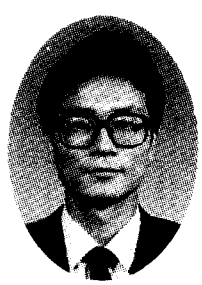
광섬유증폭기

이동한
충남대학교 물리학과

박희갑
전북대학교 물리학과



이창희
한국과학기술원
전기 및 전자공학과

I. 서 론

희토류가 첨가된 광섬유 증폭기, 특히 erbium doped fiber amplifier(EDFA)는 1550nm 파장대에서 광섬유에서의 손실을 극복할 수 있으며, 광증폭 과정에서 신호의 왜곡이 적은 이상적인 광통신용 광증폭기이다. 따라서 지난 10여년 동안 많은 연구개발이 이루어 졌다. 현재 미국, 일본, 유럽 등에서 여러 가지 종류의 EDFA를 상용화하였으며, 이를 이용한 10 Gb/s 단일 채널 광전송 시스템, 16 채널 2.5 Gb/s 광전송 시스템 등도 상용화되었다. 또한, 일본과 미국에서는 파장분할 다중화 방식을 이용하여 이미 1 Tb/s 이상의 광통신의 가능성을 보였다[1]. 이러한 초대용량 광통신을 구현하기 위해서는 고출력의 광대역 광증폭기(대역폭 30 nm 이상)가 필수적이다. 또한, 광증폭기 활용으로 급속도로 발전한 광통신 기술은 신호의 형태 및 전송속도에 투명한 전광전송망의 가능성을 현실화시키고 있다[2].

이와 같이 광증폭기의 응용분야가 넓어지고 시스템에 활용되기 시작하면서 이에 대한 보다 많은 투자가 이루어지고 있다. 대표적으로 파장분할 다중방식 광전송에 활용하기 위한 광대역 고출력 광증폭기에 관한 연구를 들 수 있다. 광증폭기의 대역폭은 단일 채널의 광전송에서는 거의 문제가 되지 않을 정도로 넓으나, 다 채널의 신호를 전송하는 광전송에서는 사용 가능한 채널 수를 결정하는 중요한 요인이 된다. 더욱이 장거리 광전송에서와 같이 광증폭기를 여러 단 연결하는 경우는 증폭 대역폭이 연결된 광증폭기의 단수에 따라 감소하므로 이를 보상해 주거나 증폭 대역폭이 충분히 넓은 광증폭기를 사용하여 한다. 최근에는 미국 일본 등에서는 기존 EDFA의 증폭대역폭인 35 nm을 2 배 이상 증가시킨 초광대역 광증폭기를 발표하였다[3,4].

광증폭기를 여러 단 연결하여 사용하는 장거리 무중계 광전송에서는 기존에는 상대적으로 중요하지 않았던 광섬유에서의 색분산과 비선형성에 의한 신호의 왜곡이 광통신의 성능을 결정하게 되었다. 그러나, 이러한 문제점들은 색분산 보상기술 및 비선형성 제어 기술 등의 전송기술 발달로 해결되고 있다. 따라서 현대의 광통신은 여러 단의 광증폭기 사용으로 누적되는 광증폭기 잡음에 의해서 결정되는 한계에 거의 접근하였다. 이와 같은 광통신 기술의 발달은 영상정보 및 인터넷 등으로 인하여 폭주하는 정보량을 경제적으로 수용할 수 있는 기간통신망을 구현할 수 있게 하여 정보화 시대를 앞당기는 역할을 하고 있다.

국내에서도 여러 그룹에서 EDFA에 대한 연구를 수행하고 있다. 한국과학기술연구원(KIST), 삼성전자, 한국통신 / 대우 에서

는 희토류 첨가 광섬유를 개발하였다. 또한, 한국전자통신연구원(ETRI) 및 삼성전자, LG정보통신에서는 EDFA 모듈을 개발하여 2.5 Gb/s 시스템 혹은 10 Gb/s 시스템에 활용하고 있으며[5], 한국전자통신연구원, 삼성전자, 한국과학기술원, 충남대학교 등에서는 파장분할 다중화 방식 광통신에 활용하기 위한 광대역 광증폭기를 연구하고 있다.

이러한 시점에서 희토류가 첨가된 광섬유 증폭기의 특성 및 시스템 응용에 관해서 검토해 보고 앞으로의 연구방향을 살펴보는 것은 의미 있는 일일 것이다. 본 논문의 2장에서 희토류 첨가 광섬유와 이를 이용한 증폭기의 기본적인 특성을 살펴보고, 3장에서는 여러 가지 목적에 맞는 광증폭기와 이의 광통신 시스템에의 응용을 살펴보았다. 그리고 4장에는 결론을 실었다.

II. 희토류 첨가 광섬유증폭기의 특성

광섬유에 희토류 원소를 첨가하면 광섬유의 좋은 도파로 특성을 이용할 수 있으므로 레이저나 광증폭기를 구현하기 위해 필요한 펌프광 세기가 현저하게 줄어든다. 이러한 장점을 이용하기 위해 이미 1960년대 초부터 Snitzer등이 유리 레이저와 증폭기를 구현시킨 바 있으며[6,7], 1970년초에 Stone와 Burrus에 의해 다시 시도된 바 있다[8]. 그러나, 응용분야가 많지 않아 이에 대한 연구는 한동안 휴식기에 들어갔다. 그러다가 1985년에 광섬유에서 손실이 최저인 1550nm 파장대에서 높은 이득을 갖는 에르븀이 첨가된 광섬유(EDF : erbium-doped fiber)가 개발되면서 광통신에의 응용을 목적으로 전세계적으로 이에 대한 활발한 연구가 시작되었다.

