

## 희토류 첨가 광섬유증폭기의 광통신 응용

朴熙甲, 李東翰\*, 李昌憲\*\*

全北大學校 物理學科 \* 忠南大學校 物理學科

\*\* 韓國電子通信研究所 光通信研究室

### I. 서론

차츰 정보시대로 나아감에 따라 통신량이 급증하면서 이를 수용하기 위한 초고속 광통신 시스템의 개발이 요구되고 있다. 광통신 시스템은 고속화와 더불어 정보를 전송해야 할 거리도 나날이 증가하고 있다. 그래서 전송과장이 기존의 1.310nm에서 광섬유의 손실이 최소인 1.550nm대로 바뀌었고, 또, 색분산의 영향을 최소화 하기 위해서 분산전이 광섬유가 개발되었다. 이러한 성과는 광통신의 고속/장거리화에 어느 정도 기여를 하고 있다. 그러나, 고속 장거리 광통신의 혁신은 최근에 개발된 희토류 첨가된 광섬유를 이용한 광증폭기가 개발되면서 시작되었다.

희토류가 첨가된 광섬유 증폭기, 특히 erbium doped fiber amplifier(EDFA)는 1.550nm 파장대에서 광섬유에서의 손실을 극복할 수 있는 이상적인 특성을 보이고 있다. 그래서 무중계 전송거리를 수 백 km 또는 수 천 km까지 가능하게 하고 있다. 기존의 시스템에서는 광섬유의 손실 때문에 수십 km마다 중계기를 설치하여 약해진 신호를 재생시켜야 했다. 그러나, 광증폭기를 사용하면 광송신기의 출력을 키우거나, 광수신기의 수신감도를 개선하여 전송거리를 증가시킬 수 있다. 또, 전송로의 중간에서 광신호를 전기신호로 바꾸지 않고 그대로 증폭하여 값비싼 전자적인 중계기를 대신함으로써 전송거리를 더욱 길게 하는 것이다. 최근 미국과 일본은 이러한 방법들을 써서 9000 km에 이르는 고속(10Gb/s) 해저 광통신 시스템에 대한 예비실험을 성공시킨바 있다.<sup>1</sup> 광증폭기를 사용함으로써 광송신 출력이 증가하고 무중계 전송거리가 증가하면서 기존의 시스템에서는 상대적

으로 중요하지 않았던 광섬유에서의 색분산과 비선형성에 의한 신호의 왜곡에 대한 중요성이 부각되고 있다. 특히 광섬유 증폭기를 중계기로 사용하는 경우는 신호를 재생시키지 않고 단순히 증폭시키므로 색분산 및 광섬유의 비선형성에 의한 신호의 왜곡이 중첩되므로 그 영향이 더욱 심각해진다.<sup>2</sup>

국내의 EDFA에 대한 연구는 매우 미약하다. 한국과학기술연구원(KIST)에서 희토류 첨가 광섬유를 개발중이며, 삼성에서 EDFA 모듈을 개발하는 중이다. 광섬유 증폭기의 시스템 응용에 대한 연구는 한국전자통신연구소에서 수행하고 있다. 광송신기의 출력을 키우기 위한 광전력증폭기와, 광수신기의 수신감도를 개선하기 위한 광전치 증폭기를 구현하였으며, 이들과 2.5Gbps 광신호와 결합 전송시험을 수행한 바 있다.<sup>3</sup>

이러한 시점에서 희토류가 첨가된 광섬유 증폭기의 특성 및 시스템 응용에 관해서 검토해 보는 것은 의미있는 일일 것이다. 본 논문의 2장에서 희토류 첨가 광섬유와 이를 이용한 증폭기의 기본적인 특성을 살펴보고, 3장에서는 여러가지 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 펄프광 세기가 현저하게 줄어든다. 이러한 장점을 이용하기 위해 이미 1960년 대초부터 Snitzer등이 유리 레이저와 증폭기를 구현

시킨 바 있으며<sup>[4,5]</sup>, 1970년초에 Stone와 Burrus에 의해 다시 시도된 바 있다.<sup>[6]</sup> 그러나, 응용분야가 많지 않아 이에 대한 연구는 한동안 휴식기에 들어갔다. 그러다가 1985년에 광섬유에서 손실이 최저인 1.550nm 파장대에서 높은 이득을 갖는 에르븀이 첨가된 광섬유(EDF : erbium-doped fiber)가 개발되면서 광통신에의 응용을 목적으로 전세계적으로 이에 대한 활발한 연구가 다시 시작되었다.

1. 에르븀 첨가 광섬유 증폭기의 특징

1)일반적인 EDFA

그림 1은 실리카 광섬유에 첨가된 에르븀의 에너지 레벨이다. 주흡수 파장대는 980nm와 1530nm 대역을 들 수 있다. 980nm대의 흡수는 흡수계수가 매우 크고 흡수선폭은 매우 좁으므로 가장 효율적인 펌프 파

