

광섬유 증폭기술의 광통신 응용 전망

Prospects of Fiber Amplifier Technology in Optical Communications

박 회갑,* 이 재승, 심창섭

한국전자통신연구소

광섬유 증폭기술은 광통신에 있어서 직접 광/광증폭 방식으로 기존의 복잡한 광통신 중계기를 간단히 대체할 수 있는 혁신적인 기술이다. 광섬유 증폭기술과 그 시스템 응용기술의 지난 수 년간의 급속한 발전은 지난 1970년대 세계적으로 뜨거웠던 광섬유 기술개발 경쟁을 연상케한다. 이 기술이 지니고 있는 단순성과 함께 놀라운 특성들은 완전 광통신을 향한 중요한 돌파구를 마련하였으며, 미래의 통신시스템에 많은 가능성을 제시하고 있다. 본 고에서는 광섬유 증폭기술을 중심으로 광증폭 기술에 관하여 배설하고, 장거리 전송 시스템, 광가입자 시스템 등 각종 통신 시스템에의 응용연구 현황과 이로 인하여 활성화되고 있는 솔리톤 전송 등 첨단기술의 연구동향을 소개한다. ☞

은 연구자들이 완전 광통신(All-Optical Communication)에 관한 꿈을 가져 왔다. 정보전달의 출발점으로부터 종착점에 이르기까지 빛의 상태를 그대로 유지한 채 전송, 교환 및 신호처리를 수행함으로써 빛이 가지고 있는 고속 신호처리 능력, 병렬처리 가능성, 그리고 높은 주파수 대역의 엄청난 정보수용 능력 등을 충분히 활용할 수 있기 때문이다.

그런데 최근 이와 같은 꿈을 실현할 수 있는 기술상의 중요한 돌파구가 마련되었다. 이는 빛의 상태에서 바로 신호가 증폭되는 직접 광증폭 기술로서 이로써 완전 광통신이 허황된 것이 아닌 것으로 우리 앞에 한 걸음 다가오게 되었다. 특히 희토류 원소인 erbium이 도핑된 광섬유를 이용한 광증폭기술(이하 줄여서 '광섬유 증폭기술')은 지난 3여년간 실로 엄청나게 발전하여 그 발전 속도는 1970년대에 이루어졌던 세계적인 광섬유 기술개발 경쟁을 연상케 한다.

이 기술 특유의 단순성은 이를 이용한 통신 시스템의 실용화를 상상하기에 별 부담이 없다. 한 예로서 단일 중계기에서 수신광신호를 광/전 및 전/광 변환없이(그리고 이에 수반되는 전기적 잡음 추가 없이) 직접 광/광 증폭하여 중계할 수 있다면 기존의 광중계기는 매우 단순화되고 경제적인 것이다. 또한 앞으로의 광 LAN, 광대역망 등 고도화된 광통신망에서 선로의 많은 분기(branch)로 인해 발생하는 광손실을 이러한 광증폭으로 보상해줄 수 있기 때문에 광증폭기술은 완전 광통신으로 향하는 매우 중요한 첫 걸음이 될 수 있는 것이다.

본 고에서는 광섬유 증폭기술을 중심으로 광증폭 기

1. 서 론

광통신 기술이 새로운 전환기를 맞이하고 있다.

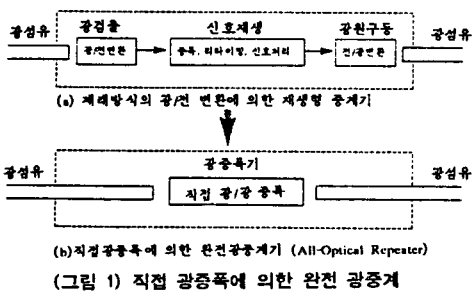
광통신은 지난 20여년간 정보시대를 창출하는 주역으로서 비약적인 발전을 거듭하여 왔다. 그러나 현재에 이르기까지 실용화된 광통신 기술은 빛이 전자에 비해 갖고 있는 장점들을 제대로 살리지 못하고 있다. 예로서 기존의 광통신 중계방식을 보면 광/전 변환에 의한 재생형(regenerative) 중계방식이라 할 수 있다. 즉 장거리 구간에서 전송로(광섬유)의 손실을 보상해 주기 위해 중계기에서는 약화된 수신 광신호를 광검출기로서 전기신호로 변환하고 전기적으로 증폭 및 리타이밍(retiming) 등 재생과정을 거쳐 다시 광신호로 변환하여 재송신한다. 이러한 광/전, 전/광 변환과정과 전기적 증폭/재생 과정에서 빛이 가지고 있는 여러 특징적인 장점들이 충분히 활용되지 못하고 유실되었던 것이다. 이러한 점에서 광통신 연구의 초기 단계로부터 많

술에 관하여 해설하고, 장거리 전송 시스템, 광가입자 시스템 등 각종 통신 시스템에의 응용연구 현황과 이로 인하여 활성화된 솔리톤 전송기술 등 첨단기술의 연구 동향을 소개하고자 한다.