1. 에르븀 첨가 광섬유 증폭기의 기본특성

그림 1은 실리카 광섬유에 첨가된 에르븀의 에너지 레벨이다. 주 흡수파장대는 980nm와 1530nm 대역을 들 수 있다. 980nm대의 흡수는 흡수계수가 매우 크며 흡수선폭은 매우 좁으며 가장 효율적인 펌프 파장이다. 반면에 1530 nm대의 흡수는 흡수선폭이 매우 넓어서 이의 일부인 1,480nm 근방을 펌프파장으로 사용한다. 펌핑된 광을 흡수하여 여기된 전자는 1530nm근처 에너지 준위로 빠른 시간 내에(~1us) 모이게 된다. 이 준위에서 바닥 상태로 돌아가는 시간은 약 10 ms로 느려, 그 준위에서 많은 에너지의 축적이 가능하며, 이렇게 반전이 되어 있을 때 신호를 보내주면 신호증폭

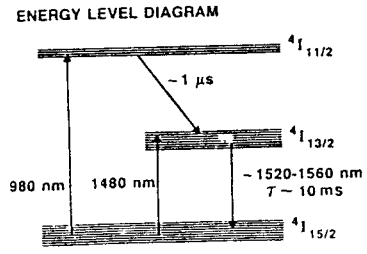


그림 1. 에르븀 이온의 에너지 준위

을 얻을 수 있다. 그림 2는 EDF의 흡수계수와 발광계수를 보여준다. 이 경우 흡수 스펙트럼은 상부상태가 완전히 비어있는 상태(소신호 한계)에서 측정한 것이며, 발광 스펙트럼은 바닥상태가 전부 여기되어 완전한 반전이 일어났을 때 측정한 것이다. 보통의 경우는 반전의 정도에 따라 이 두 계수의 조합으로 이루어진 이득 스펙트럼이 결정된다.

통상적인 EDFA의 구성을 그림 3에 보였다. 이는 펌프용 연속발

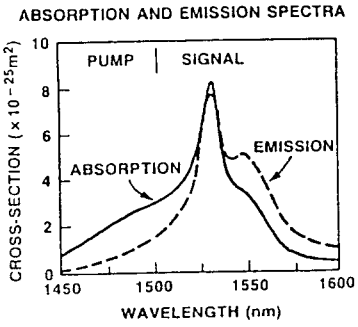


그림 2. 에르븀 이온의 흡수와 발광 cross sections

진 반도체 레이저, 펌프광과 신호광을 동일 광섬유내로 보내줄 수 있는 WDM, 최적길이의 EDF(10-30m) 그리고 광 isolator, 각 한 개씩의 부품으로 이루어진다. 펌핑용으로는 980nm 반도체 레이저가 주로 사용된다. 그림 3b는 이러한 EDFA에서의 신호광과 펌프광의 세기의 변화를 보여주고 있다. EDF내에서 펌프광의 세기는 급격히 감소하며, 그 에너지가 신호광으로 이동함을 보여주고 있다. EDFA는 구성에 따라 신호광과 펌프광의 진행 방향이 같은 순방향 펌핑, 진행 방향이 반대인 역방향 펌핑, 그리고 양쪽에서 펌프하는 양방향 펌핑방식을 쓸 수 있다. 순방향 펌핑은 입력단에 펌프의 세기가 세므로 잡음지수가 가장 낮아서 주로 전치증폭기에 많이 사용된다. 역방향 펌핑이나 양방향 펌핑은 출력단의 펌프세기가 세므로 고출력 증폭기에 적합하여 광전력증폭기나 중계기용으로 많이 사용한다. EDFA의 응용에 대해서는 3장에 자세히 기술하였다.

그림 4는 일정한 EDF 길이에서 전형적인 이득특성을 보여주고 있다. 그림 4a는 주어진 소신호 입력에서 펌프광 세기에 따른 이득의 변화를 보여주고 있다. 펌프광

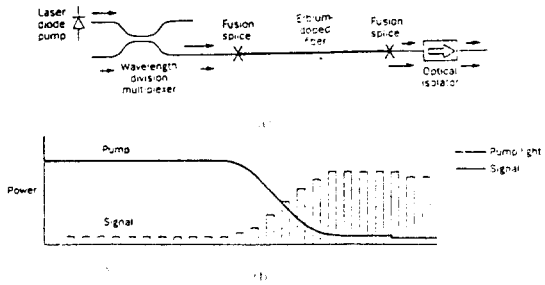


그림 3. 에르븀첨가 광섬유 증폭기

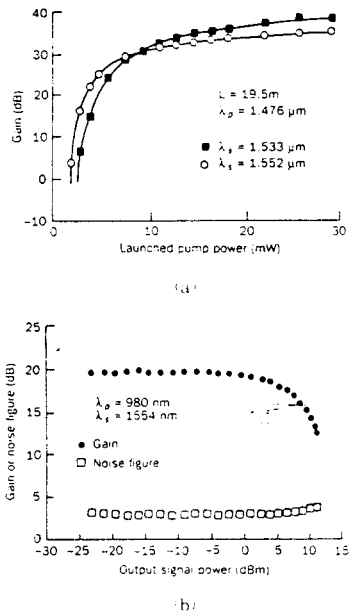


그림 4. a) 소신호 이득 대 펌프광 세기, b) 이득과 잡음지수 대 출력신호 세기

의 세기가 임계 펌프세기보다 커지면 이득은 급격히 증가하다가 포화된다. 이는 반전이 높아지면서 주어진 EDF 길이 내에서 펌프광의 흡수가 포화되어 이득이 더 증가하지 못하기 때문이다. 그림 4b는 주어진 펌프광 세기에서 출력신호 세기에 따른 이득과 잡음지수(noise figure, 출력단 신호 대 잡음 비율 / 입력단 신호 대 잡음 비율)의 변화를 보여준다. 이 관계는 시스템 설계에서 중요한 정보로서, 원하는 출력광 세기, 이득 및 이득 포화정도(compression = 소신호 이득 - 동작신호 이득), 잡음지수를 알 수 있다.

