm 파장대역에서 활용 가능한 범위는 주파수로는 환산하여 약 10THz이다. 채널당 bit-rate 2.5 Gbps인 신호를 채널 간격 10GHz로 광다중화 한다면 1,000 채널 전송이 가능하므로 총 2.5 Tbps의 through-put을 확보하게 된다. 이와 같이 광 주파수 다중화(optical frequency division multiplexing : Optical FDM) 방식은 광파통신의 핵심을 이루는 기술로서 기존 광통신 시스템 일부에서 활용하고 있는 파장분할 다중화(WDM) 기술과 유사하나, 채널 간격이 훨씬 좁고 빛의 파동성을 적극 활용하므로 비약적인 전송용량 증대가 가능하며, 특히 광 FDM은 전송속도나 전송방식에 대하여 매우 유연하고 새로운 서비스나 신규채널의 병렬추가가 용이하여 지속적인 진화 발전이 가능한 보편적 통신망을 구성할 수 있으며, 기존 광통신 방식과는 서로 다른 파장대역을 사용하는 경우 광선로를 공유하며 양립하는 것도 가능하다.

광 FDM 전송 시스템에서 사용 가능한 채널별 분리 및 수신 방식에는 여러가지가 있으며, (그림 5)는 이러한 방식별 특징을 설명한 것이다.

가장 간단한 방법으로는 협대역 광필터로 해당 채널을 선택하여 직접검파하는 방식으로, 이는 기존 WDM 시스템 기술을 연장하여 협대역화 한 것이며, 단일파장 발진 레이저 다이오드(DBF-LD, DBR-LD), 광필터(Fiber Fabry-Perot filter, waveguide Mach-Zehnder Filter) 등 관련소자기술의 발전으로 조기 실현 가능성이 매우 높다. 여기에, EDFA의 광대역 증폭 특성을 활용하면 전송 거리의 증대 및 분배손실의 보상, 수신 감도의 향상 등으로 대용량 광가입자망에 활용할 수 있는 보다 진보된 형태의 시스템을 구성할 수 있다. 또한, 코히런트 광파통신 기술인 헤테



(그림 5) 광 FDM 전송에서 채널 분리 수신 방식

로다인, 또는 호모다인 검파 방식을 사용함으로써 채널 선택도의 향상과 수신감도의 증대를 기대할 수 있으나, 시스템이 복잡해지고 관련 소자기술이 미흡하여 현재로서는 실용화를 전망하기에는 이르다. 코히런트 광전송에 대해서는 (라. 코히런트 광전송)에서 별도로 자세히 다룰 것이다.

광 FDM의 주요 기능은 <표 3>에서와 같이 응용 분야가 다양하다. 단순다중 전송은 복수개의 입력 신호를 다중화 하여 전 채널을 하나로 묶어 전송하고, 역다중화 과정에서 각각을 고정된 주파수 채널로 풀어주는 가장 단순한 응용방식으로, 국간 전송용량의 증

대에 손쉽게 활용될 수 있다. 방송(broadcasting)방식은 광 주파수 다중화된 신호를 단순분배한 후 각 단말에서 채널을 선택하는 방식으로, 분배순설의 보상에는 광증폭기가, 채널 선택에는 가변 광필터 또는 코히런트 수신기가 사용되며, 광가입자망에의 활용이 주요 목표이다. 분기/결합(Add/Drop multiplexing) 방법은 광학적으로 구현하기에는 그리 쉽지 않은 형태이나, LAN, MAN, process간 연결 등 여러가지 형태의 망 구성에 다양한 융통성을 부여할 수 있다는 장점이 있다. 또한 광 cross-connect는 광 FDM 분야에서 가장 어려운 기술이며 광교환에 적합한 형태이다.

<표 3> 광FDM 방식의 주요기능과 응용분야

	시스템 구성	응용분야	주파수정밀도 요구치	핵심소자		
				광필터	가변주파수 LD	광주파수 변환기
단순다중전송		· 국간전송	보통	○		
방송 및 채널 선택		· CATV · LAN · 가입자망	보통	○	○	
분기/결합 (Add/Drop MUX)		· 국간전송 · LAN · Processor간 연결	높음	○	○	
Cross-Connect & Matrix Switch		· 광교환 시스템	높음	○	○	○