II. 직접 광증폭 기술

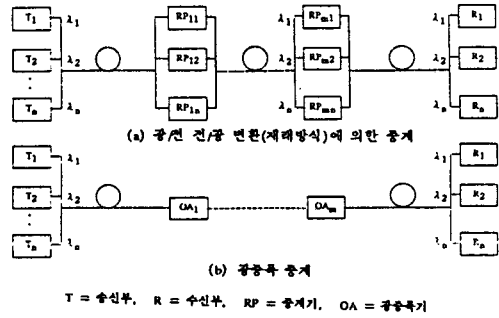
1. 직접 광증폭의 장점

무엇보다도 직접 광증폭 기술의 장점은 복잡한 광/전 및 전/광 변환을 거치지 않으므로 시스템을 단순화할 수 있다는 데 있다. 즉, (그림 1-a)는 기존의 광/전 변환과정을 거치는 중계방식으로서 (그림 1-b)와 같이 광증폭기를 이용할 경우 전체 시스템이 매우 단순해짐을 알 수 있다. 특히 미래의 광전송 시스템에서 전송용량의 증대를 위해 파장분할 다중화(WDM)나 광 주파수분할 다중화(광FDM) 방식의 도입이 예상되는데 광증폭 방식에서는 이러한 다중 채널을 한꺼번에 증폭해낼 수 있다. 이로 인해 얻어지는 시스템의 단순화는 (그림 2)에서와 같다. (그림 2-a)는 다중 채널에 대한 기존의 광/전 변환방식을 거치는 중계방식을 나타내고 있는데, WDM(또는 광 FDM)으로 다중화된 여러 채널을 기존 방식으로 중계 전송하려면 이를 역다중화하여 각 채널 별로 분리하고 각기 광/전, 신호재생, 전/광 변환과정을



(그림 1) 직접 광증폭에 의한 완전 광중계

거친 후 다시 다중화하여 전송하는 복잡한 과정을 매 중계기에서마다 반복하여야 한다. 반면에 (그림 2-b)와 같이 광증폭기를 중계기로서 사용할 경우에는 다중화/역다중화와 광/전 전/광 변환과 신호 증폭 및 재생 등 일체의 과정이 불필요하며 하나의 광증폭기로서 대체가 가능하다. 이러한 시스템의 단순화는 궁극적으로 시스템의 신뢰도와 경제성의 문제로 직결됨은 말할 것도 없다.



(그림 2) WDM(또는 광FDM) 시스템에서의 중계방식

그 뿐만 아니라 직접 광증폭 방식은 전송속도(bit-rate)나 광변조 방식(ASK, FSK, PSK 등)에 무관하게 광신호를 왜곡없이 증폭해내는 장점을 가진다. 특히 광섬유 증폭기는 광섬유로 이루어진 증폭소자이므로 광섬유가 가진 고속전송 능력을 그대로 유지하며 전송용 광섬유와의 결합손실이 무시될 수 있고 최소한 수 Mb/s로부터 수십 Gb/s에 이르기까지 전송속도에 관계없이 균일한 증폭특성을 가진다(1). 따라서 이러한 특성은 시스템의 전송속도나 다중화 채널수 등 수용능력을 단계적으로 확장해 나가고자 할 때 절대적으로 유리하다. 기존의 중계방식을 생각해보면 전송속도가 바뀌거나 채널을 증설하고자 할 때 중계장치들을 완전히 대체하지 않고는 사실상 불가능하나, 광증폭 중계방식에서는 광증폭 중계기를 그대로 둔 채 단극만의 교체에 의해 시스템을 확장할 수 있다.

또한 광증폭 방식은 광신호의 검파방식이 직접검파이거나 혹은 코히런트검파이거나에 구애받지 않고 적용이 가능한 장점을 가지고 있다. 특히 차세대 광통신 기술로서 주목되고 있는 코히런트 방식(특히 광FDM)에서 기존의 광/전 변환식 중계기는 그 요구조건이나 복잡성에서 실로 엄청나서 광증폭 중계방식의 활용 없이는 사실상 실용화가 불가능하다. 최근에는 코히런트 전송방식과 광증폭 방식의 결합에 의해 광통신 기술이 빠른 진보를 나타내고 있다(2).

2. 광증폭 방식간 비교

통신용으로서 거론되었던 광증폭 기술을 크게 나누면 반도체레이저 광증폭기술과 광섬유 증폭기술로 대표된다.

일반적으로 반도체레이저 광증폭기는 반도체레이저

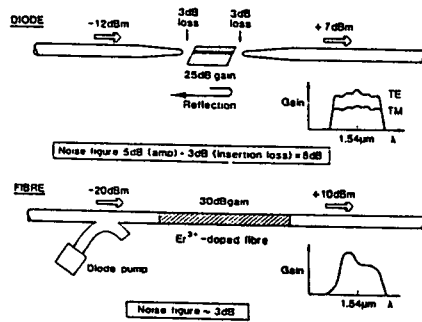
의 구조를 거의 그대로 사용하며 유도증폭의 원리도 동일하다. 다만 공진기의 단면에 무반사막을 입혀 단면 반사율을 최소한으로 줄임으로써 공진기의 형성을 막아, 레이저 공진파장 이외의 넓은 파장 대역에 걸쳐 균일하게 광증폭이 이루어질 수 있도록 한 것이다. 반도체레이저 기술의 발전과 함께 반도체레이저 광증폭 기술도 함께 발전하여 시스템 응용연구가 활발히 이루어져 왔다(3). 그러나 최근에 희토류 원소인 erbium을 광섬유 코어에 도핑하여 1500nm 대역의 광통신 파장대에서 광증폭기 동작을 성공시킴으로써 이 분야의 연구 판도에 큰 변화가 일게 되었으며 광통신 연구자들의 관심이 집중되었다(4).

(그림 3)은 반도체레이저 증폭기와 광섬유 증폭기의 일반적인 특성을 그림으로 비교한 것이다. 우선 반도체레이저 증폭기는 칩 상태의 광이득(optical gain)이 20-30dB정도 되나, 광섬유와의 결합손실을 감안할 때 대개 20dB이하의 순이득을 가진다. 그리고 칩과 광섬유의 단면에서 반사광의 일부가 앞단의 광증폭기로 역류했을 때 잡음광으로서 원하지 않는 잡음 증폭이 이루어지고, 이렇게 증폭된 잡음광이 여러단에 걸쳐 누적될 때 광증폭기를 포화시킬 수 있다. 또한 광증폭기 이득이 입력광의 편광상태(TE 또는 TM)에 따라 3-5dB 이상 차이가 나서 광증폭 시스템 설계에 큰 제한요인이 되는 단점이 있다. (최근에는 편광특성이 개선된 새로운 구조의 반도체 광증폭기가 제안되고 있다.) 반면에, 광섬유 증폭기는 전송 광섬유와 융착접속할 때에 결합손실이 매우 적어서 반도체 증폭기에 비해 10dB 이상 큰 순이득을 얻을 수 있으며, 단면 반사물 무시할 수 있어서 역류하는 잡음 광의 증폭 및 누적의 문제가 없다. 또한 입력광의 편광상태와 무관한 증폭 특성을 나타내므로(5) 시스템 설계시 제한 요인이 적고 구성이 단순하며 편리하다.

