

## 主 題

## 광신호 재생을 위한 광증폭 응용 기술

대우통신 종합연구소, 광통신연구소 이 달 석, 최 봉 수  
이 규 행, 이 관 우

## 차 례

- I. 서론
- II. 단일모드 광섬유의 광학적 특성
- III. 분산 보상 기술
- IV. 광섬유 광증폭 기술
- V. 결론

## I. 서론

1960년대 레이저의 출현으로 광주파수대역의 전자파를 이용한 통신에 많은 관심과 노력이 있어 왔다. 수백 THz의 캐리어 주파수를 이용한 통신 가능 정보용량은 기존의 마이크로파와 비교하면 수만배 이상되기 때문이다. 구리선과는 달리 광통신 선로인 광섬유는 전기적인 잡음의 영향을 받지 않을뿐만 아니라 보안성에서 유리하고, 무게와 크기에 있어 가볍고 견고하며 부피가 작다는 큰 이점이 광통신의 신호도를 높이는데 기여하였다[1].

광통신의 중심이 되는 기술의 하나는 광섬유이다. 광통신에 이용되기까지 유리섬유를 이용한 광의 손실을 낮추는 연구가 진행되어 1960년대 후반에는 200dB/km의 손실이 확인되었고, 1970년대에는 20dB/km의 손실이 확인되어 광통신에 유망하다는 것이 확실해졌다. 광섬유의 저손실화는 동시에 최저손실을 제공하는 최적파장이 장파장으로 이동되는 결과를 가져왔다. 실제로 분순물을 최대 로 감소시킨 광섬유에서는 파장 0.8 $\mu$ m에서 손실이

약 2.5dB/km, 1.3 $\mu$ m에서는 0.5dB/km, 1.55 $\mu$ m에서 0.2dB/km의 손실 광섬유를 얻는데 성공하였다. 또한 색분산의 영향을 최소화하기 위해서 분산천이 광섬유가 개발되었다. 이러한 성과는 광통신의 고속/장거리화에 어느 정도 기여를 하여 왔다. 그러나 고속 장거리 광통신의 혁신은 최근에 개발된 회로류가 첨가된 광섬유를 이용한 광증폭기가 개발되면서 시작되었다. 회로류가 첨가된 광섬유 증폭기, 특히 erbium doped fiber amplifier(EDFA)는 1.55 $\mu$ m 파장대에서 광섬유의 손실을 극복할수 있는 이상적인 특성을 보이고 있다. 그래서 무중계 전송 거리를 수백km 또는 수천km까지 가능하게 하고 있다.

기존의 시스템에서는 광섬유의 손실 때문에 수십km마다 증계기를 설치하여 약해진 신호를 재생시켜야 했다. 그러나 광증폭기를 사용하면 광송신기의 출력을 높이거나 광수신기의 수신감도를 개선하여 전송거리를 증가시킬수 있다. 광증폭기의 사용으로 광송신 출력이 증가하고 무중계 전송거리가 증가하면서 기존의 시스템에서는 상대적으로

중요하지 않았던 광섬유에서의 색분산과 비선형성에 의한 신호 왜곡에 대한 중요성이 부각되고 있다. 특히 광섬유 증폭기를 증계기를 대신하여 사용하는 경우에는 신호를 재생시키지 않고 단순히 증폭시키므로 색분산 및 광섬유의 비선형성에 의한 신호의 왜곡이 중첩되어 그영향이 더욱 심각해진다[2, 3].

본 고의 2장에서는 단일모드 광섬유의 광학적 특성에 대하여 살펴보고 3장에서는 분산 보상기술과 분산천이 기술에 대하여 서술하고 4장에서는 광증폭기술과 시스템의 응용실험에 대하여 살펴보았다. 그리고 5장에서는 결론을 실었다.

## II. 단일모드 광섬유의 광학적 특성

### 2.1 선형적 특성

#### 2.1.1 광손실(optical attenuation)

국간 통신 선로인 광섬유를 통하여 송수신 되는 광신호의 SNR(Signal to Noise Ratio)의 열화(degradation)는 광섬유에 의한 광의 흡수(absorption), 산란(scattering) 및 분산(chromatic dispersion)에 의하여 발생하는 신호 세기의 감소와 광신호 파형의 왜곡 등에 의하여 발생한다. 신호 감소의 큰 원인이 되는 광 흡수는 근본적으로 광섬유의 재질이 가지는 고유성질로서 통신용 광 파장에 해당되는 전자와 원자의 에너지 준위가 신호광에 의하여 여기됨으로서 발생된다. 이러한 여기상태는 비방사적 이완과정을 거치게 되므로 일반적으로 신호광 세기의 감소를 가져온다. 현재 사용되고 있는 대부분의 광섬유는 통신파장 신호에서 흡수가 적도록 fluorine이나 boron, germania, titania 혹은 phosphorus같은 oxide를 첨가한 silica glass를 사용하고 있다. 이러한 재료는 원자의 전자나 격자의 에너지 밴드 구조에 관련된 자외 파장영역의 흡수 공명(resonance)과 격자 진동에 관련된 적외

파장영역의 흡수 공명을 가진다. 비록 이러한 흡수 공명은 통신파장 영역에서 멀리 떨어져 있지만, 그 흡수 에너지 밴드의 꼬리가 통신파장 영역에 걸쳐 있게 되어 매우 작은 양이지만 광신호 감소의 원인이 되고 있다. 이밖에 광섬유내에서 발생하는 또 다른 흡수 과정은 불순물로 존재하는 원자나 분자에 의한 흡수가 있다.

산란은 물질의 고유 성질로서 주로 광파장보다 작은 submicron 범위내에서 재료의 조성 성분이 불균일하기 때문에 발생하는 굴절률의 변화에 의하여 나타난다. 이와 같이 파장보다 작은 영역에서의 굴절률 변화에 의하여 나타나는 광산란을 Rayleigh 산란이라고 한다[4]. Rayleigh 산란에 의한 광손실은 1.5 $\mu\text{m}$  통신 파장 영역에서는 자외선이나 적외선 흡수밴드보다 더 중요한 손실원이 됨을 알 수 있다. Rayleigh 산란에 의하여 광의 진행 방향과 정반대로 진행하는 산란광도 존재하는데, 광선로에 입사된 광펄스의 후방산란 광의 시간적 세기를 감지하여 선로의 이상유무를 판단하기도 한다. 이와 같이 광섬유에 함유된 조성물질의 변화에 의하여 발생하는 산란에 의한 광손실이외에, 광섬유의 기하 구조적인 결함(구부러짐, 비틀림, ...)에 의한 광전송 모드의 변화로 인하여 광에너지가 광섬유의 코어층을 벗어남으로서 발생하는 광손실도 존재한다. 광섬유를 따라 미세하게 구부러진 부분에서 나타나는 이러한 광손실은 광섬유를 외부로부터 보호해 주고 충격을 완충시켜 주는 광섬유의 케이블링 과정을 통하여 0.1 dB/km이하의 값을 유지할 수 있다.

#### 2.1.2 분산 (Dispersion)

광통신에서 광섬유의 분산은 광펄스가 광섬유와 같은 분산 매질(dispersive material)을 통과하는 동안 겪는 펄스폭이 넓어지는 정도를 나타내는 양으로 표현한다. 그 양을 분산계수라고 부르며 파장에 대한 굴절률 함수의 2차 도함수 ( $d^2n/d\lambda^2$ ) 값에 의하여 결정되고 단위는  $[\text{ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})]$ 이다.