광 FDM 기술 발전의 중요한 척도는 수용 가능한 채널 수 외에도 각 채널 주파수의 정밀도와 송신 주파수의 가변(tuning) 범위이다. 송신용 레이저 다이오드의 발진 주파수를 안정시킴과 동시에 원하는 파장으로 가변시키는 것은 매우 어려운 기술이며, 현재의 수준은 주파수 정밀도 수십 MHz, 가변 범위 수백 GHz 수준이다. <표 3>에 열거한 여러 기능과 응용분야를 충분히 감당하기 위해서는 채널 수 1000개, 주파수 정밀도 0.1MHz, 가변 범위는 10THz 정도가 되어야 하며, 이 단계에서 비로서 전송분야뿐 아니라 교환분야에도 광FDM 기술이 활용될 수 있을 것이다.⁷⁾

이외에도 광 FDM에서 핵심이 되는 소자로는 각 채널을 분리하는 광필터를 빼놓을 수 없다. 현재 여러 방식의 광필터가 연구되고 있으며, 일부 상용화된 소자로는 유전체 다층막 필터형 WDM 소자, 이색성 광섬유 결합기(dichroic fused fiber coupler), planar waveguide에 grating을 사용한 WDM소자, fiber Fabry-Perot 필터 등이 있다. 앞으로 기대되는 것으로는 실리콘 기판에 SiO₂ 박막을 형성하고 여기에 여러단의 Mach-Zehnder 간섭계 구조의 도파로형 필터를 구성한 소자로, 우수한 특성과 실용화의 가능성을 보여주고 있다.

라. 코히런트 광통신

코히런트 광통신은 광파를 carrier로 사용하여 광파의 주파수나 위상에 정보를 실어 전송하는 통신 방식이다. 앞서 언급한 바와 같이, 광파는 마이크로파에 비하여 주파수가 1,000배 이상 높기 때문에 광파에 실을 수 있는 정보량도 이론상 주파수에 비례하여 증가한다. 코히런트 광통신은 이와 같이 광파의 파동성을 적극 활용함으로써 전송용량의 극대화와 수신감도의 향상(IM/DD 방식에 비해 통상 10dB 이상)으로 광파통신 기술의 궁극적 목표가 되고 있다. 또한, FSK나 PSK 등 다양한 변조방식을 사용할 수 있으며, IF단에서의 신호 처리가 가능하다는 장점이 있다.

코히런트 광통신 방식은 수신부의 국부 발진기(local oscillator) 광출력과 입력 광신호와의 beating 신호를 검출하는 것으로 국부발진광의 주파수가 입력신호의 주파수와 다른 헤테로다인 방식과 국부발진광의 주파수와 입력신호의 주파수가 같은 호모다인 방식이 있다. 호모다인 방식은 헤테로다인에 비해 3dB 정도 수신감도가 높으며, IF 증폭기의 대역폭이 신호의 baseband폭만으로 좁다는 장점이 있으나, 매우

좁은 신호광 선폭(전송 속도의 0.01%)을 요구하고 국부발진광의 주파수와 위상이 입력신호와 일치해야 한다는 어려움이 있다.

EDFA가 등장하기 전에는 코히런트 광통신의 장점으로 높은 수신감도에 의한 장거리 전송특징이 강조되었으나, EDFA를 사용한 초장거리 전송이 가능해진 요즘에는 IF단에서의 신호처리 가능성이 더 큰 장점으로 부각되고 있다.

즉, 코히런트 다채널 전송방식에서 특정 채널의 선택에 광필터를 사용하는 것은 기술적인 어려움이 많은 반면, IF 대역의 전기 필터는 광필터와 비교하여 상대적으로 쉽게 제작이 용이하며, 좁은 대역폭과 임의의 특성을 갖는 필터를 제작할 수 있으므로 주파수 선택도(frequency selectivity)를 포함하여 시스템의 성능을 향상시킬 수 있다. 또한, IF단에서의 적절한 신호 처리로써 채널간 누화를 제어할 수 있고, 전송로에서의 분산효과를 상쇄시킬 수 있는 분산 등화(dispersion equalization) 및 EDFA를 사용할때 문제가 되는 광 잡음을 제어할 수 있다.