두 방식의 최저 잡음지수(noise figure)를 비교하면, 반도체레이저 증폭기에서는 칩 고유의 잡음지수(~5dB)외에 입력단에서의 삽입손실(~3dB)까지 고려되어야 하는데 비하여 광섬유 증폭기에서는 980nm 파장의 펌프광원을 사용할 경우에 불과 3dB(이론치)에 지나지 않는다. 따라서 광섬유 증폭기는 단순히 광증계기로서뿐 아니라 저잡음의 전치 광증폭기(optical pre-amplifier)로서도 매우 우수한 특성을 가진다.

두 방식을 종합적으로 비교할 때에, 전송 분야에서는

광섬유와의 광결합이 용이하고 증폭 특성에서 장점이 많은 광섬유 증폭기가 널리 활용될 것으로 전망된다. 다만 교환분야에서는 공간/시간 영역에서 광스위칭할 경우에 많은 분기로 인한 광손실을 보상하기 위해 광증폭기가 필요한 데, 이 경우에는 반도체 광스위치의와의



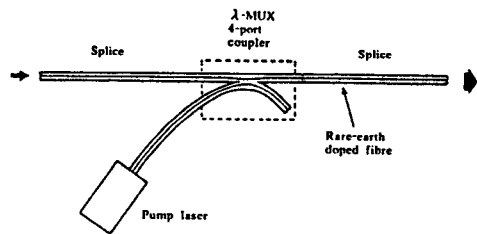
(그림 3) 반도체레이저 증폭기와 광섬유 증폭기의 특성 비교

집적화 가능성이 큰 반도체레이저 광증폭 기술이 활용될 가능성이 크다.

III. 광섬유 증폭 기술

1. 기본 원리

독자의 이해를 돕기 위하여 우선 광섬유 증폭기가 사용되는 여러가지 방식을 (그림 4)에 나타내었다.

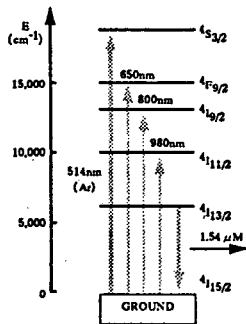


(그림 4) 광섬유 증폭기의 기본 형태

(그림 4)에서 빗금친 부분이 광섬유 증폭기의 핵심부분인 erbium이 도핑된 광섬유로서 1540nm 부근의 파장을 갖는 신호광이 이곳을 지나는 동안에 유도적으로 증폭이 이루어진다. 광증폭에 필요한 에너지의 공급을 위하여 광펌핑을 하는데 별도의 펌프광원이 필요하다. erbium 광섬유에 신호광과 펌프광을 함께 입사시키기

위하여 방향성 광섬유 결합기 (directional fiber coupler)를 사용한다. 이 때 방향성 광섬유 결합기는 펌프광 파장과 신호광 파장에서 각각 결합률과 투과율이 높도록 특별히 고안된 이색성(dichroic) 결합기가 바람직하다. 방향성 결합기의 또 다른 입력부와 erbium 광섬유의 출력부는 각각 전송 시스템으로부터의 광섬유와 영구접속함으로써 결합손실과 반사광을 최소화할 수 있다.

광섬유 증폭기의 원리는 기본적으로 erbium을 레이저 매질로하는 레이저의 원리와 같다(6). (그림 5)는 유도증폭작용을 나타내는 erbium의 주요 에너지 준위를 나타낸 것이다. 광펌핑을 하면 전자들은 펌프 파장에 해당하는 에너지를 받아 기저상태(ground state)로부터 흥분상태(excited state)로 여기된다. 그러나 대부분



(그림 5) 유도증폭 작용과 관계된 erbium의 주요 에너지 준위

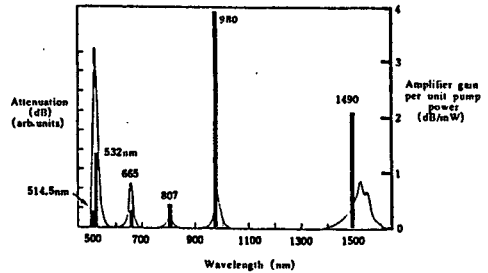
의 흥분상태 에너지 준위들은 안정되지 못하여 전자들이 낮은 에너지 상태로 천이하다가 준안정상태(meta-stable state)인 $4I_{13/2}$ 준위에 머물게 된다. 이 때 기저상태와의 에너지 차이에 해당하는 $1.54\mu\text{M}$ 파장의 빛이 매질내로 입사되면 유도적으로 광증폭이 이루어진다.

펌프광원의 파장은 (그림 5)의 각 에너지 준위의 흡수 파장대역과 일치되어야 높은 펌핑효율을 기대할 수 있다. 그러나 모든 흡수 파장대역에서 높은 효율을 얻을 수 있는 것은 아니다. 예로서 파장 514nm(Ar-ion 레이저 파장)대역에서 가장 흡수가 크다. 그러나 이 파장의 빛은 준안정 상태에 머무르고 있는 전자들 다시 제 3의 흥분상태로 여기시키는 ESA(Excited-State Absorption) 현상을 일으켜서 실제로 증폭에 기여하는 펌핑 효율은 매우 낮다. 이러한 점에서 펌프광 파장의 선택은 매우 중요하다. (그림 6)은 erbium 광섬유의 흡수 스펙트럼 (실선)과 함께 여러 흡수 파장 대역의

실제 펌핑 효율(막대)을 나타낸 것이다.