균일한 매질을  $z$ 축 방향으로 진행하는 평면파는 그 위상이 간단하게  $\exp(i(\omega t - \beta z))$ 의 형태로 표현되는데  $\omega$ 는 광이 가지는 전자기파의 각속도를 나타내고  $\beta$ 는 전파상수를 나타낸다. 전자기 파동의 위상면이 물질속을 진행하는 속도를 나타내는 양은  $v_0 = \omega/\beta$ 로 표현되는 위상속도이고 연속된 여러 파장의 평면 전자기파로 이루어진 광펄스의 전파속도는  $v_g = d\omega/d\beta$ 로 표현되는 군속도(group velocity)이다. 이 군속도의 역수( $\tau_g = 1/v_g$ )는 단위 길이당 군지연 시간을 나타낸다. 이것이 가지는 파장에 대한 도함수( $D_m = d\tau_g/d\lambda$ )가 각 파장에서 재료가 가지는 재료분산으로 알려진 양이다. 이와 같이 순수하게 광섬유의 고유 성질에 의하여 나타나는 재료분산(material dispersion)뿐만 아니라 광섬유를 통과하는 광선의 다중경로에 의하여 발생하는 신호 펄스의 넓어짐 현상도 발생하는데 이를 도파로 분산(waveguide dispersion :  $D_w$ )이라고 한다. 물질 분산과 광도파로 분산과의 관계는 매우 복잡하지만, 광전달 매체인 단일 모드 광섬유가 가지는 총 분산 계수값은 1차 근사적으로 두개의 분산이 상호 독립적이고 비상관적인 양으로 가정하여, 각 분산계수를 수식적으로 합하여 얻게 된다. 일반적으로 광섬유의 주성분인 석영 glass의 재료 분산 특성은 영분산 파장값이  $1.27\mu\text{m}$ 이다. 현재 사용되고 있는 단일 모드 광섬유의 도파로 분산은 음수 값을 갖지만 이 파장대역에서 도파로 분산이 크지 않도록 설계되었기 때문에 영분산이 장파장인  $1.3\mu\text{m}$  파장으로 약간 이동한다.  $1.55\mu\text{m}$  파장대역에서는 약  $+17\text{ps}/\text{nm}/\text{km}$ 의 색분산 값을 가짐을 알 수 있다. 색분산의 값이 음수(-)인 경우를 정상 분산(normal dispersion)이라 하고 양수(+)인 경우를 비정상 분산(anomalous dispersion)이라고 한다. 이 값이 영이 아니면 광펄스를 이루는 여러 파장의 빛이 재료를 통하여 진행할 때 서로 다른 시간 지연을 갖게 되어 신호 펄스폭의 넓어지므로 원래의 광신호 파형과 다른 모양을 갖게 된다.

단일 모드 광섬유의 코어를 이루는 단면이 완전

한 원형을 유지하는 경우에는 수직인 편광을 가지는 두 개의 서로 다른 모드가 같은 군지연을 가지고 전파될 수 있지만, 광섬유의 제조과정에서 단면이 약간 찌그러지거나 광섬유에 압력이 가해지면 광섬유는 복굴절화 된다. 이와 같이 광섬유가 복굴절화 되면 광신호의 편광상태가 광섬유를 진행하면서 변할 뿐만 아니라 서로 수직인 편광을 가지는 두 개의 편광 모드는 서로 다른 군지연을 갖게 된다. 이 현상을 편광 모드 분산이라고 부른다. 지금까지는 광섬유의 색분산에 의한 제한이 광전송 시스템의 설계에 있어서 최대 장애가 되어온 관계로 편광분산에 대한 고려는 없었지만, 현재까지 개발된 여러 가지 분산보상 기술을 사용하여 색분산에 의한 장애를 극복한 상태에 있게 될 미래의 수십 Gb/s의 광전송 시스템에서는, 편광분산이 전송용량 및 전송거리에 제한 요인이 될 것으로 예상된다.

## 2.2 비선형적 특성

재질측면에서 석영 glass는 비교적 비선형성이 작은 재료( $n_2=3 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ ) 이므로 종래의 광전송 시스템내에서는 비선형 효과에 대하여 고려할 필요가 없었지만, 광증폭기의 출현에 의하여 광섬유내에 입사되는 입력 광신호의 세기가 커지고, 전송거리가 연장되어 상호작용 길이가 길어짐에 따라 광섬유의 비선형성은 극히 중요하게 고려되어야 할 특성이 되었다. 특히, 여러 파장의 광신호를 하나의 광섬유를 통하여 송수신하는 파장 다중전송시에는 파장이 다른 다수의 신호광이 동시에 하나의 광섬유내에서 전송되기 때문에 서로 다른 파장간의 상호작용의 영향이 현저하게 커진다.

원자 주변의 전자에 미치는 강한 구속력의 전기장보다 더 큰 전기장을 가지는 광 전자기파를 물질에 가하면, 원자에 구속된 전자들은 비조화적인(anharmonic) 운동을 하게 된다. 이러한 운동의 결과로, 가해진 광 전기장과 물질내에 유도된 분극(polarization) 벡터사이에는 비선형 관계식이 나타

나는데 이를 광학적 비선형성이라고 한다[5].

광섬유내에서 나타나는 광학적 비선형 효과의 대표적인 현상은 Self Phase Modulation(SPM), Cross Phase Modulation(XPM), 광 Kerr효과와 4광파 혼합(Four-Wave Mixing : FWM) 등 여러 현상이 있는데 대부분이 3차 광학적 비선형성에 의한 다. 광섬유의 비선형성에 의하여 나타나는 현상중 가장 쉽게 확인할 수 있는 효과는 빔세기에 의존한 굴절률 변화이다.

$$n(I) = n_0 + n_2 I$$

$$n_2 = \frac{3 \chi^{(3)}_{1111}}{4 \epsilon_0 n_0^2 c}$$

..... (1)

$\epsilon_0$  는 진공의 permittivity를 나타내고  $\chi^{(3)}$ 는 3차 광비선형성의 크기를 나타내는 계수이다.

이 효과에 의하여 광섬유내의 광신호의 세기가 증가하면 굴절률이 증가하게 되고 그에 따라서 신호 펄스의 위상도 변하게 됨을 알 수 있다.

$$\phi_{NL} = \frac{2\pi L n_2 I}{\lambda}$$

..... (2)

이 현상을 SPM이라고 한다. 순간적인 광펄스의 위상 변화는 펄스의 순간적인 광 주파수의 변화로 이해할 수 있다.

$$\Delta\omega = -\frac{d\phi_{NL}}{dt} = -\left(\frac{2\pi n_2 L}{\lambda}\right) \frac{dI}{dt} \propto -\frac{dI}{dt}$$

..... (3)

이 비선형 효과에 의하면 광신호 펄스의 앞단은 장파장쪽으로 이동함을 (3)식으로부터 알 수 있는데, 정상 분산인 경우에는 장파장의 군속도가 단파장에 비하여 빠르므로 광신호 펄스가 광섬유를 통

과하면서 넓어지는 현상이 나타난다. SPM의 효과는 광섬유의 분산이 영의 값을 갖는 경우에는 그 효과를 현저히 감소할 수 있다.

두 개의 광신호가 같은 광섬유를 따라 전달되면, 각 신호는 앞서 언급한 SPM효과 이외에 다른 광신호에 의하여 유도된 굴절률 변화를 경험하게 된다. 이로 인하여 위상 변조를 겪게 되는데 이를 XPM이라고 부른다. 이효과는 두 개의 광신호가 상호 만나야 발생하므로, 두 광 신호 펄스의 전달 속도가 같으면 그 효과를 가장 크게 할 수 있다. 즉, XPM은 SPM과는 반대로 광섬유의 분산이 영 분산인 경우 그 효과가 커진다. 서로 다른 파장을 가지는 광펄스 사이에 XPM과 같은 효과에 의하여 서로 영향을 미쳐 위상을 변화시키기는 경우도 있지만, 에너지 교환이 이루어지거나 새로운 파장의 광을 발생시키기도 한다. 이러한 현상은 XPM과는 다른 비선형적 현상의 일종으로서 FWM이라고 부른다. FWM효과를 크게 고려해야할 경우는, 분산이 작은 광섬유를 통하여 Dense Wavelength Division Multiplexing(DWDM) 통신을 하는 경우이다. 광신호간의 파장 간격이 서로 같은 값을 가지면 FWM에 의하여 광신호의 파장을 변화시키는 효과를 유발하여 WDM 광신호간의 혼선 요인이 된다. 이러한 혼선을 제거하기 위해서는 신호 파장 간의 간격을 일치시키지 않거나 광섬유의 분산을 적당히 조절하여 다른 파장의 광펄스간에 FWM이 발생하는 조건을 없애야 한다.