광증폭기의 이득이 소신호 이득에서 3dB 감소되는 출력의 세기를 포화출력(saturation power)라 부른다. 광증폭기의 포화출력은 광증폭기로 얻을 수 있는 출력의 세기를 말하는 기준으로 광전력증폭기나 광중계기를 설계할 때의 중요한 변수이다. 특히 여러 단의 광증폭기를 연결한 장거리 전송 시스템에서는 광증폭기를 포화된 상태에서 동작시킨다. 그러면, 전송로의 한 부분에서 신호가 감소하면 증폭기의 이득이 증가하므로 중계기를 지날수록 점점 더 정해진 출력에 가까워진다. 또 신호가 갑자기 증가하더라도 큰 신호에서는 이득이 더 작아 (그림 4b 참조) 점차 원상 복귀되는 자동 이득조절 기능을 갖게 된다.

광증폭기의 잡음지수는 EDFA에서 신호에 잡음이 더해지는 정도를 나타낸다. 주요 잡음원은 증폭된 자연방출(Amplified Spontaneous Emission ; ASE)과 신호광과의 비트, ASE 자체, ASE와 ASE간의 비트가 있다. 잡음지수는 반전의 함수로서 반전이 완전하게 되고 이득이 충분히 크면 이론적인 한계치인 3 dB가 된다. 실제 시스템에서는 어느 정도 포화된 상태에서 작동하기 때문에 반전이 낮아져 잡음지수는 증가하게 된다.

광증폭기는 광신호를 전기신호로 바꿈이 없이 그대로 증폭하므로 광섬유가 가지고 있는 광대역을 최대한 이용할 수 있다. 하지만 처음에는 깨끗하던 신호가 장거리를 지나면서 왜곡이 되고 잡음이 증가하더라도 증폭기에서는 이 신호를 다시 원상 복귀하는 기능이 없기 때문에, 특히 장거리 전송에서는, 작은 효과라도 이러한 요소들을 잘 이해하여 실제 시스템 설계에 반영하여야 한다.

신호를 왜곡하는 중요한 요소로는 광섬유에서 유래되는 분산효과, 광세기가 증가함에 따라 나타나는 광섬유의 비선형 효과, 그리고 광증폭기 자체에서 생기는 광잡음(ASE) 등을 들 수 있다. 광섬유의 색분산은 파장에 따라 광의 속도가 달라져 파장이 다르면 일정길이를 지나는 시간이 달라지는 현상이다. 아무리 선폭이 협소한 레이저라 하더라도 파장의 분포로 이루어져 있기에 긴 광섬유를 지나면 신호폭이 처음보다 더 확산된다. 이 분산은 재질인 유리에서 오는 것과 도파로 특성에서 오는 것으로 이루어져 있다. 현재 주로 쓰고 있는 광섬유는 이 분산의 극소점이 1300 nm 근처이며 최근 개발된 분산천이 광섬유는 극소점을 흡수가 가장 작은 1550 nm 근처로 조절되어 있다.

비교적 최근에 발견된 편광 모드 분산(PMD)은 광섬유에 내재되어 있는 작은 타원성이나 압력에 의해 복굴절이 생기게 되어 두 수직 모드의 속도 차이가 생기게 되어 도착시간 차이가 생겨 신호가 확산되는 현상이다. 색분산은 규칙적인 효과이기 때문에 분산천이 광섬유 등을 이용해 해결할 수 있으나 PMD는 시간에 따라 불규

칙하게 변하기 때문에, 광섬유의 타원성을 줄이거나 두 모드 사이의 변환을 빠르게 해 주어서 PMD를 줄여야만 한다.

비선형에 의한 문제는 새로운 파장성분이 생기면서 색분산 효과로 디지털 신호가 확산되는 경우와 새로운 파장성분으로 신호의 에너지를 잃어버리는 경우를 들 수 있다. 이 문제는 신호광 세기를 낮추는 방법, 중첩시간을 줄이기 위해 계속적인 분산극소점을 피하는 방법[9], 또 신호광의 선폭을 증가시켜주는 방법[10]등으로 대처할 수 있다. 장거리 전송 시스템에는 여러개의 광증폭기가 필요하다. 전송로에서 약해진 신호를 복귀시키는 방법에는 긴 거리 전송 후에 크게 증폭시키는 방법과 짧은 거리 전송 후에 적게 증폭시키는 경우를 들 수 있다. 하지만 광잡음은 같은 장거리를 가더라도 증폭기의 간격이 작으면 훨씬 적어지게 된다[9]. 그러므로 긴 시스템일수록 증폭기 간격을 더 작게 하여야 마지막에 축적된 ASE를 충분히 작게 할 수 있다.

2. 새로운 광섬유증폭기들

에르븀을 첨가한 광증폭기에서 얻을 수 있는 출력은 펌프용 다이오드의 출력이 제한되어 있어 27.8 dBm 정도가 그 한계이다[11]. 더 높은 출력을 얻기 위해서 에르븀과 이터븀을 동시에 첨가한 광섬유를 이용하여 36 dBm의 고출력 광증폭기를 발표한 바 있다[12]. 이 경우 펌프원으로 출력이 큰 AlGaAs 다이오드 레이저를 사용한 니오디움 레이저의 1.06 um 광을 이용하여 이터븀 이온을 여기시키고, 이 에너지를 에르븀 이온으로 전달하는 방식을 이용한다. 한 개의 다이오드 펌프 니오디뮴(diode-pumped neodymium) 레이저를 사용하였을 때 소신호 이득 51 dB 이상, 잡음지수 3.5 dB, 포화출력 1.5 W의 성능이 발표되었다. 또 다른 경우는 에르븀을 전형적인 실리카 광섬유가 아닌 플로라이드 광섬유에 첨가시켜 파장분할다중전송에 유리한 30 nm 보다 넓은 이득대역을 갖는 광증폭기를 제작하는 등 계속적으로 새로운 결과가 나오고 있다[13]. 최근 일본의 NTT에서는 보다 많은 파장수를 사용하기 위한 연구 결과로 Tellurite를 모재로한 에르븀첨가 광섬유 증폭기를 발표하였는데 이는 단순한 다이오드 펌핑만으로 1530 nm에서 1610 nm에 걸친 80 nm의 넓은 대역에서 좋은 증폭 특성을 보여주고 있다[3].