광섬유 증폭기의 펌프 파장으로서 980nm와 1490nm의 두 파장 대역이 유망하며 각기 장단점을 가지고 있다(7). 1490nm 대역은 효율이 $\sim 2\text{dB/mW}$ (1mW 펌프 광전력 증가시 2dB 이득 증가) 정도로 비교적 높고, 이미 알려진 기술로 제조된 InGaAsP/InP 계열의 LD를 사용할 수 있다는 점에서 편리하다. 또한 신호광 파장과 근접하여 신호광과 같은 기본모드로 증첩되어 함께 진행하므로 효율적인 증폭이 이루어질 수 있는 장점이 있는 반면에 펌프광과 신호광을 분리하기 어려운 단점도 있다.

펌프파장 980nm에서는 4dB/mW 이상의 높은 펌핑



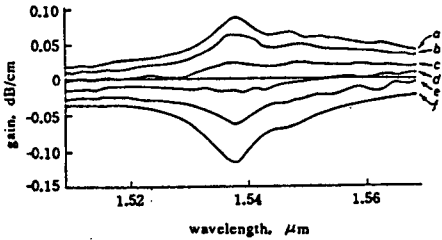
(그림 6) Erbium이 도핑된 광섬유의 흡수 스펙트럼 (실선)과 광펌핑 효율(막대)

효율이 보고되고 있으며 최저 잡음지수(noise figure) 면에서 3dB 정도로서 1490nm 대역의 5dB에 비하여 우수한 이상적인 펌프파장 대역이다. 그러나 아직 980nm 파장의 고효율 LD가 상용화되어 있지 않은데, 현재 일본 동지의 연구실에서 InGaAs/GaAs계의 strained quantum well 구조를 이용하여 좋은 결과를 얻고 있으므로 조만간 상용이 가능할 것이다(8).

2. 증폭 특성

(그림 7)은 광섬유 증폭기의 펌프 광전력과 파장에 따른 이득의 변화를 측정한 예인데 1540nm 대역의 파장에서 최대이득을 나타낸다(9). 주목할 사항은 펌프 광전력의 크기에 따라 이득을 가지기도 하고, 또는 손실 즉 부의 이득(negative gain)을 갖기도 하는 점이다. 그 이유는 (그림 5)에서 본 바와 같이 증폭 파장이 매질의 흡수 대역과 일치하기 때문이다. 따라서 펌프광이 존재하지 않을 때는 증폭파장에서 오히려 강한 흡수가 일어나 광손실로서 나타나며, 펌프 광전력이 증가하

면 유도증폭 작용에 의해 흡수 손실이 일부 보상되므로 손실이 감소하다 펄스 광전력이 어느 문턱치를 넘어서면 비로소 이득을 가지게 된다.

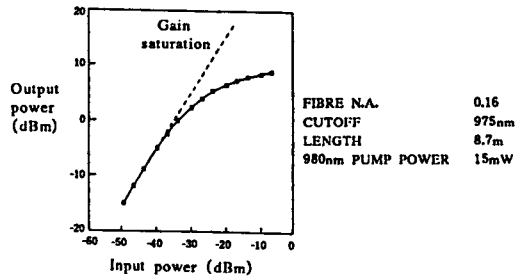


(그림 7) Erbium 광섬유 증폭기의 펄스광전력과 파장에 따른 이득변화(9) 펄스광 전력 a 100mW, b 30mW, c 10mW, d 3mW, e 1mW, f 0mW

한편, 증폭기로서의 erbium 광섬유의 길이에도 최적 길이가 존재한다. 펄스광은 erbium 광섬유를 따라 진행하면서 흡수되어 광전력이 감소하므로 광섬유의 길이가 특정 길이를 넘어서면 증폭된 신호광이 오히려 다시 흡수되어 이득이 감소하는 결과를 얻게 된다. 따라서 erbium 광섬유 길이의 최적화가 반드시 필요하다(10).

광섬유 증폭기 입출력 특성의 한 예(그림 8)에 나타내었다. 그림의 예는 980nm 펄스광을 15mW 입사했을 때의 증폭 특성으로서 소신호 증폭시에 30dB 이상의 이득을 가지며 광출력 8.5dBm에서의 양자 효율은 44%에 이른다. 광출력이 0dBm을 넘어서면 포화에 의해 이득이 다소 감소함을 나타내고 있다. 일반적으로 다중채널 증폭시에 광증폭기의 이득 포화 영역에서 동작시키면 한 채널의 출력 변화가 다른 채널의 이득에 영향을 주어 채널간 누화(crosstalk)를 발생시키는데 반도체레이저 증폭기의 경우에 심각하다. 그러나 광섬유 증폭기의 경우에는 실제적으로 누화의 문제가 없다는 점이 큰 장점이다(11). 그 이유는 레이저 작용을 일으키는 두 에너지 준위 중 상위 준위에 전자가 머무르는 평균시간(life time)이 ~10ms 정도로서 다른 어느 매질에 비해서도 매우 길다(반도체레이저의 경우에 ~10ps). 또한 상위 에너지 준위의 전자밀도가 고갈되었을 때 정상상태로의 회복시간도 이와 비슷한 정도로 매우 길다. 따라서 다중채널 증폭시에 신호의 변조속도가 회복속도

에 비해 매우 빠르면(전송속도 100kb/s 이상) 이득 포화상태에서도 각 채널의 증폭률이 전반적으로 감소할 뿐 누화는 무시될 수 있다. 한편 긴 life time은 이 에너지 준위의 에너지 저장 용량이 매우 큼을 의미하므로 펄스광의 강도에 잡음이 있더라도 life time에 비해 매우 짧은 시간에 발생한다면 실제적으로 증폭특성에 영향을 주지 않는다. 심지어는 펄스광으로서 MHz 이상의 높은 반복율로 모드락킹된 펄스 광원을 사용하더라도 무방하다(12).