ENERGY LEVEL DIAGRAM

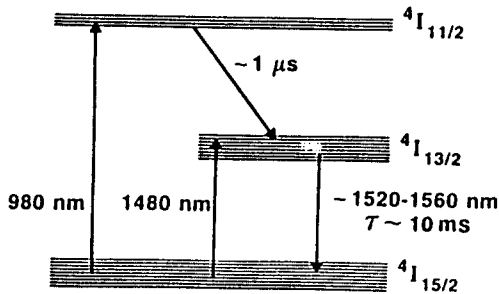


그림 1. 에르븀 이온의 에너지 준위

ABSORPTION AND EMISSION SPECTRA

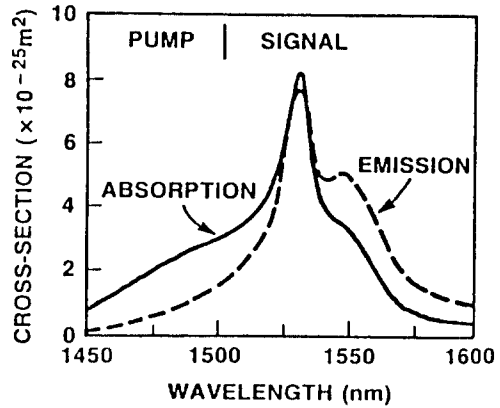
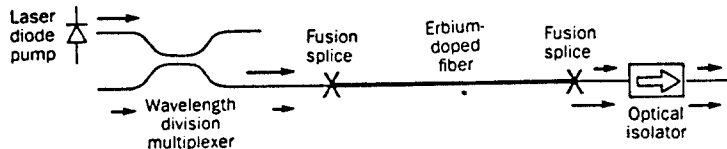
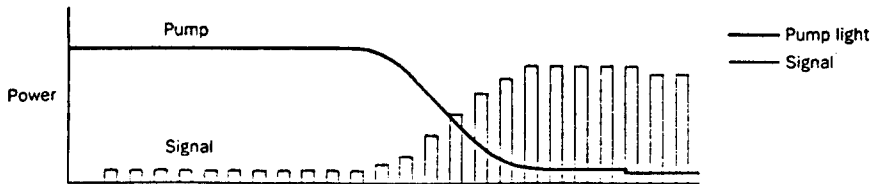


그림 2. 에르븀 이온의 흡수와 발광 cross sections

장이다. 반면에 1530nm대의 흡수는 흡수선폭이 매우 넓어서 이의 일부인 1.480nm 근방을 펌프파장으로 사용한다. 펌핑된 광을 흡수하여 여기된 전자는 1530nm근처 에너지 준위로 빠른 시간내에( $\sim 1\mu s$ ) 보이게 된다. 이 준위에서 바닥 상태로 돌아가는 시간은 약 10 ms로 느려, 그 준위에서 많은 에너지의 축적이 가능하며, 이렇게 반전이 되어 있을 때 신호를 보내주면 신호증폭을 얻을 수 있다. 그림 2는 EDF의 흡수 cross section과 발광 cross section을 보여준다. 이 경우 흡수 spectrum은 상부상태가 완전히 비어있는 상태(소신호 한계)에서 측정된 것이며, 발광 spectrum은 바닥상태가 전부 여기되어 완전한 반



(a)



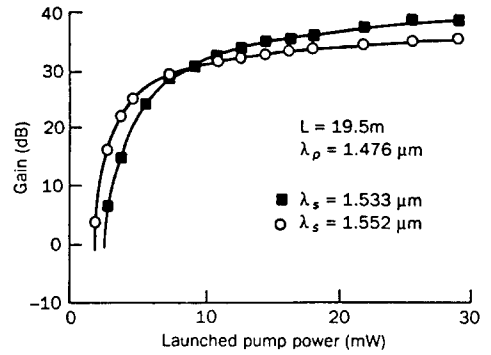
(b)

그림 3. 에르븀첨가 광섬유 증폭기

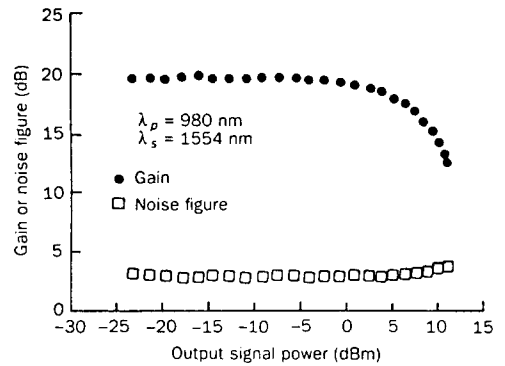
전이 일어났을 때 측정된 것이다. 보통의 경우는 반전의 정도에 따라 이 두 cross section의 조합으로 이루어진 이득 스펙트럼이 결정된다.

통상적인 EDFA의 구성을 그림 3에 보였다. 이는 펌프용 연속발진 반도체 레이저, 펌프광과 신호광을 동일 광섬유내로 보내줄 수 있는 WDM, 최적길이의 EDF(10-30m) 그리고 광 isolator, 각 한개씩의 부품으로 이루어진다. 펌핑용으로는 980nm 반도체 레이저나, 1.480nm 반도체 레이저가 많이 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 증계기용으로 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. 펌프광의 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(출력단 신호대 잡음 비율 / 입력단 신호대 잡음 비율)의 변화를 보여준다. 이 관계는 시스템 설계에서 중요한 정보로써, 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 광증계기를 설계할 때의 중요한 변수이다. 특히 여러개의 광증폭기를 연결한 장거리 전송 시스템에서는 광증폭기를 포화된 상태에서 동작시킨다. 그러면, 전송로의 한 부분에서 신호가 감소하면 증폭기의 이득이 증가



(a)



(b)

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

하므로 증계기를 지날수록 점점 더 정해진 출력에 가까워진다. 또 신호가 갑자기 증가하더라도 큰 신호에서는 이득이 더 작아 (그림 4b 참조) 점차 원상복귀되는 자동이득조절기능을 갖게 된다.