광섬유 단면의 찌그러짐이 앞서 언급한 바대로 광도파로의 굴절률 분포의 균일성을 깨는 작용을 하는 것과 같이 광비선형성에 의해서도 단면에 분포하는 굴절률 분포의 균일성에 대한 변화를 가져올 수 있다. 즉, 어느 한 방향으로 선형 편광된 강한 광신호는 편광 방향과 수직인 방향에 서로 다른 굴절률 값을 유도한다. 이로 인하여 광신호의 전파에 영향을 미칠수 있으며 이러한 효과를 광 Kerr 효과라고 부른다. 이 효과는 광통신 시스템 내에 편광의존 손실(Polarization-dependent Loss : PDL)과 같은 편광의존 요소가 없다면 광신호 전

송에 큰 장애요인 되지 않으며, 역으로 이러한 효과를 이용하여 빠른 동작시간을 갖는 광 shutter를 만들수 있다[6].

광섬유의 비선형성을 나타내는 지수로 비선형정수라는 매개변수를 사용하기도 한다. 광섬유의 비선형정수는 일반적으로 (4)식과 같이 정의된다.

$$\text{비선형정수} = \frac{\text{비선형굴절률}}{\text{실효코아 단면적}} \quad (4)$$

위 식에서 비선형 굴절률은 재료가 가지는 굴절률의 광세기 의존성을 나타내는 계수이며 glass 조성에 의존하는 물성계수  $n_2$  이다. 실효코아 단면적은 광섬유내를 통과하는 광세기가 광섬유 단면내의 퍼짐 정도를 나타내는 매개변수이다. 이것은 전송되는 광신호 세기가 같더라도 광섬유 단면내에 강하게 몰려 있는 경우, 국소적인 광세기 밀도가 높아지는 효과를 얻을 수 있다는 것으로 정의식에서 실효코아 단면적을 크게 하면 광섬유의 비선형정수가 작아진다는 것을 쉽게 알 수 있다.

지금까지 앞서 언급한 사항은 강한 광 전기장에 대하여 물질이 갖는 전자적인 반응에 의한 비선형 현상이지만 이밖에 물질의 양자화된 격자진동 상태(phonon)에 의한 현상도 발생한다[7]. 이 현상은 2개의 광 포톤과 1개의 포논의 상호작용에 의하여 나타나는 현상이므로 3차 비선형효과로 볼수 있다. 강한 펄프 빔이 입사하여 포논에 의하여 산란되면서 포논의 에너지에 해당하는 양만큼 파장이 전이된 광의 빔으로 에너지를 전달하기 때문에 일종의 유도 광 산란(scattering) 효과이다. 포논은 파수 벡터의 값이 영벡터인 지점에서의 각진동 값에 따라 optic 포논과 acoustic 포논으로 나뉘는데 optic 포논에 의한 산란은 유도 라만 산란(Stimulated Raman Scattering : SRS)이라 부르고 acoustic 포논에 의한 산란은 유도 브릴리안 산란(Stimulated Brillouin Scattering : SBS)이라고 한다. 광섬유를 통한 신호 전송에 있어서 SRS와 SBS는

신호 광의 파장변환에 기여하므로 선형적인 광신호 감소 효과 이외에 또다른 형태의 신호광 감소요인이 된다. SRS는 특별히 1240nm나 1460nm의 광으로 펌핑하여 1300nm나 1550nm의 통신용 파장대역의 광증폭에 사용하기에 적합하다[8].

### III 분산 보상 기술

EDFA 기술의 급속한 발전과 더불어 선진국을 중심으로 단일 모드 광섬유를 이용하여 155 $\mu$ m 파장대역의 광을 사용하여 장거리 고속 광전송을 하고자 하는 요구가 늘어나고 있다. 기존의 단일 모드 광섬유는 155 $\mu$ m 파장대역에서 +17ps/nm/km 정도의 큰 파장분산을 가지기 때문에 어떠한 수단으로든지 10Gbps이상의 시간다중(Time Division Multiplexing : TDM) 장거리 초고속 광전송시에는 이 파장 분산을 상쇄하는 분산보상 기술이 필요하다.

직접변조 방식의 다중양자 우물구조 DFB 레이저 다이오드를 신호 전송기로 사용하여 10Gb/s의 신호를 전송하면 레이저 처핑에 의하여 최대 링크 길이가 3.6 km 밖에 되지 못하는 것으로 알려져 있다. 만약 직접 변조대신에 외부에서 광을 변조할수 있는 변조기를 사용하게 되면 (5)식으로 표현되어지는 분산제한(dispersion limit)식으로부터[9]

$$B^2DL = c/(2 \lambda^2) \quad \dots \dots \dots (5)$$

파장( $\lambda$ )이 1550nm인 광 펄스가 분산(D)이 17ps/(nm km)인 단일 모드 광섬유를 10Gb/s의 전송속도(B)로 통과하는 경우에는 링크길이(L)가 37km로 제한됨을 알 수 있다. 분산제한을 극복하여 이와 같이 짧은 전송거리를 늘리는 방법으로 다음과 같은 여러 방안이 발표되었다.

#### 3.1 DFB 광원의 주파수 전이 (Frequency-Shift Key)

**변조[10]**

다중양자 우물 구조 DFB 레이저 다이오드의 공진기 내부에서의 광세기가 달라지면 출력 파장이 달라지는 효과(chirp)가 발생한다[11]. 레이저 문턱 전류이상의 바이어스 전류를 가한 상태에서 약간의 전류 신호를 가하면 레이저의 광주파수를 적당히 변화시키는 것이 가능하므로 레이저 다이오드의 직접 변조시 가해지는 전기적 디지털 신호인 0과 1의 상태에 서로 다른  $f_1$  과  $f_2$  라는 광 주파수를 대응시킬 수 있다. 이러한 광주파수의 변화는 곧 바로 트랜스미터 후단에 놓여 있는 판별자(descriminator)에 의하여 광세기의 변화로 변환된다. 판별자는  $f_1$  이나  $f_2$  의 광파장에 중심이 맞추어진 band-pass 필터로서 주파수 전이 신호를 비교적 작은 chirp을 가지는 광세기 변조 신호로 전환시켜 준다. 판별자로는 Fabry-Perot, Michelson이나 Mach-Zehnder 간섭계가 사용된다.

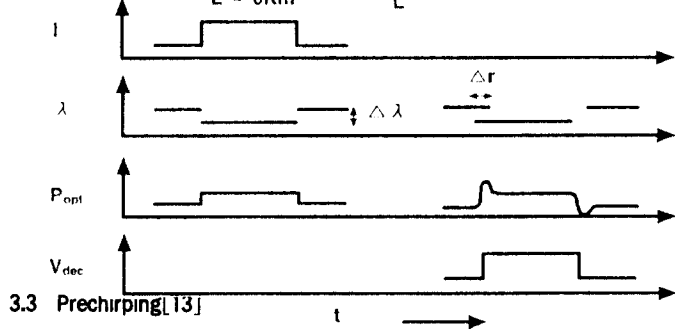
**3.2 Dispersion Supported Transmission[12]**

이 방식은 주파수 전이 방식의 일종이지만 판별자를 사용하지 않는다는 점이 다르다. 큰 전류 바이어스를 가한 상태에서 광 트랜스미터는 주파수가 전이된 출력신호를 발생한다. 이 신호를 곧바로 전송선로인 단일 모드 광섬유로 보내게 되면 주파수 변조된 신호가 광세기 변조화되어 광 감지기와 decision 회로에 의하여 신호 판독이 이루어진다.