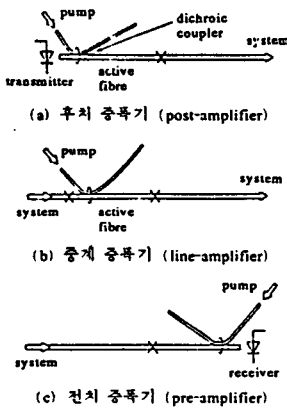
(그림 8) Erbium 광섬유 증폭기의 입출력 특성

IV. 통신 시스템 응용

1. 응용 방식

광섬유 증폭기를 여러가지의 형태로 사용할 수 있는데 대표적인 방식을(그림9)에 나타내었다(6). (그림 9-a)와 같이 광송신기에 바로 이어서 후치 증폭기(post-amplifier)로 사용하면 광출력의 booster로서 사용할 수 있다. 광송신부에서의 광출력을 광섬유 증폭기의 포화 광출력(~10dBm)에 가까운 정도까지 증폭하여 송신한다면 중계거리를 대폭 늘릴 수 있을 것이며, 가입자망이나 분배망에서 분기에 의한 광손실을 미리 보상해 줌으로써 개개 가입자 단말기에 충분한 광전력을 공급할 수 있다. (그림 9-b)는 광섬유 증폭기를 중계기로서 사용하는 방식이다. 앞에서 설명하였듯이 광증폭 방식은 전송속도나 광변조 방식에 관계없이 적용 가능하므로 전송 시스템을 고급화하기 위해서는 중계기는 그대로 두고 단국장치만 교체하면 된다. 또한 광섬유 증폭기는 높은 증폭률과 매우 낮은 잡음지수 때문에(그림 9-c)와 같이 광수신부의 전치 증폭기(pre-amplifier)로서도 매우 유용하다. 이 경우에는 펄스광의 주입방향을 신호광의 진행방향과 반대로 하여 수신기를 강한 펄스광

으로부터 보호한다. 이같은 방식으로 전치증폭기로서의 광섬유 증폭기와 PIN-PD의 조합에 의해 기존의 APD(Avalanche Photo-Diode)의 성능을 크게 증가하는 광수신기를 구성할 수 있는데, 실제로 광섬유 증폭기를 pre-amp로 사용했을 때의 수신감도가 코히런트/헤테로 다인 방식으로 얻은 결과에 거의 접근하고 있다. 증계기로서나 optical preamp로서의 광섬유 증폭기는 전송속



X = 광섬유 연결 결합부

(그림 9) 통신 시스템에서 광섬유 증폭기 활용방식

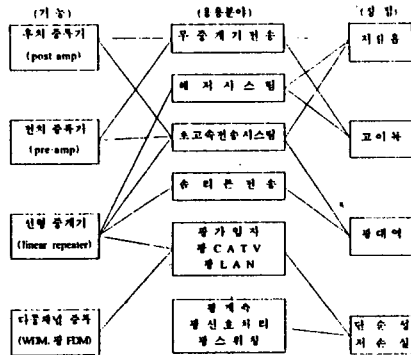
도가 높아질수록 그 장점이 돋보인다. 전기적 증폭시에는 전송속도가 증가하면 잡음 대역폭도 증가하여 SNR을 높인데 많은 노력이 필요하나 광증폭 방식에서 추가되는 잡음은 전송속도와 무관하기 때문이다. 실제로 광섬유 증폭기를 통신 시스템에 응용할 경우에 이상의 3가지 방식을 병행함으로써 장점을 극대화시킬 수 있다.

2. 장거리 고속 전송 - 완전 광증계 시스템

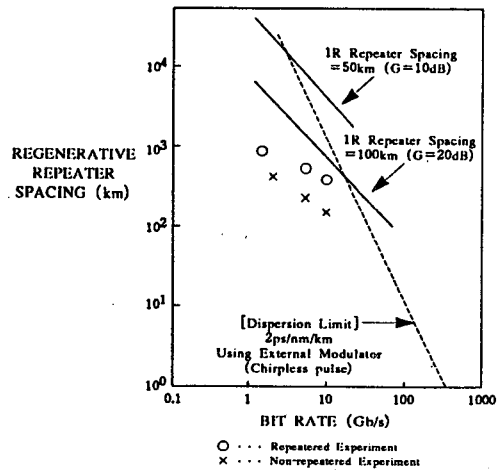
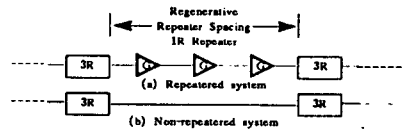
광섬유 증폭기술의 장점과 응용분야를 요약하여 <표 1>에 나타내었다. 그 중 가장 중요한 응용분야는 단순화된 완전광증계기(all-optical repeater)로의 응용일 것이다.

이상적인 증계기를 3-R(Reshaping, Regeneration, Retiming)의 기능이 모두 이루어지는 것이라 할 때 광섬유 증폭방식의 광증계기는 1-R(Reshaping)만이 이루어지는 선형증계기(linear repeater)라 할 수 있다⁽¹³⁾. 선형증계기에서는 광증폭에 의해 광손실은 보상되나 잡음과 지터(jitter)는 여러 증폭단을 거치면서 누적되어 시스템의 제한요인이 된다. 1-R 방식의 선형 증계기를

<표 1> 광섬유 증폭 기술의 기능과 응용분야



무제한으로 연결할 수 없으며 적당한 간격마다 3-R 증계기에 의해 신호를 재생하고 리타이밍하여 누적된 잡음과 지터를 일소해 주어야 한다. 따라서 3-R 증계기간 내에 몇개의 1-R 증계기가 들어갈 수 있는냐가 시스템 설계시에 중요한 고려사항이 된다. 특히 해저 전송에서는 경제성과 신뢰도 측면에서 증계기(3-R) 간격이 매우 중요하다. (그림 10)은 광섬유 증폭기를 1-R 증계기로 사용하는 경우에 3-R 증계기(기존방식의 regner-



(그림 10) 광섬유 증폭방식(1-R)을 사용하는 경우의 재생형(3-R) 증계기 간격⁽¹⁴⁾

(송신 광출력 = 1mW, 광섬유 손실 = 0.2dB/km.