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

2) 새로운 EDFA들

에르븀을 첨가한 광증폭기에서 얻을 수 있는 출력

은 20 dBm 정도가 그 한계이다. 고풍력을 얻기 위해서 최근에 에르븀과 이터븀을 동시에 첨가한 광섬유를 이용하여 27 dBm의 고풍력 광증폭기를 발표한 바 있다.<sup>[5]</sup> 이 경우 펌프원으로 AlGaAs 다이오드 레이저로 펌프시킨 니오디움 레이저의 1.06  $\mu\text{m}$  광을 이용하여 이터븀 이온을 여기시키고, 이 에너지를 에르븀 이온으로 전달하는 방식을 이용한다. 이 때 효과적으로 에너지를 전달시키기 위하여 모재로 인이 첨가된 실리카 광섬유를 이용한다. 한개의 다이오드 펌프 니오디움(diode-pumped neodymium) 레이저를 사용하였을 때 소신호 이득 51 dB, 포화출력 290 mW, 잡음지수 3.5 dB의 성능이 발표된 바 있다. 또 다른 경우는 에르븀을 전형적인 실리카 광섬유가 아닌 플로라이드 광섬유에 첨가시켜 다중채널 전송에 필수적인 넓은 이득대역을 갖는 광증폭기를 제작하는 등 계속적으로 새롭고 유용한 결과가 나오고 있다.<sup>[6]</sup>

## 2. 신호의 왜곡

광증폭기는 광신호를 전기신호로 바꾸어 없애 그대로 증폭하므로 광섬유가 가지고 있는 광대역을 최대한 이용할 수 있다. 하지만 처음에는 깨끗하던 신호가 장거리를 지나면서 왜곡이 되고 잡음이 증가하더라도 증폭기에서는 이 신호를 다시 원상복귀하는 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 전송신호로 변조하면 파장의 분포가 생기기 때문에 긴 광섬유를 지나면 신호폭이 처음보다 더 확산된다. 이 분산은 재질인 유리에서 오는 것과 도파로 특성에서 오는 것으로 이루어져 있다. 기존의 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 불균질에 의해서 두 수직 모드의 속

도 차이가 생기게 되어 도착시간 차이가 생겨 신호가 확산되는 현상이다. 색분산은 규칙적인 효과이기 때문에 분산천이 광섬유등을 이용해 해결할 수 있으나 PMD는 시간에 따라 불규칙하게 변하기 때문에, 광섬유의 타원성을 줄이거나 두 모드 사이의 변환을 빠르게 해주어서 PMD를 줄여야만 한다.

비선형에 의한 문제는 새로운 파장성분이 생겨 색분산 효과와 겹쳐서 디지털 신호가 확산되는 경우와 새로운 파장성분으로 신호의 에너지를 잃어 버리는 경우를 들 수 있다. 이 문제는 신호광 세기를 낮추는 방법, 중첩시간을 줄이기 위해 계속적인 분산극소점을 피하는 방법<sup>[7]</sup>, 또 신호광의 선폭을 증가시켜주는 방법<sup>[8]</sup> 등으로 대처할 수 있다. 장거리 전송 시스템에는 여러개의 광증폭기가 필요하다. 전송로에서 약해진 신호를 복귀시키는 방법에는 긴 거리 전송후에 크게 증폭시키는 방법과 짧은 거리 전송후에 적게 증폭시키는 경우를 들 수 있다. 하지만 광잡음은 같은 장거리를 가더라도 증폭기의 간격이 작으면 훨씬 적어지게 된다.<sup>[9]</sup> 그러므로 긴 시스템일수록 증폭기 간격을 더 작게 하여야 마지막에 축적된 ASE를 충분히 작게 할 수 있다.

## 3. 기타 회토류 첨가 광섬유 증폭기

통신과 관계있는 파장대역은 보통 광섬유에서 색분산이 없어지는 1.3  $\mu\text{m}$ 과 광손실이 최소인 1.55  $\mu\text{m}$  영역이다. 장거리 전송의 경우 색분산도 광손실이 최소인 1.55  $\mu\text{m}$ 에서 영인 분산천이 광섬유를 이용하려고 하고 있어 1.55  $\mu\text{m}$ 영역에서 좋은 특성을 가지고 있는 에르븀 첨가 광섬유(EDF)에 대한 연구는 급격히 증가하고 있다. 또한 이미 설치되어 있는 전송용 광섬유의 색분산이 1.3  $\mu\text{m}$ 영역에서 영이기에 기존의 광섬유를 버리고 새로 분산천이 광섬유를 설치할 경우의 엄청난 경비를 피하기 위하여 이 파장영역에서의 광증폭기에 대한 연구도 활발하다. 이 경우는 니오디움 첨가 광섬유와 프라시디움 첨가 광섬유가 비교적 좋은 특성을 보이고 있다. 니오디움 첨가 광섬유는 시스템에서 쓸수 있는 특성, 즉 충분한 증폭율, 다이오드 여기가능, 저 잡음지수 등을 보여주지 못하고 있다.<sup>[10]</sup> 반면에 뒤에 연구된 프라시디움(praseodymium) 첨가 광섬유는 모재가 전송용 광섬유와는 다른 ZBLAN으로 알려진 플로라이드(fluride) 유리를 사용하여 좋은 특성을 보여주고 있다. 최근에는 일본의 NTT의 연구원들이 이러한 광

섬유를 이용하여 하나의 레이저 다이오드를 이용하여 23 dB의 신호이득을 갖는 좋은 성능의 광증폭기를 발표하였다.<sup>11</sup> 또 같은 연구소에서 이 증폭기를 사용하여 광세기 margin이 51dB가 넘는 115 km에 전송을 성공시킨바 있다.<sup>12</sup>