통신과 관계있는 파장대역은 보통 광섬유에서 색분산이 없어지는 1.3 um과 광손실이 최소인 1.55 um 영역이다. 장거리 전송의 경우 색분산도 광손실이 최소인 1.55 um에서 영인 분산천이 광섬유를 이용하려 하고있어 1.55 um 영역에서 좋은 특성을 가지고 있는 에르븀 첨가 광섬유에 대한 연구는 급격히 증가하고 있다. 또한 이미 설치되어 있는 전송용 광섬유의 색분산이 1.3 um영역에서 영이기에 기존의 광섬유를 버리고 새로 분산천이 광섬유를 설치할 경우의 엄청난 경비를 피하기 위하여 이 파장영역에서의 광증폭기에 대한 연구도 진행되고 있다. 이 경우는 니오디뮴 첨가 광섬유와 프라시디움 첨가 광섬유가 비교적 좋은 특성을 보이고 있다. 니오디뮴 첨가 광섬유는 시스템에서 쓸 수 있는 특성, 즉 충분한 증폭율, 다이오드 여기가능, 저 잡음지수 등을 보여주지 못하고 있다[14]. 반면에 프라시디뮴(praseodymium) 첨가 광섬유는 모재가 전송용 광섬유와는 다른 ZBLAN으로 알려진 플로라이드(fluoride) 유리를 사용하여 좋은 특성을 보여주고 있다. 최근에는 일본의 NTT의 연구원들이 이러한 광섬유를 이용하여 하나의 레이저 다이오드를 이용하여 23 dB의 신호이득을 갖는 좋은 성능의 광증폭기를 발표하였다[15]. 또 같은 연구소에서 이 증폭기를 사용하여 광세기 margin이 51dB가 넘는 115 km에 전송을 성공시킨바 있다[16].

III. 전송 시스템에의 응용현황

1. 국간 전송 및 해저 전송 시스템

광증폭기를 국간 중계 전송 시스템에 활용하는 방식의 예를 그림 5에 나타내었다[17]. 광증폭기는 송신부에서 송신 광출력을 증대시키기 위하여 광전력증폭기로서 사용할 수 있으며, 일정거리를 전송한 후 약해진 광신호를 주기적으로 증폭하는 광중계기로도 사용된다. 또, 수신부에서 수신기의 수신감도를 높이기 위한 광전치증폭기로서도 사용된다. 광증폭기는 역할에 따라 중요시 되는 특성 변수가 달라지므로 부문별로 연구현황을 살펴보자.

1) 광전력증폭기

EDFA를 송신단에서 광전력증폭기로 사용하면 송신 광출력을 10dB 이상 증대시킬 수 있으므로 중계기간 거리를 30 ~ 50Km 정도 늘려 무중계 전송거리를 증가시킬 수 있다. 이 방식에서는 광증폭기에서의 잡음이 시스템의 특성에 거의 영향을 주지 않으므로 가장 적용이 용이한 응용방식이다. 광전력증폭기로 사용하기 위해서는 높은 출력이 요구되므로 주로 역방향 펌핑이나, 양방향 펌

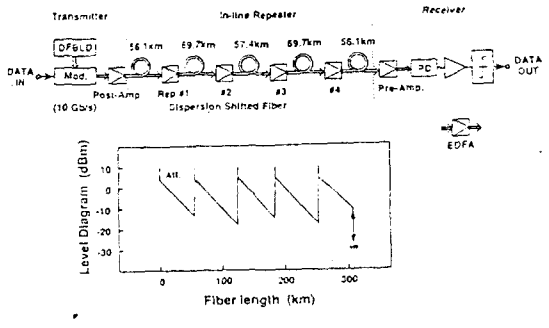


그림 5. 국간 중계 전송 시스템에서의 광증폭기 활용 방식 (17)

펌핑구조의 EDFA가 많이 사용된다. 현재 0.98 um 또는 1.48 um 파장의 LD 펌핑에 의해 약 +27.8 dBm 이상의 수준까지 증폭된 출력을 얻고 있다[11]. 보다 고출력을 얻기 위해서는 2 장에서 설명한 바와 같이 에르븀과 함께 이터븀이 같이 첨가된 광섬유증폭기를 이용한다. 이 경우는 36 dBm 이상의 광출력을 얻을 수 있다. 이러한 광증폭기는 국간 전송이 아니더라도 광 CATV망의 경우와 같이 많은 수의 가입자 단말에 광세기의 분배가 필요한 경우에 광전력증폭기를 사용하여 공급 가능한 가입자 branch 수를 늘릴 수 있다.

광송신기의 출력이 증가되면 광섬유 내에서 여러 가지 비선형 광학 효과들에 의하여 송신한 신호가 왜곡된다. 그 중 가장 큰 영향을 주는(문턱치 세기가 가장 낮은) 현상은 유도 Brillouin 산란으로 전송특성에 영향을 주는 문턱치 광 세기가 수 dBm 정도이다. 다행히도 유도 Brillouin 산란이 일어나는 대역폭이 매우 좁아서 광원을 위상 변조 또는 FSK 변조 시킴으로써 문턱치 광 세기를 높여 +21dBm의 광 세기에도 전송품질에 큰 문제가 없도록 한 실험결과가 보고되었다[10].