전기적인 이진 신호에 의하여 광주파수는  $f_1$  과  $f_2 = f_1 + \Delta f$  라는 두개의 주파수를 갖는 광신호로 스위치 된다. 이 두 신호는 광섬유의 분산에 의하여 길이가  $L$ 인 광섬유의 출력단에 서로 다른 시간을 가지고 도착하게 되는데 그 지연시간은  $\Delta \tau = \Delta \lambda D L$  로 표현되어 진다. 광주파수 변조 과정에 필수적으로 수반되는 광세기 변조가 이루어진 NRZ 입력 광신호는 그림 1과 같이 시간 지연이

이루어져 서로 다른 주파수의 광신호의 간섭에 의한 양의 피크 그리고 시간이 지연되어 신호 성분이 도달하지 못하여 발생된 부의 피크를 볼 수 있다. 이와 같은 형태의 신호 펄스열을 가진 NRZ신호는 광 수신기에 도달 후 적당한 적분 회로 및 저 주파수 필터와 decision 회로를 거쳐 원래의 신호로 복원하게 된다. Booster와 preamplifier로서 EDFA(erbium-doped fiber amplifier)를 사용하고 125.8km의 단일모드 광섬유를 통한 전송실험에서 수신된 광신호의 BER 값이  $1.3 \times 10^{-11}$  인 결과가 보고 되었다[12].

그림 1.1 : 레이저 구동전류,  $\lambda$  : 레이저 파장,  $P_{out}$  : 광세기,  $V_{dec}$  : decision회로의 출력전압



**3.3 Prechirping[13]**

광신호를 전송하기전에 미리 트랜스미터에서 출력되는 NRZ 신호의 펄스를 따라 광 주파수를 선형적으로 증가시켜 주는 chirp을 미리 가하면, 광섬유의 색분산에 의한 펄스의 시간폭 넓어짐을 보상할 수 있다. 광섬유에 의한 분산을 보상하기 위하여 선형 chirp을 가하는 것이 가장 이상적이다. 그러나 레이저 후단에 놓여 있는 광변조기에 실리는 데이터 신호와 위상을 맞추어, 사인 함수적으로 변하는 전기적 클럭 신호와 dc 바이어스를 고속 광신호 트랜스미터를 구성하는CW(continuous wave) 레이저에 가해주면 선형에 가까운 chirp을 가진 광신호를 비교적 간단히 얻을 수 있다. 링크내의 광섬유의 길이 변화에 의하여 보상해야할 색분산의 양이 변할 경우는 클럭신호의 진폭을 조절하여 레

이저에 발생하는 처평의 양을 조절하여 보상한다. 이와 같은 방법으로 450km의 전송거리를 통하여 5Gb/s의 광신호를 전송한 예가 보고되었다[13].

### 3.4 Duobinary Optical Signal Transmission[14]

최근 15여년 동안 기술의 발달로 계속 증가되어 온 광신호의 전송용량이 근본적으로 그 한계에 도달하였기 때문에 최근에 전송용량을 증대하기 위한 신호값의 복이진화(Duobinary)가 광전송에도 주요 관심사로 떠오르고 있다. 복이진화 변조기술은 기존의 "1"과 "0" 값을 가지는 NRZ 데이터를 "2", "1"과 "0"의 신호 레벨로 변환함으로써 주어진 채널 밴드폭에 대하여 전송 속도를 두배로 만들 수 있는 기술이다. 앞절에서 여러번 언급한 바와 같이 광섬유의 색분산은 주어진 전송거리에 대한 최대 채널 밴드폭을 제한한다. 그러나 복이진 광신호 변조를 사용하면 광신호 채널 밴드폭을 반

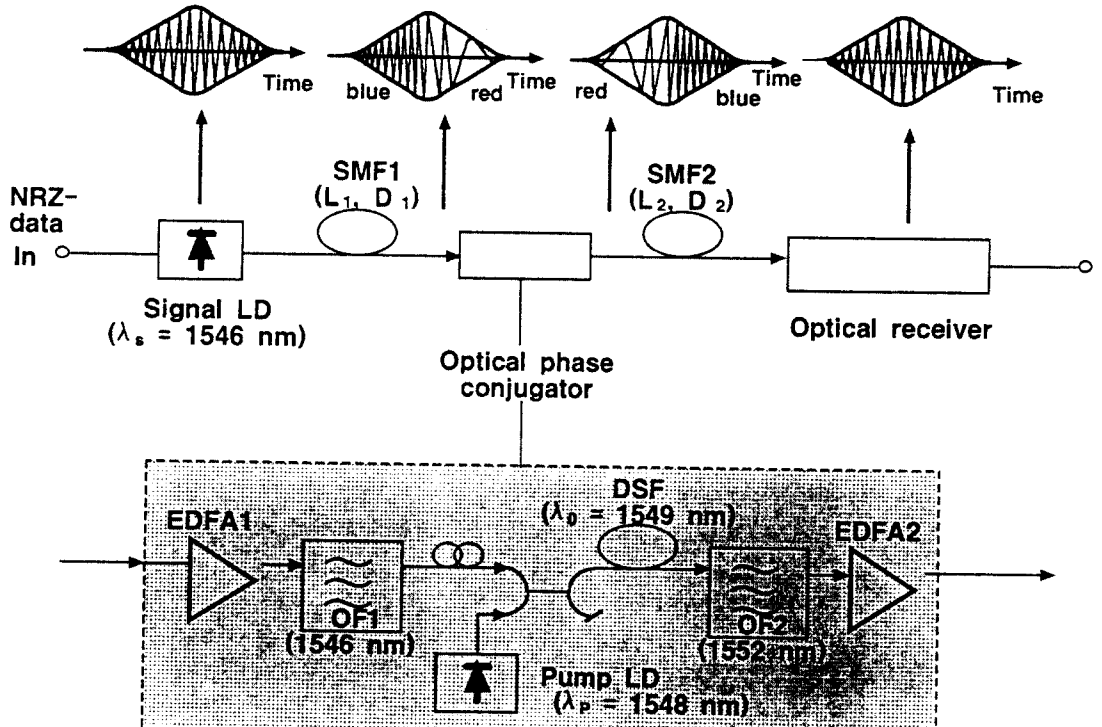
으로 줄임으로서 전송거리를 상당히 증가하고 전송용량의 크기를 최대로 할 수 있다. 이러한 변조 방식을 통한 분산제한 극복방법의 장점은 각각의 전송 링크 특성에 맞추어 송수신단의 분산 보상용 부품을 조절하는 번거로움이 없을 뿐만 아니라 송수신기에서 처리되는 전기적 신호의 밴드폭을 반으로 줄일 수 있다는 점이다.

### 3.5 위상 공액 (Phase Conjugation)[15]

위상공액파는 2차 광비선형에 의한 해당하는 삼광파 혼합이나 3차 광비선형에 의한 사광파 혼합에 의하여 발생한다. 광섬유는 재료인 silica가 가지는 공간 반전 유사성 때문에 silica 광섬유에서 나타나는 위상 공액파는 사광파 혼합에 의하여 나타나는 현상이다.