### Ⅲ. 전송 시스템에의 응용현황

#### 1. 국간 전송 및 해저 전송 시스템

광증폭기를 국간 중계 전송 시스템에 활용하는 방식의 예를 그림 5에 나타내었다.<sup>13</sup> 광증폭기는 송신부에서 송신광 출력을 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 부분별로 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. 광전력 증폭기로 사용하기 위해서는 높은 출력이 요구되므로 주로 역

방향 펌프나, 양방향 펌프구조의 EDFA가 많이 사용된다. 현재 0.98 $\mu$ m 또는 1.48 $\mu$ m 파장의 LD 펌핑에 의해 약 +20dBm 이상의 수준까지 증폭된 출력을 얻고 있다.<sup>11</sup> 보다 고출력을 얻기 위해서는 2장에서 설명한 바와 같이 에르븀과 함께 이터븀이 같이 첨가된 광섬유증폭기를 이용한다. 이 경우는 24dBm 이상의 광출력을 얻을 수 있다. 이러한 광증폭기는 국간 전송이 아니더라도 광 CATV망의 경우와 같이 많은 수의 가입자 단말에 광 power에 분배가 필요한 경우에 사용하여 공급 가능한 가입자 branch 수를 늘릴 수 있다.

광송신기의 출력이 증가되면 광섬유내에서 여러가지 비선형 광학 효과들에 의하여 송신한 신호가 왜곡된다. 그 중 가장 큰 영향을 주는(문턱치 power가 가장 낮은) 현상은 유도 Brillouin 산란으로 전송특성에 영향을 주는 문턱치 광 power가 수 dBm 정도이다. 다행히도 유도 Brillouin 산란이 일어나는 대역폭이 매우 좁아서 광원을 위상 변조 또는 FSK 변조시킴으로써 문턱치 광 power를 높여 +21dBm의 광 power에도 전송품질에 큰 문제가 없도록 한 실험 결과가 보고되었다.<sup>19</sup>

##### 2) 전치증폭기

광증폭기를 광수신기의 전단에 두어 미약한 광신호를 증폭하면, 광수신기는 항상 큰 광신호를 받을 수 있다. 수신되는 광신호가 충분히 크면 수신감도에 미치는 열잡음의 영향을 무시할 수 있으므로, 수신감도는 입력 광신호가 만들어 내는 산탄잡음(shot noise)

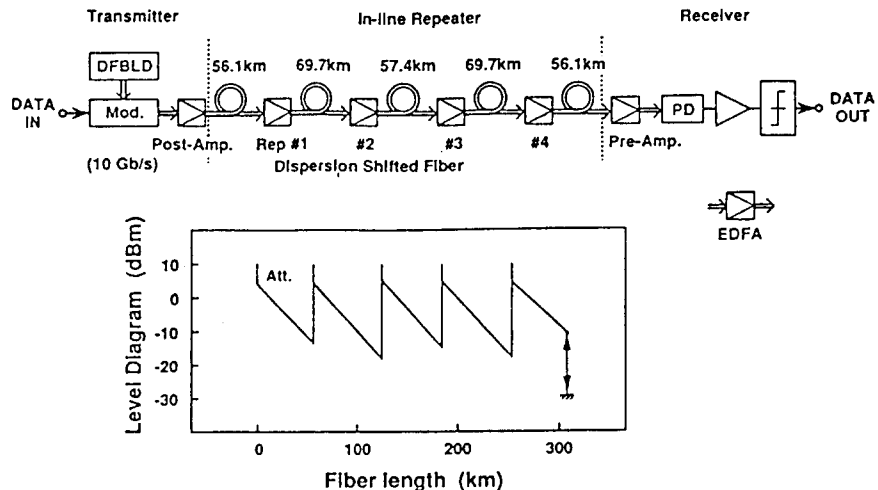


그림 5. 국간 중계 전송 시스템에서의 광증폭기 활용 방식(13)

에 의해서 결정된다. 이론적으로 38 photons/bit의 수신감도까지 가능하다.<sup>15)</sup> (광증폭기에서의 잡음의 영향을 무시하면 양자한계(quantum limit)로서 10<sup>-11</sup> BER에서 10.5 photons/bit이다.) 지금까지 보고된 최고의 수신감도는 ~100photons/bit이다.<sup>16)</sup> 이는 coherent 전송방식에서의 수신감도에 거의 근접한 값이다. 또, 이 값은 광전치 증폭기가 없는 수신기에서 회로내의 열잡음(thermal noise)과 APD의 과잉잡음(excess noise)으로 결정되는 수신감도 ~1000 photons/bit 정도보다 10배 정도 개선된 값이다. 전송속도가 높아 질수록 고성능의 광수신기를 제작하기가 어려우므로 EDFA를 사용한 광전치 증폭기의 장점이 두드러진다.

전치 증폭기에서는 광이득에 못지 않게 중요한 것은 잡음지수(noise figure)이다. 0.98 $\mu$ m 파장 펄핑 광증폭기는 100% 밀도반전이 가능하므로 잡음지수를 양자한계치인 3dB까지 얻을 수 있다. 그러나 1.48 $\mu$ m 펄핑의 경우에는 신호광과 펄핑광간에 파장차이가 작아 근접한 에너지 준위간에 thermal distribution으로 인해 100% 밀도반전이 이루어질 수 없어서 약 5dB 정도의 잡음지수를 얻을 수 있다. 따라서 전치 증폭기용으로서 0.98 $\mu$ m 펄핑이 선호된다. 또한 역방향 펄핑보다는 순방향 펄핑의 경우가 잡음지수 면에서 유리하다.