광섬유에서의 분산효과로 인한 광주파수 대역에서의 시간 지연은 수신기 IF단에서 그대로 전기신호로 translation되어 나타난다. 따라서 전송로의 분산특성을 알 수 있다면, 이를 IF단에서 전송로 분산특성의 역특성을 갖는 등화기(equalizer)를 사용함으로써 완전히 보상해줄 수 있다. 이와 같은 방식으로 일본 NTT에서는 CPFSK 변조된 8Gbps의 고속 광신호를 재생중계기 없이 200km 이상 전송하였으며 BER 10⁻⁹으로 -32dBm의 수신감도를 얻은 바 있다. 이와 같은 IF단에서의 등화방식을 사용하지 않는 경우 적절한 간격의 재생중계 없이 장거리 고속 전송은 불가능하다.

이러한 장점에도 불구하고 코히런트 광통신 기술이 실용화되지 못한 것은 시스템에서 요구하는 수준을 만족시킬 수 있는 광소자가 없었기 때문이다. 따라서 각종 부가 장치에 의한 각 기능의 제어가 필요하게 되어, 전체 시스템이 복잡해지고 실용성이 떨어지는 주된 요인이 되었다. 근래에 와서 DFB-LD, 광집적소자(OEIC) 등의 소자와 각종 신호처리 기술의 눈부신 발전으로 인하여 코히런트 광통신 기술의 실용화 전망이 밝아지고 있다.

광신호가 전송로를 지나는 동안 외부 섭동등의 이유로 편광이 예측 불가능한 상태로 변동되기때문에 수신기에 입력되는 광신호의 편광상태와 국부발진광

의 편광상태가 일치하지않게 되어, 광 헤테로다인에 의한 수신기 출력도 변동하게 된다. 이를 보상해주는 방법은 수신광의 편광상태를 능동적으로 추적하여 조절해주는 방법과, 편광 스위칭(switching) 및 scrambling 방식, 편광 diversity 방식 등이 있으며, 근래에는 편광 diversity 방식이 주류를 이루고 있다.

코히런트 광통신에서 해결해야 하는 당면 과제는 우선 송신광의 위상잡음(phase noise)과 관련된 수신감도의 저하이다. 이는 광원으로 사용되는 LD의 발진 선폭과 직접적인 관계가 있으며, 현재 상용화된 DFB-LD의 선폭이 수 MHz 정도로 ASK나 FSK 방식에 적용이 가능한 수준이나, PSK 및 호모다인 방식에 적용하기 위해서는 KHz 급의 더욱 좁은 선폭이 요구된다. 국부발진용 LD의 경우 발진 주파수를 수신대역 전 범위에 걸쳐 가변시킬 수 있어야 한다. 이러한 코히런트 광통신용 LD의 요구조건을 정리하면, 좁은 주파수 선폭과 광탄탄한 FM 변조 응답특성이며, 소재 제작시 발진파장과 선폭을 정확하게 예측할 수 있어야 하므로 많은 연구가 이 분야에 집중되고 있다.

마. 비선형 광전송

광 펄스는 광섬유를 따라 진행하면서 점차 폭이 넓어지는데, 이는 펄스 자체가 엄밀한 의미에서의 단색광이 아니고 서로 다른 파장의 빛이 혼합된 것이기 때문이다. 즉, 우리가 만들어내는 빛은 어느 정도의 선폭을 갖는 것을 피할 수 없으며, 광섬유내에서는 주파수(혹은 파장)에 따라 전파하는 속도가 서로 다르기 때문에(분산) 신호펄스의 파형이 일그러지고 인접한 펄스와 중첩됨으로써 수신감도가 저하하는 것을 막을 수 없다. 따라서, 고속 광통신 시스템일수록(펄스간의 시간 간격이 짧으므로) 분산에 의한 영향을 많이 받게 된다.(수 Gbps급 광통신 시스템에서 DFB-LD와 같은 단일파장 광원을 사용하는 이유가 이것이다.)

광섬유의 분산 효과는 파장의 차이에만 의존하는 것이 아니고, 광 펄스의 세기에도 영향을 받는다. 빛의 세기가 어느 정도 이상이 되면, 같은 파장의 빛이라 해도 세기에 따라 광섬유 내를 진행하는 속도가 달라진다. 이는 optical Kerr 효과라고 불리며, 3차 비선형 광학현상이다. 이를 이용하여, 전송하고자 하는 광 펄스의 파장별 세기를 적절히 조합함으로써 파장에 따른 전파속도의 차이를 역으로 보상할 수 있다면, 장거리 전송에서도 광펄스의 분산 없이 원래의 형태를 유

지할 수 있으며, 이러한 것을 솔리톤(soliton)이라 한다.