분산보상을 위한 비선형 광 위상공액기(optical phase conjugation : OPC)는 두 부분으로 나뉘어진

그림 2. 위상공액에 의한 분산보상 시스템.  
입력 신호광 파장  $\lambda_s$ (1546 nm), 펌프광 파장  $\lambda_p$ (1548 nm), 위상공액된 출력광 파장  $\lambda_c$ (1552 nm)



단일 모드 광섬유사이에 놓여진다. 트랜스미터에서 나온 광은 길이가  $L$ 인 첫번째 부분의 광섬유를 통과하면서 광섬유의 선형색분산의 영향을 받게 되어, 펄스의 시작부는 끝 부분과 비교하여 장파장은 파장으로 이동한다. OPC는 비선형 광 매질(단일모드 광섬유나 반도체 광증폭기), CW 펌프 레이저 그리고 펌프 광과 신호광을 손실을 낮추어 결합시키는 WDM 결합기로 구성되어 있다. 비선형 매질내에 입사된 신호 광펄스는 펌프광과 사광과 혼합 과정을 거쳐 그림 2와 같이 또 다른 파장의 광을 생성하는데 그 스펙트럼 모양은 신호 광펄스와 비교하여 펌프광의 파장을 중심으로 거울 반사된 모양을 갖는다. 시간축에서 보면 생성된 펄스의 길이는 OPC에 입사한 펄스의 길이와 같지만 시작부분은 끝 부분에 비하여 장파장쪽으로 이동된 모양을 갖는다. 이는 사광과 혼합이 이루어지기 위한 위상정합조건(phase matching condition :  $2\omega_p - \omega_s = \omega_c$ )에 기인한다. OPC 출력광은 펌프광과 신호 펄스를 제거하기 위한 파장 필터기를 거친 후, 길이가  $L$ 인 나머지 광섬유를 통과하게 되면 OPC 출력단에서 신호광이 지닌 chirp과 나머지 광섬유의 분산으로 인하여 원래의 광신호 펄스로 복원된다.

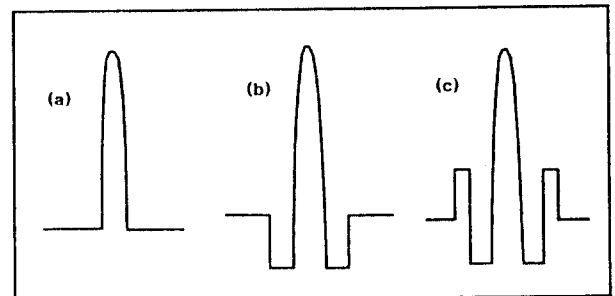
### 3.6 분산 등가 (Dispersion Equalization)

광섬유의 분산제한을 극복하여 고속의 광전송을 이루는 간단한 방법중의 하나는 수신부에 적당한 광부품을 삽입하여 전체 전송로의 평균 색분산의 값을 영으로 맞추어 주는 방법이다. 여기서 전체 분산을 영의 값으로 맞추어 주는 광부품의 색분산은 선형 색분산으로서, 링크내의 전체 광섬유가 가지는 분산과 비교하여 크기는 같지만 부호가 다른 값을 갖도록 한다.

분산등가 기술로는 평면 광도파로나 광섬유 격자(Fiber Bragg Grating) 기술[16]에 기초한 분산등가가 개발되었으나  $1.55\mu\text{m}$ 대에서 큰 음(-)의 파장 분산값을 보이는 분산보상 광섬유(Dispersion

Compensation Fiber : DCF)의 사용은 유력한 방법으로 떠오르고 있다. 전형적인 분산보상 광섬유는  $1.55\mu\text{m}$ 에서  $-100\text{ps/nm/km}$  정도의 파장 분산값을 보여 5~6km 길이의 기존 단일모드 광섬유에 대해 1km길이의 분산보상 광섬유를 적절히 삽입(통상 전송장치와 함께 전화국내에 설치)하게 되면 전체 광선로의 파장분산을 영으로 할 수 있다. 분산을 보상하는 성능은 손실당 분산값으로 정의되는 성능지수(FOM : Figure of Merit)로 평가되는 일이 많으며  $\text{FOM} = 200 \sim 300\text{ps/nm/dB}$  정도의 고성능 분산보상 광섬유가 다양하게 보고되고 있다[17]. 그림 5는 분산보상 광섬유의 대표적인 굴절률 분포 형태를 보여 준다. 이런 광섬유를 소형합체에 수납 광부품화하여 실제 상용 광전송시스템에 사용되고 있다. 그림 3에서의 matched clad형과 같은 분산보상 광섬유는 그 단순한 구조로 인해 저손실성, 제조성이 우수하지만  $1.55\mu\text{m}$  파장대역의 분산기울기는 기존 단일모드 광섬유와 같은 양의 부호 값을 가지므로 분산 보상후의 전체 파장 분산에 있어 분산 기울기를 저감하는 효과가 없다. 한편 W형이나 segment형과 같은 구조에서는 그 구조 매개변수를 조절함에 따라 분산 기울기를 음의부호 값을

그림 3. 분산보상 광섬유의 굴절률 분포 형태  
(a) matched clad형, (b) W형, (c) segment형



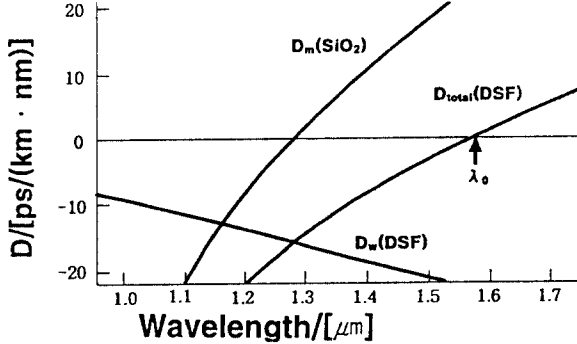
로 하여 분산값과 분산기울기의 비를 기존 단일모드 광섬유의 것과 반대로 일치하도록 하는 것이 가능하다. 이 경우는 전체 광선로에 대한 분산도 없고 분산 기울기도 서로 상쇄되어 영에 가까워지게 되므로 넓은 파장대역에서 파장분산을 작게 하는 것이 가능하다.



### 3.7 분산 천이 기술

도파로 분산을 의도적으로 크게 설계하여 그림

그림 4. 분산천이 광섬유의 분산특성 곡선



4에서 보듯이 전송파장 대역인 1.55 $\mu\text{m}$  파장대로 영 분산 파장을 이동시킨 광섬유를 분산천이 광섬유 (Dispersion Shifted Fiber : DSF)라고 한다.

석영계 광섬유의 전송 광손실이 최저인 1.55 $\mu\text{m}$  파장대에서 파장 분산을 작게한 분산천이 광섬유는 1.55 $\mu\text{m}$  파장의 광신호 전송에 적합한 우수한 광 전송로이다. 그러나 1.55 $\mu\text{m}$  파장대역의 광신호를 다중화하여 긴거리를 통하여 신호를 전송하는 경우 사광파 혼합을 중심으로 하는 비선형 광학 효과에 의한 영향을 무시할 수 없다[18]. 이 경우에는 파장 다중 채널수에 제약이 발생하여 전송시스템의 성능이 전송로에 의하여 제한된다. 이러한 성능 제한을 없애기 위하여 적당히 분산곡선이 천이된 광섬유를 개발하는 노력이 필요하다. 사광파 혼합은 파장이 다른 광신호끼리의 위상정합조건에 의존한다. 이러한 위상정합 조건을 억제하기 위해서는 오히려 신호 채널에서의 군지연 시간(Group Delay Time)에 차이를 주는 것이 좋다. 이것은 신호 파장 대역의 광섬유 파장 분산이 영에 가깝지 않다는 것을 의미한다. 비선형 현상의 발생을 억제하기 위해서는 전송로의 비선형성을 낮추는 것이 근본적인 대책이다. 영분산 파장의 설정은 종래의 분산천이 광섬유를 기본으로하여 코아의 구조를 나타내는 여러 매개 변수를 조절하는 것에 의