2) 전치증폭기

광섬유증폭기를 광수신기의 전단에 두어 미약해진 광신호를 증폭하면, 광수신기는 항상 큰 광신호를 받을 수 있다. 이와 같이 수신되는 광신호가 충분히 커지면 수신감도에 미치는 열잡음의 영향을 무시할 수 있으므로, 수신감도는 입력 광증폭기의 잡음에 의해서 결정되는 신호-잡음간의 비트잡음에 의해서 결정된다. 이론적인 연구결과에 의하면 38 photons/bit의 수신감도까지 가능하다[18](만약 광증폭기의 잡음의 영향을 무시하면 양자한계(quantum limit)로서 10^{9} BER에서 10.5 photons/bit이다.). 그러나 현재까지 보고된 최고의 수신감도는 10 Gb/s 신호인 경우 76 photons/bit(- 40.1 dBm) 이다[19]. 이는 coherent 전송방식으로 얻을 수 있는 수신감도에 거의 근접한 값이다. 또한, 이 값은 APD를 사용하는 수신기의 수신감도 ~ 1000 photons/bit 정도보다 10배 이상 개선된 값이다. 더욱이 전송속도가 높아질수록 고성능의 광수신기를 설계/제작하기가 어려우므로 광전치증폭기를 사용하는 광수신의 장점이 두드러진다.

전치 증폭기에서는 미약한 입력 광신호를 증폭하므로 광이득을 높이면서 광증폭기의 잡음지수를 줄여야 한다. 광증폭기의 잡음지수는 밀도반전(여기준위의 전자 수와 바닥 준위에 있는 전자수의 비)의 정도에 따라 결정되며 100 % 밀도반전이 된 경우 이론적인 한계인 3 dB이다. 따라서 광전치증폭기용 펌프광원으로는 1480 nm 레이저보다는 거의 100 % 밀도 반전을 얻을 수 있는 980 nm 레이저를 사용한다. 또한 광증폭기의 입력단에서의 밀도반전이 광증폭기의 잡음비수를 결정하므로 역방향 펌핑보다는 순방향 펌핑을 주로 사용한다.

이득이 높은 광전치증폭기를 구현하기 위해서는 에르븀 광섬유를 2 단으로 나누고 중간에 광아이솔레이터를 두는 구조가 이용되고 있다. 이러한 구조에서는 광증폭기의 출력단에서 입력단으로 진행하는 ASE 성분이 광아이솔레이터에 의해서 차단된다. 따라서 후방으로 진행하는 ASE에 의해서 광증폭기의 입력단이 포화되어 밀도반전이 낮아지는 것을 막을 수 있으므로 광증폭기의 잡음지수를 낮출 수 있다. 그림 6에 2단 광전치증폭기의 구조를 나타내었다[20]. 순방향 펌프 방식을 사용하고 있으며, 첫 번째 단의 에르븀

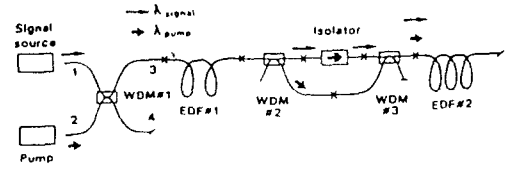


그림 6. 2-stage 형태의 고이득 저잡음 전치 광증폭기

광섬유를 지난 펌핑 광을 4-port WDM으로 분리하여 광아이솔레이터를 거치지 않고 두 번째 단의 에르븀 광섬유로 입사되도록 하였다. 이러한 구조에서 45 mW의 980 nm 펌핑으로 51 dB의 높은 이득과 함께 3.1dB의 낮은 잡음지수를 얻었다[21].

3) 중계기

광증폭기를 중계기로서 활용하면 기존의 복잡한 재생형 중계기를 대체할 수 있다. 광증폭 중계기는 개념적으로나 기기적으로 단순하므로 앞으로 고신뢰도 저가격의 가능성이 있으며, 전송속도와 전송방식의 변화에 대해 유연하게 시스템을 구성할 수 있다. 따라서 광전송시스템의 전송속도를 올린다든지 단계적으로 고급화해 나가고자 할 때 확장성이 뛰어나며 WDM과 같은 광다중화 방식에 적합한 중계방식이라 할 수 있다.

그러나 광증폭 중계는 3R의 기능을 모두 가지는 기존의 재생 중계기와는 달리 1R의 기능만을 가지는 선형 중계기이므로 여러단 증폭중계를 거듭함에 따라 잡음광이 누적되고, 여러 종류의 비선형 광학 효과에 의한 신호의 왜곡이 누적되어 전송품질이 저해된다. 이에 대해서는 2장에서 설명하였다. 따라서 어느 정도의 거리를 전송한 후에는 재생중계기로 왜곡을 해소시켜 줄 필요가 있다. 이러한 관점에서 선형 광증폭만으로 (재생중계없이) 얼마나 장거리 전송이 가능한지를 그림 7에 나타내었다[17]. 그림에서 보면 수 Gb/s의 전송속도를 사용할 경우에 10,000km 정도의 거리에 대해서는 재생중계기 없이도 광증폭만으로 전송이 가능함을 알 수 있다. 실제로 이미 미국의 AT & T와는 일본의 KDD가 공동으로 약 9,000km의 태평양을 가로질러 미

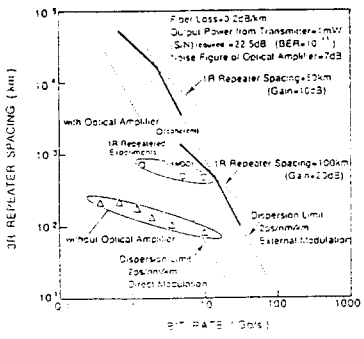


그림 7. 선형 중계 가능한 최대거리(계산치와실험결과)(13)

국-하와이-일본-괌을 연결하는 5Gb/s 광증폭 방식의 해저 광케이블 시스템 (TPC-5)의 설치 및 포설을 완료하였다. 한편 AT&T에서 20개 파장의 5 Gb/s 채널의 WDM 방식을 이용하여 9,100km에 걸쳐 100 Gb/s의 광전송 실험에 성공한 바 있다[22].