EDFA 잡음지수가 증가하는 주요 원인은 후방으로 진행되는 ASE에 의해서 광증폭기의 입력단의 밀도반전률이 낮아지는 것이다. 그래서 후방 ASE 성분이 진행하지 못하도록 하여 잡음 특성을 개선한 구조를 그림 6에 나타내었다.<sup>17)</sup> 여기서는 에르븀 광섬유를 2 단으로 나누고 중간에 광 isolator를 두어 둘째단의 에르븀 광섬유로부터 후방으로 진행되는 ASE 성분이 앞단의 erbium 광섬유내로 들어오지 못하게 차단하였다. 한편 펄핑광은 순방향으로 펄핑하였으며 첫째단의 에르븀 광섬유를 지난 펄핑광이 두 에르븀 광섬유의 사이에서 4-port WDM 소자를 사용하여

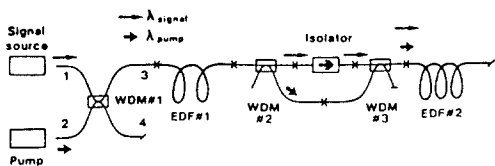


그림 6. 2-stage 형태의 고이득 저잡음 전치 광증폭기(1)

isolator를 거치지 않고 둘째단의 에르븀 광섬유로 입사되도록 하였다. 이러한 구조에서 45mW의 0.98 $\mu$ m 펄핑에 의해 51dB의 높은 이득과 함께 3.1dB의 낮은 잡음지수를 얻었다. 또 이를 10Gb/s 전송시스템에 적용하여 -38.8dBm (102 photons/bit)의 수신감도를 얻었다.<sup>18)</sup>

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 올린다면 단계적으로 고급화해 나가고자 할때 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, 여러종류의 비선형 광학 효과에 의한 신호의 왜곡과 jitter가 누적되어 전송품질이 저해된다. 이에 대해서는 2장에서 설명하였다. 따라서 어느정도의 거리를 전송한 후에는 재생중계로써 잡음과 jitter를 해소시켜 줄 필요가 있다. 이러한 관점에서 선형 광증폭만으로(재생중계없이) 얼마나 장거리 전송이 가능한지를 그림 7에 나타내었다.<sup>11)</sup> 그림에

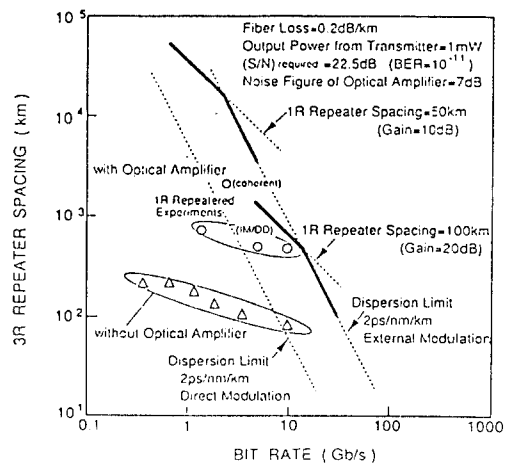


그림 7. 선형 중계 가능한 최대거리 (계산치와 실험결과)(13)

서 보면 수 Gb/s의 전송속도를 사용할 경우에 10,000km 정도의 거리에 대해서는 재생중계기 없이도 광증폭만으로 전송이 가능함을 알 수 있다. 실제로 현재 미국의 AT & T와는 일본의 KDD가 공동으로 1996년에 상용 서비스를 개시할 목표로 약 9,000km의 태평양을 가로질러 미국-하와이-일본-괌을 연결하는 5Gb/s 광증폭 방식의 해저 광케이블 시스템(TPC-5)의 설치 및 포설 project가 3년째 진행중에 있다.<sup>[19]</sup> 한편 KDD에서 274개의 EDFA를 사용하여 9,000km에 걸쳐 10Gb/s의 광전송 실험에 성공한 바 있다.<sup>1</sup>

참고로 현재 진행중인 TPC-5에서 사용되는 광증폭 중계기의 기본 구조를 그림 8에서 살펴보기로 하자.<sup>[19]</sup> 해저 케이블 시스템에서는 신뢰성이 가장 중요하며 이를 위하여 부품수를 가능한한 줄이고 가급적 광섬유 형태의 소자를 사용하고 설계를 단순화 시킴으로써 기대수명이 27년이상이 되도록 하였다. 따라서 일반적으로 EDFA에서 사용하는 ASE 제거용 필터를 사용하지 않고 에르븀 광섬유의 이득 스펙트럼의 peak에 신호광파장을 맞추어 ASE가 상대적으

로 억제되도록 하였다. ASE가 후방진행하여 누적되는 것을 막기 위한 광 isolator도 EDFA당 1개씩만을 사용하였다. 광증폭 중계기는 한쌍의 EDFA로 이루어져 각기 반대방향의 신호증폭을 하도록 되어 있으며 중계기의 신뢰도 확보를 위하여 두 EDFA가 두 개의 펌핑 LD를 공유하며 3dB coupler로 나누어 함께 펌핑하는 방식을 취하였다. 따라서 두 펌핑 LD중 어느 하나에 문제가 생기더라도 두 EDFA는 펌핑 power가 절반으로 줄어든 상태에서도 거의 정상적으로 동작하도록 되어 있다. 이 시스템이 상당한 gain compression 상태에서 동작하도록 설계되었기 때문에 펌핑 LD 하나가 고장나더라도 원래의 출력 신호 레벨은 거의 그대로 유지된다. 단, 펌핑 power가 반감되므로 잡음지수만이 약 1dB 증가한다. 광증폭기의 이득은 7~22dB 범위에서 동작할 수 있으나 초장거리 시스템이므로 잡음광과 비선형 효과의 누적을 최소화 하는 것이 설계시 가장 크게 고려되어야 하므로 7~12dB 범위에서 동작시킨다.