하여 비교적 용이하게 실현 가능하다. 이에 따라 영분산 파장을 1.55 $\mu\text{m}$  파장에서 약간 옮겨 놓은 형태의 분산 천이 광섬유를 non-zero 분산천이 광섬유(NZ-DSF)라고 부른다. non-zero 분산천이 광섬유는 신호파장대역(1.55 $\mu\text{m}$  대)에서 유한한 파장 분산값 ( - 수 ps/nm/km)을 보이므로 장거리 고속 광전송에서는 전체 광선로에 의하여 축적된 파장 분산의 영향에 의한 파형왜곡 등의 문제를 야기할 수 있다. 전송거리, 광신호의 전송율 등에 따라서 전체 전송로에 대한 파장 분산을 상쇄시키는 영에 가까운 분산보상이 필요하다. 정(+) 분산과 부(-) 분산의 non-zero 분산 천이 광섬유를 조합하거나, 수신단에 앞절에서 설명한 역부호의 큰 파장분산을 주는 광섬유 (분산보상 광섬유)를 삽입하는 방법이 가능하다. 광섬유의 비선형성을 낮추는 데는 비선형 정수의 정의에 의하여 silica glass 자체의 비선형 굴절률을 낮추거나 실효 코아 단면적을 확대하는 2가지 방법을 고려할 수 있다. 석영계 glass의 비선형 굴절률은 일반적으로 코아에 첨가되는 germanium의 첨가량에 따라 거의 선형적으로 커지는 것으로 알려져 있다[19]. 그러므로 비선형 굴절률을 낮추는 방법은 코아내의 germanium 첨가량을 줄이거나 실효코아 단면적을 크게 하는 것이다. 그러나 실효코아 단면적을 확대하게 되면 보통 광을 코아에 붙잡아 놓는 힘이 약해져서 굴곡 손실 특성이 좋지 않다. 굴곡 손실이 커지면 케이블 제작과 포설시에 전송손실이 증가할 가능성이 커져 사용상 문제가 발생한다. 따라서 종래의 광섬유와 같은 굴곡 손실 특성을 유지하면서 큰 실효 코아 단면적을 가지는 분산천이 광섬유를 개발하는 것이 필요하다.

## IV. 광섬유 광증폭 기술

광증폭은 통신에 사용되는 광신호를 전기적인 신호로 변환함이 없이 작아진 광신호의 크기를 직접 증폭하는 기술을 말한다. 이 기술을 사용하

면 광선로인 광섬유나 다른 광부품에 의한 광손실을 보상할 수 있게 된다. 이 기술은 기존의 광전 증계기(optoelectronic regenerator) 처럼 retiming과 reshaping 기능 까지 포함하는 것은 아니고 단순히 작아진 신호를 증폭하는 기능만을 가지지만 이것이 가지는 장점은 넓은 전송 대역폭(약 4THz)에 걸쳐 50dB 까지의 높은 이득(gain)을 갖는다는 점이다. 지금까지 광증폭기를 사용한 응용기술에 관한 많은 발전이 이루어져 왔으며 특히 미래의 통신 시스템이나 네트워크 설계에 필수적인 부품으로 자리잡아 가고 있다. Point-to-point 통신 시스템에서는 후치증폭기(power booster), repeater 혹은 전치 증폭기(preamplifier)로서 사용되고 있으며 다파장(Wavelength Division Multiplexing : WDM) 전송 네트워크에서는 광파장 변환기나 광스위치 매트릭스에서 게이트로 사용될 수 있을 것으로 여겨지고 있다[20].

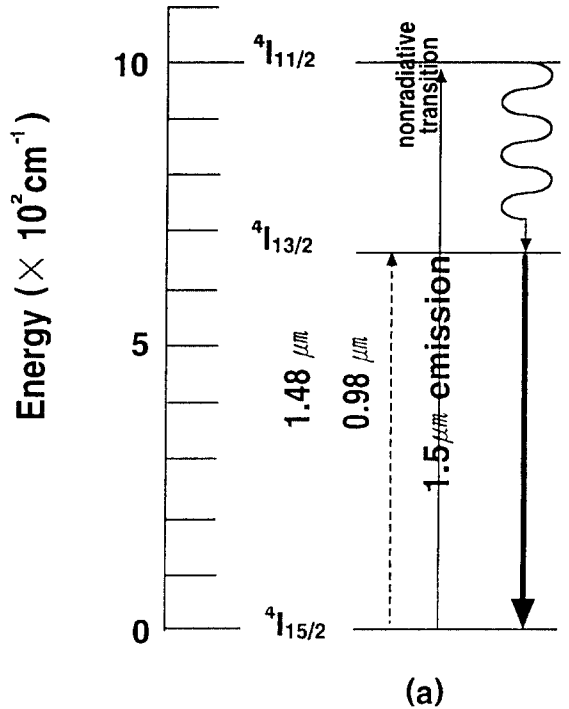
본고에서는 증폭기의 활성매질로 희토류 원소가 함유된 광섬유를 사용함으로써 시스템에서 사용되는 광섬유와 쉽게 접속할 수 있고 접속 손실 또한 적으며 편광 의존성이 없는 등, 여러 장점을 갖춘 광섬유 광증폭기에 대하여 알아본다.

#### 4.1 단일 채널 광섬유 광증폭 기술

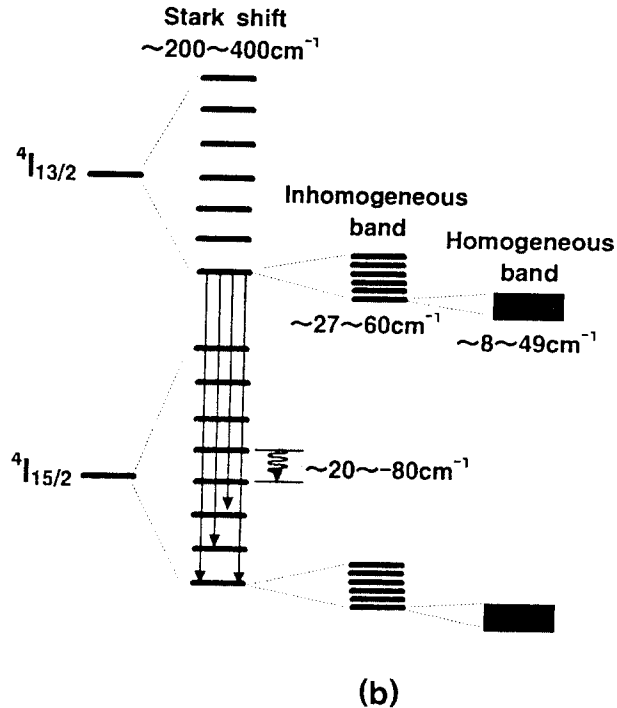
광섬유 광증폭기의 구조는 간단히 활성 광섬유와 활성 광섬유를 높은 에너지 상태로 여기할 수 있는 펌프 레이저, 신호광과 펌프광을 활성 광섬유 내로 손실없이 결합시킬 수 있는 WDM 커플러와 아이솔레이터등으로 이루어져 있다.