물론, 광섬유를 따라 전파되는 솔리톤 펄스는 손실에 의해 약해지며, 어느 한계이하로 약해진 솔리톤 펄스는 원형을 잃게 된다. 이것이 솔리톤 광통신 연구가 실용화의 관점에서 큰 흥미를 끌지 못한 이유였으나, EDFA의 등장으로 고출력 광 펄스의 생성과 증폭 중계가 가능하게 됨에 따라 활기를 띠고 있다.

솔리톤 펄스는 분산의 영향을 받지 않기때문에 펄스 간격을 좁힐 수 있으며, 따라서 초고속 광통신 시스템에 적합하다. 최근, EDFA를 사용할 수 있는 1550 nm 내역에서 WDM 방식으로 복수개(4~5개) 채널의 솔리톤 펄스를 전송할 수 있다는 결과를 얻은 바 있으며, 이 경우 전송 용량은 수십 Gbps 이상으로 확대 될 것이다.

솔리톤 전송에서의 문제점은 솔리톤 광 펄스 자체가 상당히 넓은 대역의 주파수를 포함하기때문에 광 FDM 방식으로 다채널화 하는 것이 불가능하고, 비선형 현상에서의 인접 펄스간 상호 작용때문에 펄스간 거리가 펄스 폭의 10배 정도 이상을 유지해야 한다(즉, 펄스 폭을 매우 좁게 해야 한다)는 것이다. 또한 솔리톤 광펄스의 생성 및 변조, 검출 등에 필요한 기술이 아직 실용화를 기원하기에는 시기상조이나, 조장거리 전송 분야에서의 잠재력으로 인하여 많은 연구가 진행되고 있다.

IV. 결 론

2000년대 광대역 종합정보통신망의 본격적인 도입을 위해서는 막대한 통신 수요를 충족시킬 수 있는 기간 통신망의 확보가 필수적이며, 이를 위해서는 초대용량 광통신 기술의 도입이 필연적이다. 선두주자인 일본의 주세로부터 미루어볼 때, 1990년대 중반 이후 광대역 대용량 정보통신 수요가 급증할 것으로 예상된다. 바, 폭증할 수요를 충족하기에 기존방식은 이미 수용 능력에 한계가 보이며, 기존 기술의 단순 확장만으로는 점점 복잡 고도화되는 전송망에서의 경제성 및 신뢰성 요구를 감당할 수 없을 것이므로, 가입자 중심의 대량 수요 시대에 걸맞는 새로운 광통신 기술의 개발이 필요하다.

현재 광통신 분야의 침탄을 타리고 있는 것은 광증폭 기술이며, 이는 전송속도의 고속화에 따른 재생형 중계기의 가격 상승과 전송 시스템의 교체 및 up-

grade시의 중계기 교체비용을 절감할 수 있다는 경제적인 면과 함께, 차후 전개될 광광통신 및 비선형 광통신 등의 신기술을 가능케 하는 기반기술이기 때문이다. EDFA를 사용한 광통신 시스템은 향후 2-3년 안에 상용화 될 것으로 예상되며, 10Gbps 시스템 및 해저 광통신에는 필수적인 장치가 될 것이다. 미국의 AT&T와 일본의 NTT에서는 지난 상당기간 기존 광/전 변환 방식을 유지하는 광중계장치의 광진집적화 연구에 주력해왔으나 최근 광섬유 증폭기술의 예상외로 빠른 진보에 고무되어 완전광중계 방식으로 방향을 전환, 실용화를 적극적으로 추진하고 있다.

또한 이 이상의 전송 용량에 대해서는 과장분할 다중화 또는 광주파수 다중화 방식이 적용되어야 할 것이며, 이를 위해서 현재 관련 다중화 기술 및 소자 개발이 활발하게 추진되고 있다. 특히, 광가입자망과 관련하여 다채널 분배방식의 광 FDM 기술이 주목받고 있으며, 선진국의 경우 4-5년 내로 광 FDM 시스템의 초기 실용화 단계에 들어설 것으로 예상된다.

코히런트 방식 광 FDM 다채널 전송 기술은 2000년 이후에나 기술적인 실용성이 증명될 것으로 보이지만, 단일채널 전송기술은 이보다 빨리 실용화 될 것이다. 지난 수년간 다채널 코히런트 장거리 전송 방식의 현장시험이 미국, 일본, 영국 등지에서 수차례에 걸쳐 수행되고 있다.