한편 EDFA 시스템에서 실용측면에서 중요한 현안으로 감시신호(supervisory signal)의 전송과 선로의 고장점 발견을 위한 OTDR 적용성 문제이다. EDFA는 내부의 신호경로상에 광 isolator를 포함하므로 EDFA를 통한 신호의 양방향 전송이 불가능하다. 따라서 중계기의 감시와 OTDR 적용을 위해 서로 반대방향으로 전송하는 두 전송로간에 그림 8에서와 같이 loop back coupler를 두어 어느 한 방향으로 진행하는 신호광의 일부를 반대방향의 전송로로 결합시켜 되돌려 보낼수 있도록 한다. 단국에서는 매 중계기로부터 loop back 되는 신호를 검출하여 감시와 고장수리에 필요한 정보를 수집할 수 있다.

감시 신호를 전송하는 방식은 주요 연구대상이 되고 있다. 우선 WDM 방식을 이용하여 별도의 파장을 감시 신호 전송을 위해 할당하는 방식이 있었으나 별도의 광원 LD를 필요로 하는 단점이 있다. 또한 펌핑 LD를 변조하여 감시신호를 전송하는 방법이 있을 수 있다.<sup>[20]</sup> 에르븀의 특성상 펌핑광을 변조시키더라도 변조주파수가 10kHz 이상이 되면 EDFA의 이득은 별 영향을 받지 않는 점을 이용하는 것이다. 그러나 이 경우에는 매 중계기마다 감시신호를 재생해 주어야 한다. 이외에도 line signal을 AM, FM 변조 또는 편광 변조시켜 감시 신호를 실어 전송하는 방법도 가능하다.

한편 앞에서 설명한 바 있는 loop back coupler는

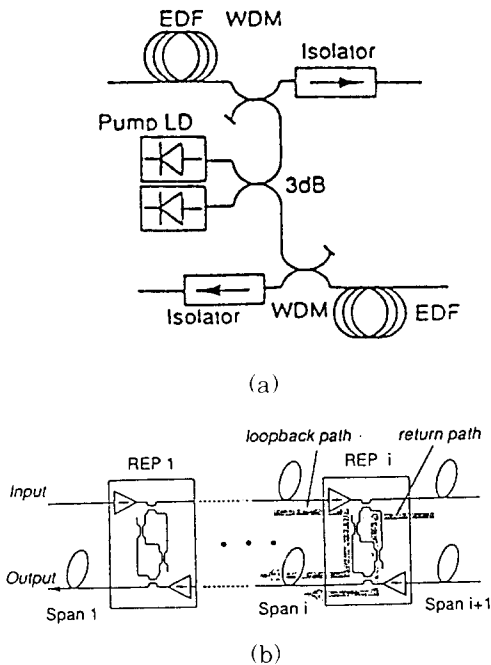


그림 8. 태평양 횡단 해저 전송 시스템(TPC-5)에서의 광증폭기(a)와 loopback coupler (b)의 구성(19)

선로의 고장점 발견을 위한 OTDR의 적용을 가능하게 해 준다. 즉 어느 한 선로상의 고장점으로부터의 반사광 또는 후방 Rayleigh 산란광이 loop back coupler를 거쳐 반대 방향의 선로를 따라 되돌아 올 수 있다.

## 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 중계기마다 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 실험예를 살펴보면, Fujitsu에서 3nm 파장간격의 4개 채널의 2.5Gb/s 신호(총 10Gb/s)를 18개의 EDFA를 사용하여 1060km 거리에 걸쳐 전송실험한 결과를 보고하였다.<sup>21)</sup> 이는 WDM 방식이 아닌 기존방식에 의한 10Gb/s 단일채널 전송과 비교할 만한 가치가 있는 실험결과이다. 또한 NTT에서 10Gb/s 신호 10채널을 파장분할 다중화하여 50km 마다 광증폭 중계하여 300km 전송실험한 결과를 발표하였다.<sup>22)</sup> 이러한 WDM 전송방식은 채널의 확장성이 뛰어나 앞으로 대용량 전송의 상당부분을 담당한 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.

또 다른 문제점은 EDFA의 이득이 입력되는 모든 채널의 신호광 power가 총합에 따라 변화하고 또한 포화된다는 점이다. 이 경우에 어느 한 채널의

power 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 power에 fluctuation이 있을 수 있으며 이 같은 현상은 각 채널 이득간의 cross saturation으로 나타난다. 그 변화가 비록 작다할지라도 많은수의 EDFA를 이어 사용할 때에는 누적된 효과가 크게 나타난다. 우선 채널간 이득의 불균일성 문제의 해결을 위하여 각 채널별로 송신기의 출력을 이득 특성에 맞추어 미리 보정해 주거나<sup>23)</sup> 적당한 필터를 사용하여 채널간 이득차이를 보상해주는 방법<sup>24)</sup> 이 있다. 또한 twin-core 에르븀 광섬유를 사용하는 방법도 제안되었다.<sup>25)</sup> 에르븀 광섬유가 2개의 core를 가지도록 제조하여 그 중 한 core내로 신호광과 펌프광을 입사시키면 광섬유를 따라 진행하면서 근접한 두 core간에 주기적인 coupling이 일어난다. 신호광의 각 채널간에는 파장 차이가 있으므로 에르븀 광섬유의 상당한 길이를 지난 후에는 채널간의 공간적으로 어느정도 분리되므로 채널간의 이득 싸움이 줄어들는다. 즉, 어느 한 채널의 이득이 포화되더라도 다른 채널에 미치는 영향이 다소 줄어들어 모든 채널은 거의 비슷한 포화 이득을 가지게 된다. 이러한 방식은 채널간 cross saturation을 줄이는데에도 효과가 있다.