참고로 TPC-5에서 사용되는 광증폭 중계기의 기본 구조를 그림 8에서 살펴보기로 하자[19]. 해저 케이블 시스템에서는 신뢰성이 가장 중요하며 이를 위하여 부품수를 가능한 한 줄이고 가급적 광섬유 형태의 소자를 사용하고 설계를 단순화시킴으로써 기대수명이 27년 이상이 되도록 하였다. 따라서 일반적으로 EDFA에서 사용하는 ASE 제거용 필터를 사용하지 않고 에르븀 광섬유의 이득 스펙트럼의 최고값에 신호광파장을 맞추어 ASE가 상대적으로 억제되도록 하였다. ASE가 후방 진행하여 누적되는 것을 막기 위한 광 isolator도 EDFA당 1개씩만을 사용하였다. 광증폭 중계기는 한 쌍의 EDFA로 이루어져 각기 반대방향의 신호증폭을 하도록 되어 있으며 중계기의 신뢰도 확보를 위하여 두 EDFA가 두개의 펌핑 LD를 공유하며 3 dB coupler로 나누어 함께 펌핑하는 방식을 취

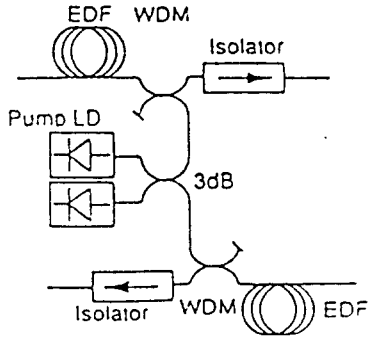


그림 8. 태평양 횡단 해저 전송시스템(TPC-5)에서의 광증폭기(23)

하였다. 따라서 두 펌핑 LD중 어느 하나에 문제가 생기더라도 두 EDFA는 펌핑 세기가 절반으로 줄어든 상태에서도 거의 정상적으로 동작하도록 되어 있다. 이 시스템이 상당한 이득포화상태에서 동작하도록 설계되었기 때문에 펌핑 LD 하나가 고장나더라도 원래의 출력 신호 레벨은 거의 그대로 유지된다. 단, 펌핑 세기가 반감되므로 잡음지수만이 약 1 dB 증가한다. 광증폭기의 이득은 7 ~ 22 dB 범위에서 동작할 수 있으나 초장거리 시스템이므로 잡음광과 비선형 효과의 누적을 최소화하는 것이 설계시 가장 크게 고려되어야 하므로 7 ~ 12 dB 범위에서 동작시킨다.

2. WDM 전송 시스템

광증폭은 파장 분할 다중화된 광신호의 여러 파장 채널을 한꺼번에 증폭할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 많은 수의 채널이 파장다중화된 광신호를 기존의 광/전 변환방식으로 중계한다고 가정해 보자. 일단 역다중화하여 각 파장 채널을 분리하고 채널별로 각기 광/전 변환, 재생, 전/광 변환후 다시 파장 다중화하여 묶어 전송하는 복잡한 과정을 매 중계

기마다 반복해야 할 것이므로 채널 수가 많아지면 사실상 거의 불가능한 일이 아닐 수 없다. 반면에 직접 광증폭 방식을 사용하는 경우에는 각 채널별로 분리할 필요 없이 한꺼번에 증폭 중계할 수 있다. WDM 전송 시스템에 EDFA를 활용하는 최근의 실험 예를 살펴보면, NEC에서 132 파장 채널의 20 Gb/s 신호, 즉 2.6 Tb/s의 신호를 120 km 거리에 걸쳐 전송 실험한 결과를 보고하였다[1]. 이외에도 여러 연구기관에서 데라비트급 WDM 전송결과를 경쟁적으로 발표하고 있다[24,25]. 이러한 WDM 전송방식은 채널의 확장성이 뛰어나 앞으로의 대용량 전송의 주가 될 것으로 전망된다.

한편 EDFA를 WDM에 응용할 때 적용성을 높이기 위해서는 해결해야 할 문제점들이 있다. 우선 EDFA의 이득이 파장에 따라 균일하지 않아 여러단의 EDFA를 이어 사용할 때 파장 채널별 출력에 상당한 차이가 나게 된다. 에르븀 첨가 광섬유를 제조할 때 알루미늄을 함께 첨가함으로써 1540~1560nm의 파장범위에 걸쳐 비교적 평탄한 이득 스펙트럼을 얻고는 있지만 그래도 1dB 정도의 ripple이 여전히 존재하며 여러단의 EDFA가 사용되어야 하는 장거리 시스템에서 이를 등화(equalization) 시켜줄 필요가 있다. 채널간 이득의 불균일성 문제의 해결을 위하여 각 채널별로 송신기의 출력을 이득 특성에 맞추어 미리 보정해 주거나[26] Mach-Zehnder 간섭계를 사용하여 파장에 따른 손실을 조절하여 증폭이득을 동화시키는 방법[27]이 있다. 또한 매질의 특성이 서로 다른 플로라이드 에르븀첨가 광섬유와 실리카 에르븀첨가 광섬유 증폭기를 조합하여 동화시키는 방법 등이 발표되었다[28]. 광증폭기내에 장주기 fiber Bragg grating을 삽입하여 40 nm 이상의 이득 동화된 광섬유 증폭기에 대한 발표가 특히 주시할 만하다[29].