이러한 차세대 광통신기술을 뒷받침하는 관련 소자기술의 개발도 활발하여, LD와 외부변조기의 단일 칩(monolithic) 집적화, 20GHz 이상의 유기박막 광변조기, 파장가변 필터 및 LD, 초저선폭LD, EDFA용 고효율 LD 등이 연구되고 있다.

한국전자통신연구소 광통신연구실에서는 이러한 초대용량 광통신 기술을 확보하기 위하여 현재 2.5Gbps 광전송 시스템의 개발과 광증폭 기술 연구를 수행하고 있으며, '93년도부터 10Gbps 광전송 시스템의 개발과 100Gbps급 광 FDM 기술 연구에 착수할 예정이다. 또한 솔리톤 전송과 유기박막 광소자 및 LD, PD 등의 광전소자 개발도 기초기술연구부 및 광전자연구실에서 수행중에 있다.

참 고 문 헌

- 김재근, 이성경, "동기식 전송 기술의 현황과 전망," 전자통신, vol.14, no.2, pp.3-15(1992).
- Y. K. Park et al., "318-km repeaterless transmission using erbium-doped fiber amplifiers in a 2.5Gb/s IM/DD system," Optical Fiber Communication Conference, paper ThK1(1992).
- 한정희, 이재승, 주무정, 심창섭, "1.48 μ m LD로 펌핑된 Er-doped 광섬유증폭기의 제작과 특성 측정," 92년도 대한전자공학회 하계종합학술대회 논문집, vol. 15, no.1, pp.531-534(1992).
- 주무정, "Er-doped 광섬유 증폭기의 기술동향," 한국전자통신연구소 기술메모, TM91-1320-16(1991).
- 박희갑, 이재승, 심창섭, "완전 광통신을 지향하는 광섬유 증폭 기술," 한국전자통신연구소 주간기술동향, vol. 24, pp.1-20(1990).
- Y. Miyajim et. al., "38.2dB amplification at 1.31 μ m and possibility of 0.98 μ m pumping in Pr³⁺-doped fluoride fiber," Electron. Lett., vol.27, pp.1706-1707(1991).
- 박희갑, 이성은, 심창섭, "가입자망용 coherent 광 FDM 시스템 기술 고찰," 한국전자통신연구소 주간기술동향, vol.36, pp.1-19(1989).
- 한정희, 박희갑, "광 FDM 시스템 기술의 연구동향," 한국전자통신연구소 기술메모, TM91-1320-6(1991).
- 이재승, 박희갑, 심창섭, "차세대 광통신 기술의 개발 동향," 전자공학회지, vol.17, pp.436-449(1990).
- 박희갑, 이성은, 심창섭, "Coherent 광통신 기술의 현황과 전망," 한국전자통신연구소 주간기술동향, vol.9, pp.33-50(1989).
- 주무정, "정보화 시대를 지원하는 광통신기술," 한국전자통신연구소 전자통신동향 분석, pp.58-65(1991.10월호).
- 전영윤, 김동현, 최재각, 장종수, 박경현, 주무정, 이만섭, "광 CATV 기술동향," 한국통신학회지, vol.7, pp.302-324(1990).
- 심창섭, 강민호, 이일항, "광통신 기술," 전자공학회지, vol.17, pp.48-58(1990).
- 임주환, 이병기, "2000년대를 향한 정보통신망," 전자공학회지, vol. 17, pp.1-10(1990).
- E.Desurvire, "Lightwave Communications: The Fifth Generation," Sci. Am. pp.96-103(Jan. 1992).



주 무 정

- 1980년 2월 : 연세대학교 물리학과 이학사
- 1982년 2월 : 한국과학기술원 물리학과 이학석사
- 1985년 2월 : 한국과학기술원 물리학과 이학박사
- 1985년 3월 ~ 현재 : 한국전자통신연구소 광통신연구실 선임연구원
- 1989년 1월 ~ 1989년 10월 : 독일 Heinrich-Hertz-Institut 방문연구원



심 창 섭

- 1975년 2월 : 서울대학교 응용물리학과 공학사
- 1987년 2월 : 전남대학교 물리학과 이학석사
- 1988년 3월 ~ 현재 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사
- 1975년 3월 ~ 1982년 12월 : 국방과학연구소 전자공학연구실 선임연구원
- 1983년 3월 ~ 현재 : 한국전자통신연구소 광통신연구실 실장