채널간 cross saturation 문제의 해결을 위해 EDFA를 발진(lasing) 시키는 방법도 제안되었다.<sup>26)</sup> EDFA로부터의 ASE 출력의 일부분을 입력단으로 케환(feedback)시켜 EDFA가 레이저로서 발진하게 되면 homogeneous line broadening의 경향을 가진 에르븀의 특성상 신호광의 이득은 일정한 값에 고정되어 채널 상호간에 영향을 주지 않는다. 한편 단일 광증폭 매질이 inhomogeneous line broadening의 성질을 가진다면 채널간 이득불균일성과 cross saturation 문제가 상당 부분 해소될 수 있음을 에르븀 광섬유를 저온(77K)에서 동작시켜 확인한 실험결과가 보고된 바 있다.<sup>27)</sup> 또, 2장에서 설명한 바와 같이 에르븀을 플로라이드 광섬유에 첨가시킨 광증폭기를 사용하는 방법도 있다.<sup>28)</sup> 이러한 실험결과는 WDM에 적합한 광증폭 매질연구에 새로운 방향성을 제공할 수 있을 것이다.

## 3. 광 솔리톤 전송 시스템

광솔리톤(optical soliton) 전송은 광섬유의 색분



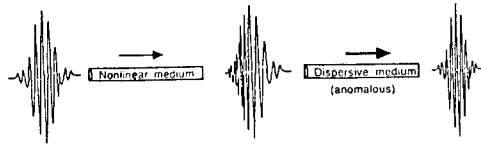


그림 9. 비선형 광학 효과에 의한 광펄스의 압축

산으로 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.<sup>38)</sup> 솔리톤 효과에 의한 펄스 압축의 원리를 그림 9에 나타내었다. 일반적으로 매질의 굴절율은 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 굴절율에 차이가 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. 광 솔리톤 전송은 매질 분산에 의한 펄스 퍼짐을 이러한 비선형적인 펄스압축 효과로써 상쇄시키는 것인데, 펄스의 강도와 모양이 이상적인 솔리톤 펄스와 다소 차이가 있다더라도 어느 정도의 범위 내에서는 스스로 안정적인 균형을 찾아가며 전송되므로 실용 가능성이 있는 전송기술이라 할수 있다.

광 솔리톤 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 범위내에서 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.

최근에 행해진 광 솔리톤 전송 실험의 예를 들면, NTT에서 20Gb/s와 40Gb/s의 실제 data를 EDFA로써 솔리톤 강도를 유지시켜가며 각각 1850km와 750km의 거리에 걸쳐 전송실험한 결과를 보고하였다.<sup>39)</sup> 이 실험에서는 DFB-LD를 gain switching

하여 12ps 폭의 펄스 열을 만들고 LiNbO<sub>3</sub> 변조기로써 10Gb/s의 광신호를 얻은 후, 광섬유 지연기를 사용하여 시간지연시킨 후 합성하는 방법으로 시분할 광다중화 함으로써 20Gb/s와 그 이상의 변조된 광신호를 전송하였다. 또한 AT&T에서도 8.2Gb/s의 data를 전송하여 4200km 거리에 대해 10<sup>-10</sup>의 BER의 전송 품질을 얻은 결과를 발표하였다.<sup>30)</sup> 이러한 최근의 결과들은 이전까지의 광솔리톤 전송 실험이 주로 변조되지 않은 광펄스의 장거리 전송실험에 불과했던 것과 비교하여 10Gb/s 이상의 실제 data의 전송과 함께 BER 측정으로 전송품질을 제고하는 단계에까지 발전한 것으로 앞으로 머지 않은 장래에 실용화를 바라볼 수 있게 되었다.

#### IV. 결론

회도류 첨가 광섬유 증폭기, 특히 에르븀이 첨가된 광섬유 증폭기는 광증폭기의 기본적인 요구사항인 높은 이득(> 30dB), 저잡음, 고효율 및 고출력이라는 특성을 만족시킨다. 특히, 통신용으로 필요한 신호왜곡이 적고, 상호간섭이 적고, 편광의존이 없으며, 증폭 대역폭이 넓은 장점을 두루 갖추고 있으며 증폭과 장대도 광섬유의 손실이 최소인 1.550nm 파장대이다. 이러한 장점들과 상용화된 레이저 다이오드를 사용하여 여기할 수 있고, 설계가 단순하다는 특성들 때문에 EDFA는 연구가 시작된 지 수년내에 실제 시스템에서 광전력 증폭기, 광전치 증폭기, 그리고 광중계기로 쓰일 단계에 이르렀다. 또, 시스템에 응용할 때 가장 중요한 신뢰도도 EDFA는 단지 몇개의 소자만으로, 특히 주로 수동소자나 저속 전자회로로 이루어져 있으므로 충분히 높일 수 있다.

광섬유 증폭기를 사용함으로써 새로이 야기되는 광섬유에서의 비선형 현상에 의한 신호의 왜곡은 광증폭기를 본격적으로 사용하기 전에 해결해야 될 문제점으로 지적되고 있지만, 한편으로는 솔리톤 전송처럼 이를 능동적으로 이용하는 연구도 진행되고 있다.

#### 감사의 글

본문은 HAN-BISDN 과제 중에서 10Gbps 광 전송 시스템 개발과제의 일부인 에르븀 첨가 광섬유

특성측정의 위탁과제로 수행한 것이며, 논문의 작성에 도움을 주신 심창섭 실장님께 감사드립니다.