또 다른 문제점은 EDFA의 이득이 입력되는 모든 채널의 신호광 세기가 총합에 따라 변화하고 또한 포화된다는 점이다. 이 경우에 어느 한 채널의 세기 변화가 다른 채널의 이득에 영향을 줄 수 있다. 가입자용 WDM 시스템이나 packet switching 시스템에서는 가입자 채널 또는 packet이 무작위적으로 on-off 됨에 따라 EDFA에의 입력광 세기에 fluctuation이 있을 수 있으며 이 같은 현상은 각 채널 이득간의 cross saturation으로 나타난다. 그 변화가 비록 작다할지라도 많은 수의 EDFA를 이어 사용할 때에는 누적된 효과가 크게 나타난다. 채널간 cross saturation 문제의 해결을 위해 EDFA를 발진(lasing) 시키는 방법도 제안되었다[30,31,32]. EDFA로부터의 ASE 출력의 일부분을 입력단으로 궤환(feedback)시켜 EDFA가 레이저로서 발진하게 되면 homogeneous line broadening의 경향을 가진 에르븀의 특성상 신호광의 이득은 일정한 값에 고정되어 채널 상호간에 영향을 주지 않는다.

여러개의 파장을 한 광섬유와 광증폭기를 통해 전송하여 전송용량을 급격히 증가시키는 것과 유사한 방법으로 시간축으로 짧은 펄스의 신호를 주기적으로 지연시켜 전송속도를 효과적으로 증가시키는 방법인 시분할광다중화(Optical Time Domain Multiplexing)전송에 대한 연구결과도 주목할 만하다. 최근 NTT에서 10 Gb/s의 0.98 피코초 펄스를 40개의 다른 시간 지연을 주고 dispersion slope 보상광섬유를 함께 사용하여 400 Gb/s 의 시분할 광다중화전송을 보고하였으며[33], 또한 같은 기관에서 하나의 supercontinuum WDM 광원을 이용하여 10 Gb/s의 광신호를 10개의 다른 파장으로 다중화 시키고 시간적으로 10개 다중화하여 전체 1 Terabit/s의 전송실험 결과를 발표하였다[34].

3. 광 솔리톤 전송 시스템

광솔리톤(optical soliton) 전송은 광섬유의 색분산으로 인한 펄스폭 넓어짐을 광섬유내 비선형 효과로써 상쇄시킴으로써 초단펄스(수 ps 또는 그 이하 펄스폭)를 원래의 모양 그대로 유지한 채 장거리 전송할 수 있는 방식이다[35]. 솔리톤 효과에 의한 펄스압축의 원리를 그림 9에 나타내었다. 일반적으로 매질의 굴절률은 진행광의 강도가 커지면 제3차 비선형 광학효과에 의해 함께 증가하게 된다. 짧고 강한 광펄스가 광섬유에 입사되면 강도가 큰 펄스의 peak 부분과 강도가 작은 wing 부분이 겪는 굴절률에 차이

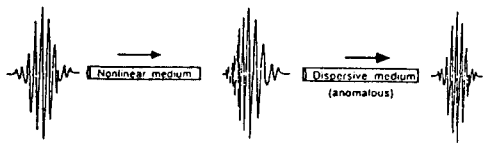


그림 9. 비선형 광학 효과에 의한 광펄스의 압축

가 있으며 이로 인하여 펄스 envelope 내에서 파장의 처핑이 발생한다. 만일 펄스의 중심 파장이 광섬유의 영분산 파장보다 긴 경우에는 단파장 성분이 장파장 성분보다 진행속도가 빨라 펄스가 광섬유를 따라 진행하는 동안에 압축되는 효과가 있게 된다. 광솔리톤 전송은 매질 분산에 의한 펄스 퍼짐을 이러한 비선형적인 펄스압축 효과로써 상쇄시키는 것인데, 펄스의 강도와 모양이 이상적인 솔리톤 펄스와 다소 차이가 있더라도 어느 정도의 범위 내에서는 스스로 안정적인 균형을 찾아가며 전송되므로 실용 가능성이 있는 전송기술이라 할 수 있다.

광솔리톤 전송에 필요한 비선형 효과는 광펄스의 강도가 충분히 클 때 일어날 수 있는 것이므로 광섬유의 손실로 인해 광 강도가 약해지면 그 효과를 얻을 수 없다. 따라서 적당한 거리 간격으로 손실을 보상해 주어 펄스강도가 솔리톤 전송에서 요구되는 일정 범위 내에서 유지되도록 해 주어야 한다. 솔리톤 전송의 기본 아이디어는 과거에도 있어 왔지만 손실 보상을 해줄 수 있는 실용적인 방법이 빈곤하여 별로 주목받지 못하다가 최근에 광섬유 증폭기술의 진보에 힘입어 실용가능성이 큰 전송기술로서 급격히 부상하게 되었다.

근래에 행해진 광솔리톤 전송 실험의 몇 가지 예를 들어보기로 한다. KDD에서는 20Gb/s 의 실제 data를 EDFA로써 솔리톤 강도를 유지시켜가며 9000km 이상의 거리에 걸쳐 전송실험한 결과를 보고하였다[36]. 이 실험에서는 DFB-LD를 gain switching하여 솔리톤 펄스열을 만들고 electro-absorption 방식의 변조기로써 10Gb/s의 광신호를 얻은 후, 광섬유 지연기를 사용하여 시간 지연시킨 후 합성하는 방법으로 시분할 광다중화 함으로써 20Gb/s의 변조된 솔리톤 광신호를 전송하였다. 또한 AT&T에서는 솔리톤 전송과 WDM 방식을 결합하여 2.5Gb/s 와 5Gb/s의 솔리톤 펄스열을 전송하는데 12채널(2.5Gb/s) 또는 8채널(5Gb/s)을 25GHz 채널 간격으로 WDM하여 10,000km 이상 전송하여 10^{-10}이하의 BER의 전송 품질을 얻은 결과를 발표하였다[37]. 이러한 결과들은 이전까지의 광솔리톤 전송 실험이 주로 변조되지 않은 광펄스의 장거리 전송실험에 불과했던 것과 비교하여 실제 data의 전송과 함께 거의 error-free의 BER 측정으로 전송 품질을 제고하는 단계에까지 발전한 것으로 앞으로 머지 않은 장래에 상용 시스템이 등장할 수 있을 것으로 예상된다.