SNR = 22.5dB (BER = 10⁻¹¹), NF = 7dB)

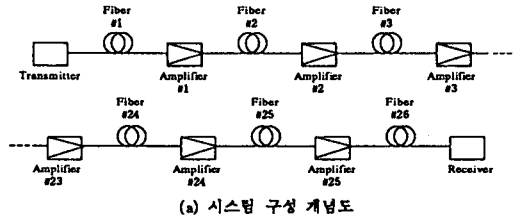
ative repeater)의 가능한 최대 간격을 이론적으로 예측한 것이다.⁽¹⁴⁾ 그림의 결과로부터 예를 들면, 1Gb/s 전송속도에 1-R중계기 (광섬유 증폭기) 간격을 50km로 할 경우에 3-R 중계기 간격은 10,000km 이상이 된다. 이는 극단적으로 이상적인 경우를 가정한 것이기는 하지만 3-R 중계기 없이(즉 regeneration 없이) 광섬유 증폭기의 연결만으로 태평양 횡단도 가능하다는 계산이다.

실제로 광섬유 증폭기를 선형중계기로 사용한 최근의 장거리 전송실험 결과는 놀랄만한 것이었다. <표 2>는 일본, 미국 등의 주요 연구기관에서 행한 광섬유 증폭방식의 장거리 전송시험 내용중 몇가지를 정리한 것이다.⁽¹⁵⁻¹⁸⁾ 특히 일본의 NTT와 KDD가 경쟁적으로 장거리 전송시험을 해왔다. KDD에서 '89년에 기존방식의 중계기 없이 12단의 광섬유 증폭기를 연결하여 1.2Gb/s의 전송속도로 904km 전송하였으며,⁽¹⁵⁾ 이어서 NTT에서 1990년초에 25단의 광섬유 증폭기로서 2.5Gb/s, 2,200km 전송시험에 성공하였다⁽¹⁷⁾. 비록 실험실내에서 좋은 실험조건들의 결합에 의해 얻어진 결과이기는 하지만 기존방식의 중계기 없이 매우 간단한 선형 광증폭만으로 이처럼 장거리 전송이 가능

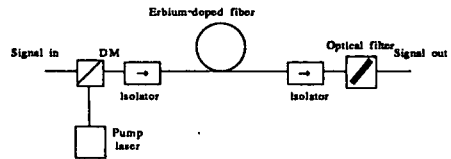
<표 2> 광섬유 증폭방식을 활용한 장거리 고속전송 시험 예

연구기관	KDD ⁽¹⁵⁾	NTT ⁽¹⁶⁾	NTT ⁽¹⁷⁾	Bellcore ⁽¹⁸⁾
전송속도	1.2Gbit/s	5Gbit/s	2,100Gbit/s	11Gbit/s
전송거리	904km	201km	2,223km	297km
광섬유 증폭단수	12	post amp와 pre amp 10번 활용	25	2
신호광파장	1536nm	1536nm	1536nm	1536nm
펌프광파장	1.16~1.49 μm	1.48 μm	1.48 μm	0.53 μm
광학 이득이득	20.3dB	31dB	41dB	40dB
섬유종류 (전송용)	dispersion shifted fiber	일반광섬유	dispersion shifted fiber	dispersion shifted fiber
발표시기	ECOC '89	ECOC '89	OFC '89	ECOC '89
특기사항	광증폭 penalty 0.6dB	수직 편광(중계기) 및는 무중계기 전송 External modulation	외이진 펄스 변조 CPFSK 변조	Clock recovery External modulation

할 수 있었다는 것은 광증폭 방식의 1-R 중계기가 현실적으로 충분한 가능성과 타당성을 지니고 있음을 보여 주었다고 할 수 있다. 참고로 <표 2>에서 NTT의 2,200km 전송실험 내용을 살펴보면 (그림 11)과 같다. 파장 1.5542 μm의 DFB-LD 광원을 2.488Gbit/s의 전송속도 CPFSK 방식으로 코히런트 광변조하여 송신하였으며, 평균거리 약 80km 마다 총 2,223km에 걸쳐 25개의 erbium 광섬유 증폭기를 사용하여 전송하였다. 그 결



(a) 시스템 구성 개념도



(b) 사용된 광섬유 증폭기 구조 개념도

(그림 11) 광섬유 증폭방식의 초장거리 고속전송 시험 예

(NTT)⁽¹⁷⁾ (광섬유 증폭 단수 = 25, 용연장 = 2,223km)

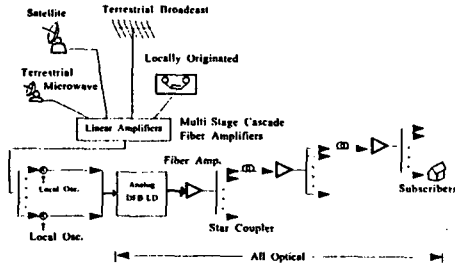
과로 440dB의 광학적 이득과 -42dBm의 수신감도를 얻었다. 이때 광섬유 증폭기에서는 잡음광의 역류, 증폭 및 누적을 막기위하여 광 isolator와 광 필터가 사용되며 펌프 광원으로서 1.48 μm의 고출력 LD가 사용되었다.