### 參 考 文 獻

- [1] H. Taga, N. Edagawa, H. Tanaka, M. Suzuki, S. Yamamoto, H. Wakabayashi, N. S. Bergano, C. Davidson, G. M. Homsey, D. J. Kalmus, P. Trischitta, D. A. Gray, and R. L. Maybach, OFC 'IOOC' 93, Postdeadline paper, PD1.
- [2] N. S. Bergano, *Optics & Photonics News*, January, 8 (1993)
- [3] 이상수, 한정희, 윤태열, 이창희, 심창섭, "에르븀이 첨가된 광섬유 증폭기의 제작 및 전송 실험." 대한전자공학회 논문지에 게재예정
- [4] E. Snitzer, *J. Appl. Phys.*, 32, 36(1961)
- [5] C. J. Koester and E. Snitzer, *Appl. Opt.*, 3, 1182(1964)
- [6] J. Stone and C. A. Burrus, *Appl. Phys. Lett.*, 23, 388(1973)
- [7] S. G. Grubb, P. A. Leilabady, K. L. Sweeney, W. H. Humer, R. S. Cannon, S. W. Vendetta, W. L. Barnes, and J. E. Townsend, Optical Amplifiers and Their Applications '92, FD1-1.
- [8] D. Ronarch, B. Clesca, Y. Sorel, D. Bayart, M. Guibert, L. Hamon, J. F. Kerdiles, J. L. Beylat, and M. Semenkoff, Optical Amplifiers and Their Applications '93, PDP10.
- [9] P. A. Leilabady, S. Vendetta, S. G. Grubb, G. Tremblay, and G. Maurer, ECOC 92 paper PD-19.
- [10] Y. Ohishi, T. Kanamori, and S. Sudo, OFC/IOOC '93, TuL5.
- [11] M. Yamada, M. Shimizu, Y. Ohishi, J. Temmyo, M. Wada, T. Kanamori, and S. Sudo, Optical Amplifiers and Their Applications '93, TuA1.
- [12] H. Suda, N. Tomita, S. Furukuwa, F. Yamamoto, K. Kimura, M. Shimizu, M. Yamada, and Y. Ohishi, Optical Amplifiers and Their Applications '93, PDP8.
- [13] K. Nakagawa, K. Aida, K. Aoyama, and K. Hohkawa, *IEEE Lightwave Transmission System* Feb. issue, 19 (1992).
- [14] S. G. Grubb and P. A. Leilabady, Optical amplifiers and their applications topical meeting '93, paper MA1.
- [15] P. S. Henry, OFC93 paper Thk3.
- [16] P. M. Gabla, E. Leclerc, J. F. Marcerou and J. Hervo, OFC92, paper ThK3.
- [17] R. I. Laming, M. N. Zervas, and D. N. Payne, *IEEE Photonics Technol. Lett.* 4, 1345 (1992).
- [18] R. I. Laming, A. H. Gnauck, C. R. Giles, M. N. Zervas and D. N. Payne, *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 4, 1041 (1992).
- [19] S. Akiba, Optical amplification and their applications topical meeting '93, paper MB1.
- [20] S. Matsuoka, Y. Yamabayashi, K. Aida, and K. Nakagawa, Globecomm 90, 1846(1990).
- [21] M. Suyama, T. Terahara, S. Kinoshita, T. Chikama, and M. Takahashi, Optical amplification and their applications topical meeting '93, paper MB5.
- [22] N. Takachio, S. Yoshida, S. Norimatsu, and K. Oda, ECOC 93 paper MOC1.2.
- [23] A. R. Chraplyvy, J. A. Nagel and R. W. Tkach, *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 4, 920 (1992).
- [24] S. F. Su, R. Olshansky, G. Joyce, D. A. Smith and J. E. Baran, *IEEE*

- Photonics Technol. Lett.*, 4, 269(1992).
- [25] M. N. Zervas, R. I. Laming, J. D. Minelly, and D. N. Payne, Optical amplifiers and their applications topical meeting '93, paper MA4.
- [26] H. Okamura, *J. Lightwave Technol.*, 10, 1110(1992).
- [27] V. L. da Silva, Y. Silberberg, J. S. Wang, E. L. Goldstein, and M. J. Andrejco, *IEEE Photonic Technol. Lett.*, 5, 412(1993).
- [28] N. J. Doran and K. J. Blow, *IEEE J. Quantum Electron.*, 19, 1883(1983).
- [29] K. Suzuki, Optical amplification and their applications topical meeting '93, paper TuB5.
- [30] R. Giles, P. B. Hansen, S. G. Evangelides, G. Raybon, V. Koren, B. I. Miller, M. G. Young, M. T. Newkirk, J. P. Delavaux, S. K. Korotky, J. J. Veselka, and C. A. Burrus, OFC'93 paper WC2. 🌐

|      |
|------|
| 筆者紹介 |
|------|



朴 熙 甲  
1955年 10月 13日生

1980年 3月 ~ 1991年 8月 한국전자통신연구소 근무  
1991年 9月 ~ 현재 전북대학교 물리학과 교수

李 東 翰  
현재 충남대학교 물리학과 교수

筆者紹介



李昌憲

1961年 9月生

1983年 2月 한양대학교 전자공학과(학사)

1985年 2月 한국과학기술원 전기 전자공학과(석사)

1989年 2月 한국과학기술원 전기 전자공학과(박사)

1989年 7月 ~ 1990年 6月 Bellcore (Post Doc.)

1989年 3月 ~ 현재 한국전자통신연구소 선임연구원 (광통신 연구실)

주관심 분야 : 반도체 레이저, 광증폭, 광통신, 극초단 펄스 생성