IV. 결 론

지금까지 희토류 첨가 광섬유 증폭기의 광통신에의 응용에 관하여 EDFA를 중심으로 알아보았다. 희토류 첨가 광섬유 증폭기, 특히 EDFA는 광섬유의 손실이 최소인 1550nm 파장대에서 저잡음으로 높은 이득(> 30 dB)을 제공해 준다. 또한, 신호왜곡 및 상호 간섭이 적고, 편광의존이 없으며, 증폭 대역폭이 넓기 때문에 광통신으로 적합하다. 이러한 특성과 상용화된 레이저 다이오드를 사용하여 여기할 수 있고, 설계가 단순하다는 장점으로 인하여 EDFA는 현대 광통신 발달에 핵심 역할을 하고 있다. 또한, EDFA는 몇 개의 수동소자와 펌프 광원 그리고 저속 전자회로로 이루어져 있으므로 광통신시스템의 신뢰도 향상에도 크게 기여하고 있다. 따라서 광증폭기는 초고속 대용량으로 대변되는 현대의 광통신을 가능하도록 한 주역이며, 새로운 개념의 전광전송망의 가능성을 제시하고 있다.

참 고 문 헌

1. Y. Yano, T. Ono, T. Ito, H. Yamazaki, M. Yamaguchi, and K. Emura, ECOC'96, ThB3 (1996)
2. P. E. Green, J. Selected Areas in Comm., 14, pp. 764 (1996)
3. A. Mori et al., OFC'97 PD1 (1997)
4. Y. Sun et al., IOOC-ECOC'97, TH3C, 69 (1997)
5. 이상수, 한정희, 윤태열, 이창희, 심창섭, *대한전자공학회 논문지*, **31**, 697 (1994)
6. E. Snitzer, *J. Appl. Phys.*, **32**, 36(1961)
7. C. J. Koester and E. Snitzer, *Appl. Opt.*, 3, 1182 (1964)
8. J. Stone and C. A. Burrus, *Appl. Phys. Lett.*, **23**, 388 (1973)
9. N. S. Bergano et al., Optics & Photonics News, January, 8 (1993)
10. P. A. Leilabady, S. Vendetta, S. G. Grubb, G. Tremblay, and G. Maurer, ECOC '92 PD 19 (1992).
11. Y. Tashiro, H. Tachibana, A. Fujisaki, and H. Ogoshi, OFC'96 WA5 (1996)
12. S. G. Grubb et al., OFC'96, TuG4 (1996)
13. B. Clesca et al., IEEE Photon. Tech. Lett., 6, 509 (1994)
14. Y. Ohishi, T. Kanamori, and S. Sudo, OFC/IOOC'93, TuL5 (1993)

15. M. Yamada, M. Shimizu, Y. Ohishi, J. Temmyo, M. Wada, T. Kanamori, and S. Sudo, Optical Amplifiers and Their Applications'93, TuA1 (1993)
16. H. Suda, N. Tomita, S. Furukuwa, F. Yamamoto, K. Kimura, M. Shimizu, M. Yamada, and Y. Ohishi, Optical Amplifiers and Their Applications'93, PDP8 (1993)
17. K. Nakagawa, K. Aida, K. Aoyama, and K. Hohkawa, *IEEE Lightwave Transmission System* Feb. issue, 19 (1992).
18. P. S. Henry, OFC'93, Thk3 (1993)
19. J. C. Livas, OFC'96, PD4 (1996)
20. R. I. Laming, M. N. Zervas, and D. N. Payne, *IEEE Photonics Technol. Lett.* **4**, 1345 (1992).
21. R. I. Laming, A. H. Gnauck, C. R. Giles, M. N. Zervas and D. N. Payne, *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **4**, 1041(1992).
22. N. S. Bergano et al., OFC'96 PD23 (1996)
23. S. Akiba, Optical amplification and their applications'93, MB1 (1993)
24. H. Onaka et al., OFC'96, PD1 (1996)
25. A. H. Gnauck et al., OFC'96, PD20 (1996)
26. A. R. Chraplyvy, J. A. Nagel and R. W. Tkach, *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **4**, 920 (1992).
27. J. Y. Pan et al., IEEE Photon. Tech. Lett., 7, 1501 (1995)
28. M. Yamada et al., IEEE Photon. Tech. Lett., 8, 620 (1996)
29. P. F. Wysocki et al., OFC '97, PD2 (1997)
30. H. Okamura, *J. Lightwave Technol.*, **10**, 1110(1992).
31. J. Chung, S. Y. kim, and C. J. Chae, OFC'97, TuE5 (1997)
32. 박희갑, 한국광학회지, 8, 436 (1997)
33. S. Kawanishi et al., OFC'96, PD24 (1996)
34. T. Morioka et al., OFC'96, PD21 (1996)
35. N. J. Doran and K. J. Blow, *IEEE J. Quantum Electron.*, **19**, 1883(1983).
36. I. Morita et al. Photon. Tech. Lett., 8, 1573 (1996)
37. S. G. Evangelides et al. Photon. Tech. Lett., 8, 1409 (1996)

<정 영철 위원 >