최근 영국의 BTRL에서는 에딘버러(Edinburgh)와 뉴캐슬(Newcastle) 사이의 200km 구간에 두개의 광섬유 증폭기를 써서, DPSK 및 FSK 방식으로 각 채널의 전송속도가 622Mb/s인 2채널 전송장치의 현장시험에 성공하였다.

3. 광가입자 시스템

한편 광섬유 증폭기기술은 가입자용 광통신 시스템에도 적용되고 있다. NTT에서 구상중인 비디오 분배 시스템의 예를 (그림 12)에 나타내었는데,⁽¹⁹⁾ 이 시스템에서는 광섬유 star coupler를 통하여 여러 채널의 광신호를 분배한 후, 약화된 광신호를 erbium 광섬유 증폭기로 광증폭하여 다시 분배/증폭을 반복하는 방식으로 사실상 거의 무한에 가까운 수의 가입자에게 광신호를 분배·공급할 수 있다. NTT에서는 이미 6단의 광섬유 증폭기와 star coupler를 사용하여 애널로그 AM-및-FM FDM 비디오 분배 시스템을 시범한 바 있다⁽¹⁹⁾. Bellcore에서도 최근 100채널의 FM-TV 신호와 6채널의 662Mb/s 신호를 고밀도 WDM으로 다중화하여 가입자에게 분배 전송하는 시스템 실험결과를 보고한 바 있는

대, 이 실험의 핵심 부분으로서 역시 광분배 손실 보상을 위한 광섬유 증폭기들이 사용되었다(20).



(그림 12) 비디오 분배용 광가입자 시스템에서의 광섬유 증폭방식 활용 예(NTT)(19)

4. 초대용량 전송을 위한 새로운 시도 - 솔리톤 전송

광통신 기술은 광섬유 고유의 손실(loss)과 분산(dispersion)에 의해 주어지는 한계를 극복하면서 발전하여 왔다고 할 수 있다. 여기서 분산이란 광섬유내로 광신호가 진행할 때 진행 모드간 또는 파장간에 진행 속도가 다른 것을 의미하는데 이로 인해 신호가 왜곡되므로 전송능력(전송속도×거리)이 제한된다.

초기의 다중모드 광섬유 시대의 광통신은 주로 분산(모드간 분산)에 의해 제한되다가 단일모드 광섬유가 나오자 손실에 의해 제한되었다. 이후 광통신이 Gb/s 급으로 고속화하자 다시 분산(색분산) 제한이 되었으며, 이는 DFB-LD 등 좁은 선폭의 광원과 분산특성이 최적화된 광섬유의 개발로 다시 극복되어 손실제한 상태에 이르렀다. 최근의 광섬유 증폭기술의 출현은 광섬유 손실의 문제에 중지부를 찍고 분산제한으로 다시 문제의 성격이 바뀌게 되었다. 그러나 이것도 완전광통신으로 가는데 넘어야 할 두개의 큰 장벽 중 하나의 돌파구를 연 것에 불과하다. 이제 많은 과학자들의 관심은 이상적인 완전 광통신기술로 밀려어지는(분산의 문제도 중지부를 찍을 수 있는)솔리톤 전송 기술에 모아지고 있다.

솔리톤 전송이란 광섬유내 광학적 Kerr 효과라는 비선형 효과에 의해 분산을 보상함으로써 초단 광펄스(수 ps 또는 그 이하의 펄스 폭)를 그 모양 그대로 유지한 채 장거리 전송할 수 있는 기술이다(21). 이때의 비선형 효과는 광펄스의 강도가 충분히 클때 일어나는 것이므로 광섬유의 손실로 인해 광강도가 약화되면 효과를 얻

을 수 없다. 따라서 전체 광섬유를 구간별로 나누어 주기적으로 손실을 보상하여 강도를 유지해 주어야 한다. 솔리톤 전송의 기본 아이디어는 과거에도 있어 왔지만 손실보상을 해결 수 있는 실용적인 방법이 빈곤하여 그다지 빛을 보지 못하였다. 기껏해야 부피가 큰 고출력 레이저를 이용한 Raman 증폭방식을 사용하였으나 통신 시스템에 사용하기에는 거리가 먼 것이었다. 그러나 실용적이며 단순한 광섬유 증폭기술에 힘입어 주목을 받기 시작하였다.

최근 행해진 솔리톤 전송실험 결과와 그 발전속도는 실로 눈부시다. 몇가지 예를 들면, AT&T Bell Lab에서 동가적으로 6,000km에 상당하는 거리에 걸쳐 수 ps의 초단 광펄스를 왜곡없이 전송한 결과를 보고하였다(22). 또한 NTT에서는 20Gb/s의 전송속도로 솔리톤 펄스증폭 및 전송실험을 하였으며(23) 여러 파장의 동시전송도 행하였다. 이밖에도 영국의 BTRL에서 20Gb/s, 100km 전송시험 결과를 보고한 바 있다(24).

솔리톤 전송기술은 아직 가능성 연구 단계이기는 하나 광섬유 증폭기술에 힘입어 중요한 돌파구가 마련됨으로 인하여 광섬유가 가지고 있던 재래의 전송한계를 극복한 완전 광통신 기술로서 앞으로 비약적인 발전이 기대된다.

V. 결 론

이상과 같이 광섬유 증폭기술에 관하여 살펴보았다. 이 분야의 연구개발이 본격화된 것이 불과 수년전이나, 현재의 상태는 그 타당성과 가능성이 충분히 확인된 단계라 할 수 있겠다. 앞으로 장거리 고속전송, 해저전송, 광가입자 시스템, 그리고 솔리톤 전송 등 미래의 광통신 시스템에 지대한 파급 효과를 나타낼 것으로 기대된다. 또한 차세대 광통신 방식인 광FDM 등 코히런트 광전송기술과 결합하여 광통신이 지니고 있는 최대의 전송능력을 발휘할 수 있을 것이다. 이 분야의 발전속도가 너무 빠른 점이 앞날의 구체적인 예측을 어렵게 하고 있으며 연구가 계속되면 많은 실제적인 문제와 또 다른 가능성이 기다리고 있을 것이다.