광섬유에 의한 광증폭은 실리카 광섬유에 희토류 원소인 erbium, praseodymium 혹은 ytterbium을 첨가한 활성 광섬유의 유도 방출(stimulated emission) 과정을 통하여 이루어진다. 증폭기의 활성 매질에 입사된 신호광을 이루는 광자들은 유도방출 과정에 의하여 그들과 같은 주파수와 위상 그리고 편광상태를 가지는 광자들을 만들어 내어

그림 5. (a) 어븀 함유 광섬유의 1.5 $\mu\text{m}$ 대 발광준위



(b) 발광준위의 미세구조



신호광을 증폭시킨다. 이와 같은 유도 방출 과정이 이루어 지려면 활성매질내에 밀도 반전(population inversion) 상태가 만들어져야 한다. 이 상태는 활성매질내의 원자 에너지 준위중 높은 에너지 준위로 여기된 원자의 수가 일반적인 정상 분포(normal distribution)와 다르게 월등히 더 많은 경우를 말한다. 이러한 밀도 반전은 광섬유 광증폭기의 경우에는 별도의 광원을 가지고 광학적인 pumping에 의하여 이루어 지고 있으며 반도체 광증폭기는 활성 매질내에 전극을 통한 바이어스 전류의 주입에 의하여 이루어 진다. 그림 5은  $Er^{3+}$  ion의 발광에너지 준위의 미세구조를 나타낸 것이다[21].

glass와 결정내에 첨가된  $Er^{3+}$  ion은 주위의 원자 배치에 의하여 결정되는 local field에 의한 영향을 받아 여러 에너지 준위로 분열된다 (Stark 분열). 이러한 Stark 분열에 의한 에너지 level은 local field의 강도에 의하여 결정되며 host내의 이온의 위치에 따라 다르다. 그 결과 발광 스펙트럼에 이른바 분균일 폭이 커지게 된다. 원자의 열운동에 의한 결정의 진동등은 이른바 균일폭을 유발시킨다. 그러므로  $Er^{3+}$  ion의  $4I_{15/2}$  등의 각 에너지 준위는 복수의 미세한 에너지 level로 형성되어 있으며 준위간의 상태 천이가  $Er^{3+}$  ion의 발광 스펙트럼을 결정한다. Host 물질의 종류에 따라서도 형광 스펙트럼이 달라지는데 순수 석영 glass내에서는 형광 스펙트럼이 좁지만 Al을 첨가하면 스펙트럼이 다소 넓어지는 것을 볼 수 있다. 특히, 불화물 glass내에서는 발광 스펙트럼의 폭이 이들과 비교하여 훨씬 넓은 형상을 하고 있다[22].

증폭기의 전체 이득 특성을 알기 위해서는 어븀 원자의 에너지 준위사이의 전이를 나타내는 율방정식(the rate equation)과 신호광과 여기광의 광섬유내의 전파방정식을 동시에 만족하는 해를 구해야 한다. 여기서 율방정식은 여기 에너지 준위에 위치하는 단위부피당 어븀 원자의 수의 변화를 나타내는 방정식이다. 이 율방정식과 광섬유를 통과하는 펌프 광과 신호광이 만족하는 전파방정식의

해를 얻으면 광증폭기의 증폭특성을 알 수 있다. 일반적인 어븀첨가 광섬유는 증폭 대역폭이 약 30nm이지만 이득 스펙트럼의 평탄성은 떨어진다. 이득 평탄성의 떨어짐은 장거리 파장다중 전송시스템에 일렬로 연결된 광증폭기의 사용을 제한하는 요인이 된다.

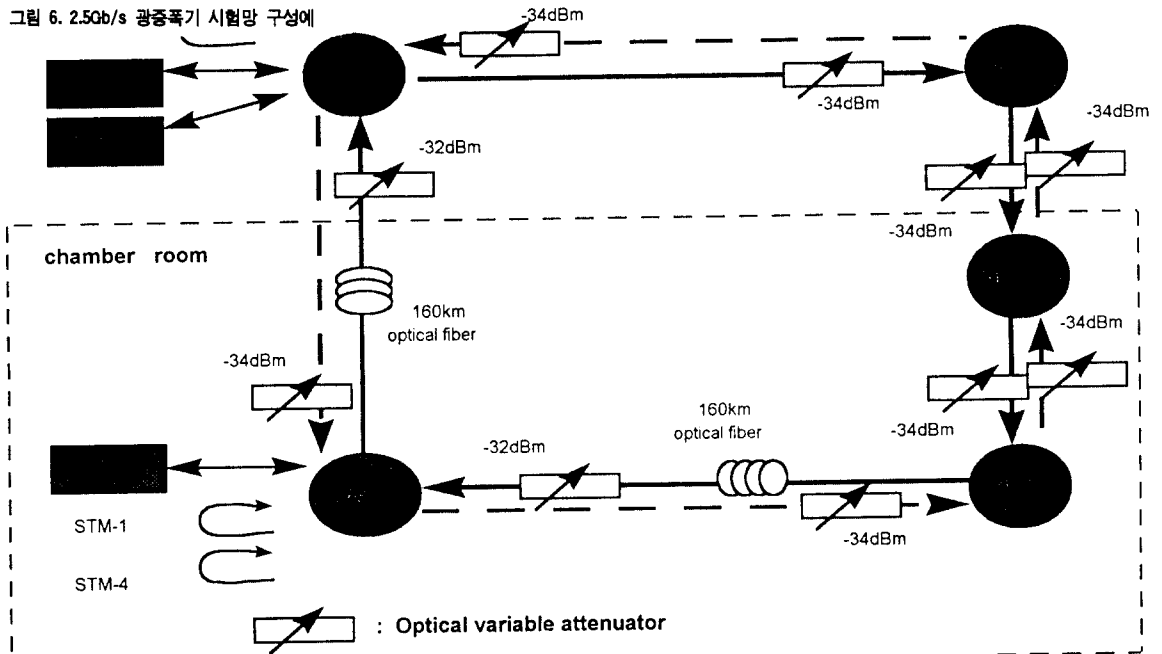
광증폭기내에서 밀도반전서 높은 에너지 준위에서 낮은 에너지 준위로 자연적인 소멸 혹은 전이가 존재한다. 그러한 전이는 신호광과 전혀 무관한 광자의 방출 과정에 해당한다. 이러한 자발적 방출에 의한 광은 증폭과정에서 신호광에 더해져 잡음의 원인이 된다. 잡음은 증폭기가 일렬로 연결된 전송시스템에서는 계속 누적되어 증폭될 수 있으므로 중요하게 고려해야할 요소가 된다. 전송 광신호의 출력 잡음은 신호광 및 자발적 방출광에 관련된 짧은 잡음(short noise), 신호광과 자발적 방출광 그리고 자발적 방출광과 자발적 방출광 사이의 간섭에 의하여 발생하는 잡음 등 네가지의 잡음 원인이 있다. 일반적으로 광필터를 사용하면 자발적 방출광의 짧은 잡음과 자발적 방출광사이의 간섭에 의한 잡음을 줄일 수 있으므로 대부분의 잡음 신호는 신호광과 자발적 방출광사이의 간섭 잡음 및 신호광의 짧은 잡음으로 이루어져 있다.

광증폭기를 실제적으로 시스템에 적용하려면 입력과 출력사이의 신호이득, 증폭 대역폭, 증폭과정에서 발생하는 잡음의 양, 입력신호의 편광 변화에 대한 증폭 이득의 민감도와 증폭 이득값이 정상적인 값에 비하여 3dB 정도 작아졌을때의 입력신호세기(saturation power)등의 많은 매개변수 값을 고려해야만 한다. 용도에 따르는 광증폭기의 최적화를 위해서는 이와 같은 많은 수의 매개 변수를 고려해야 하기 때문에 어븀 첨가 광섬유의 최적화를 위한 FOM에 초점을 맞추는 것이 중요하다.

#### 4.1.1 Small-Signal Amplifier

전치 증폭기나 in-line 증폭기로 사용되는 경우에는 입력신호 레벨이 낮은 관계로 비포화 영역에서

그림 6. 2.5Gb/s 광증폭기 시험망 구성예



증폭이 이루어진다. 입력신호 레벨이 작은 경우에는 증폭기의 이득은 입력 신호의 광세기에 무관하며 펌프광의 양자효율이 매우 낮아 주로 펌프광의 포톤들이 ASE를 이루는 포톤으로 전환되어 버린다. 그러므로 이러한 용도의 광증폭기의 최적화 목표는 시스템이 요구하는 이득을 최소의 펌프 광세기로 획득하는 것이다. 보다 적은 광세기로 레이저 다이오드를 작동시키면 그 만큼 수명이 연장되기 때문에 이는 증폭기 설계시 중요한 FOM이 된다.