< 참고 문헌 >

1. R. S. Vodhanel and R. I. Laming, "AM and FM Response of an erbium-doped fiber amplifier for modulation frequencies up to 15GHz", Proc. of ECOC '89, paper TuA5-4, 1989.
2. M. Shibutani, I. Cha, S. Yamazaki, M. Kitamura, and K. Imura, "10 channel simultaneous optical amplification for expansion of coherent FDM broadcasting system", Proc. of IOOC '89, paper 21B4-5, 1989.
3. N. A. Olsson, "Lightwave system with optical amplifier", J. Lightwave Technol., vol. 7, pp.1071, 1989.
4. R. J. Mears, L. Reekie, I. M. Jauncey, and D. N. Payne, "Low-noise erbium-doped fiber amplifier operating at 1.54 μ m", Electron. Lett., vol. 23, pp. 1026, 1987.
5. M. Suyama, K. Nakamura, S. Kashiwa, and H. Kuwahara, "Polarization-independent gain of Er-doped fiber amplifier under single-mode pumping", Proc. of IOOC '89, paper 20A4-3, 1989.
6. P. Urquhart, "Review of rare earth doped fiber laser and amplifiers", IEE Proc. vol. 135, pp. 385, 1988.
7. W. L. Barnes, P. R. Mo, L. and D. N. Payne, "High-quantum-efficiency Er fiber lasers pumped at 980nm", Opt. Lett., vol. 14, pp. 1002, 1989.
8. M. shinmizu, M. Horiguchi, M. Yamada, I. Nishi, S. Vehara, J. Noda, and E. Sugita, "Compact and highly efficient optical fiber amplifier module pumped by a 0.98 μ m laser diodes", Proc. of OFC '90, paper PD-14, 1990.
9. J. R. Armitage and R. Wyatt, "Amplification measurements on Er-doped silica fibers", Proc. of 8th Natl. Quantum Electronics Conf., 1987.
10. E. Desurvire, J. R. Simpson, and P. C. Becker, "High gain erbium-doped traveling wave amplifier", Opt. Lett., vol. 12, pp. 888, 1987.
11. C. R. Giles, E. Desurvire, and J. R. Simpson, "Transient gain and crosstalk in erbium-doped fiber amplifiers", Opt. Lett., vol. 14, pp. 880, 1989.
12. M. M. Choy, C. Y. Chen, M. Andrejco, M. Saifi, and C. Lin, "A high gain, high-output saturation power erbium-doped fiber amplifier pumped at 532nm", IEEE Photonics Tech. Lett., vol. 2, pp. 38, 1990.
13. M. J. O. Mahony, "Towards an all-optical regenerator", Proc. of ECOC '87, pp. 11, 1987.
14. S. Shimada, "Impact of erbium-doped amplifiers on optical communication system", Optics and Photonics News, vol. 1, pp. 6, 1990.
15. N. Edagawa, Y. Yoshida, H. Taga, S. Yamamoto, K. Mochizuki, and H. Wakabayashi, "904km 1.2Gb/s non-regenerative optical transmission experiment using 12 Er-doped fiber amplifiers", Proc. of ECOC '89, paper PAD-8, 1989.
16. K. Hagimoto, Y. Miyagawa, A. takada, K. Kawano, and Y. Tohmori, "5Gb/s 201km non-repeated transmission using LD pumped Er-doped fiber amplifiers", Proc. of OFC '90, paper PD2, 1990.
17. S. Saito, T. Imai, T. Sugie, N. Ohkawa, Y. Ichihashi, and T. Ito, "An over 2,200km coherent transmission experiment at 2.5Gb/s using erbium-doped fiber amplifiers", Proc. of OFC '90, paper PD2, 1990.
18. A. Righetti, F. Fontana, G. Delrosso, and G. Grasso, "An 11Gb/s, 260km transmission experiment using a directly-modulated 1536nm DFB laser with two erbium-doped fiber amplifiers and clock recovery", Proc. of ECOC '89, paper PDA-10, 1989.
19. K. Kikushima, E. Yoneda and K. Aoyama, "6-stage cascaded erbium fiber amplifiers for analog AM- and FM-FDM video distribution systems", Proc. of OFC '90, paaper PD22, 1990.
20. W. I. Way, S. S Wager, M. M. Choy, C. Lin, R. C. Menendez, H. Tohme, A. Yi-Yan, A. C. Von Lehman, R. E. Spicer, M. Andrejco, M. A. Saifi, and H. L. Lehberg, "Distribution of 100 FM-TV channels and six 622Mb/s channels to 4096 terminals using high-density WDM and a broadband in-line erbium-doped fiber amplifier", Proc. of OFC '90, paper PD21, 1990.
21. N. J. Doran and K. J. Blow, "Solitons in optical communications", IEEE J. Quantum Electron., vol. 19, pp. 1883, 1983.
22. L. E. Mollenauer and K. Smith, "Soliton transmission over more than 6,000km in fiber with loss periodically compensated by Raman gain", Proc. of ECOC '89, paper TuA5-1, 1989.
23. M. Nakazawa, K. Suzuki, and Y. Kimura, "20GHz soliton amplification and transmission with an Er-doped fiber", Opt. Lett., vol. 14, pp. 1065, 1989.
24. I. W. Marshall, D. M. Spirit, G. N. Brown, and L. C. Blank, "20Gbit/s 100km nonlinear transmission with semiconductor source", Proc. of OFC '90, paper PD6, 1990.