#### 4.1.2 Large-Signal Amplifier

입력신호 레벨이 증가하면 펌프광이 신호광으로의 전환효율이 높아지고 ASE의 세기보다 신호광의 세기가 더 높아진다. 또한 증폭기의 잡음지수가 낮아지지만 입력 신호광의 세기가 커지면서 이득은 감소하게 된다. Large-signal 레벨의 입력신호를 증폭하기 위해서는 2개이상의 펌프 레이저를 사용해야 하는 경우가 있다. 그러한 경우에는 비

용과 구성이 복잡해지고 신뢰성도 떨어진다. 그러므로 후치증폭기의 FOM은 광섬유내에 펌프광을 신호광으로 전환해 주는 양자전환 효율(quantum conversion efficiency : QCE)을 크게 해 주는 것이다. 즉, 최적화의 목표는 보다 많은 수의 펌프 포톤을 증폭된 신호 포톤으로 전환해 주는 것이다. 이를 달성하기 위해서는 펌프광의 모드와 어븀원소의 분포를 최대한 겹쳐서 펌프 광세기의 문턱치를 작게 하는 것이 필요하다. 더불어 자발적 광방출률을 줄이고 유도 방출률을 늘리기 위해서는 신호 광모드와 여기 이온의 분포가 최대한 겹쳐도록 하여야 한다. 즉, 최대한 펌프광세기의 문턱치를 줄이고 유도 방출률을 최대화하는 것이 large-signal 증폭기의 FOM이다.

#### 4.1.3 전/후치 광증폭기를 사용한 2.5Gb/s 전송실험예

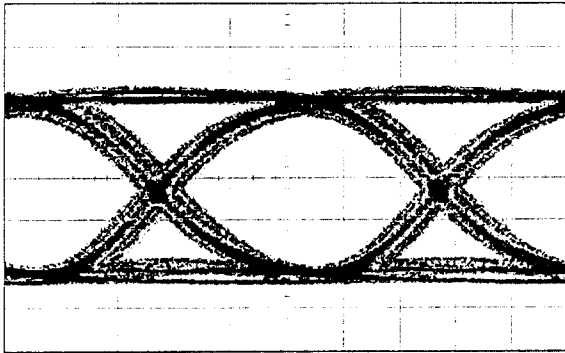
2.5Gb/s 광전송 시스템에 최적화된 전/후치 광증폭기를 사용하여 160km 광섬유를 통한 전송실험과 항온조실험의 구성 예를 그림 6에 나타내었다.

표 1. 광증폭기의 성능 규격

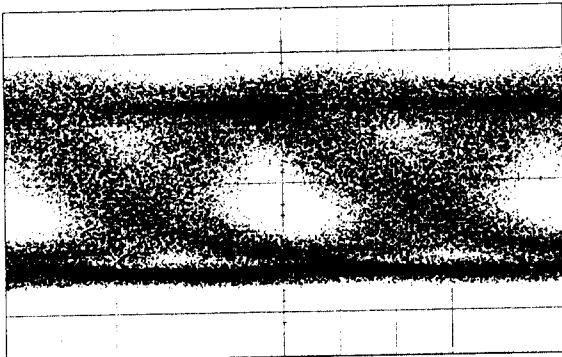
| 구 분    | 광전력증폭기      | 광전치증폭기    | 단위  |
|--------|-------------|-----------|-----|
| 동작 파장  | 1530 - 1565 |           | nm  |
| 입력 광전력 | -2 ~ +3     | -34 ~ -18 | dBm |
| 출력 광전력 | +12 ~ +15   | -18 ~ 0   | dBm |
| 최소 소광비 | 10          |           | dB  |
| 잡음 지수  |             | 5         | dB  |
| 동작 온도  | 0 < T < 50  |           | ℃   |

광증폭기는 100 mW 980 nm 파장의 pump Laser Diode를 사용하였으며 사용된 EDF의 길이는 후치 증폭기의 경우 출력세기, 전치증폭기의 경우 소신호 이득 및 잡음지수 측면에서 최적화된 것이다.

망구성은 분기결합 장치와 증계장치를 포함하여 그림 7. 광송신기의 출력과 160km전송후 광전치 증폭기의 출력 파형



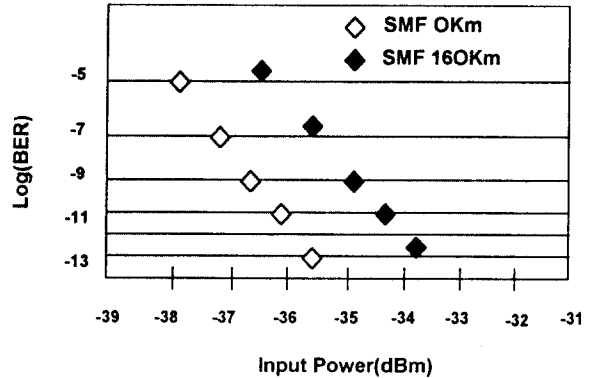
80 ps / div  
(a) 광송신기의 출력파형



80 ps / div  
(b) 광전치증폭기의 출력파형

5개 국소로 구성된 UPS(Unidirection Path Switching)망으로 구성하고 2개의 core에 대하여 광섬유를 연결하며 UPS0국소에 DS-3신호를 UPS4국소에 STM-1, STM-4신호를 주어 광전송 실험을 수행하였다. 2.5Gb/s 시스템에 적용되는 광증폭기는 160km 이상의 장거리 국간전송을 목표로 하므로 ITU 규격인 G.scvs를 따르며, 표 1은 광증폭기의 성능 규격을 나타낸 것이다[23].

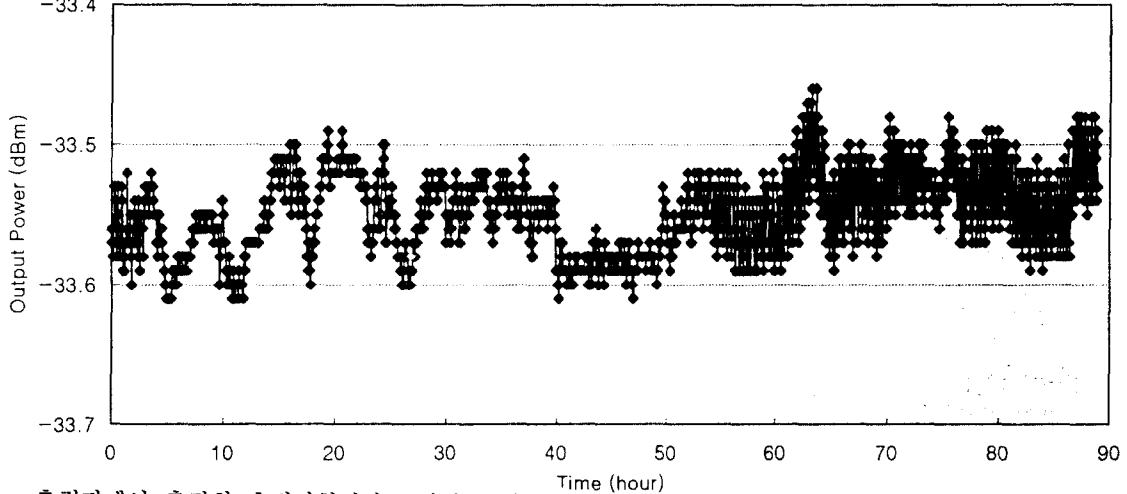
모든 고속부 유니트의 송신단에는 광전력증폭기를 사용하고 수신단에는 광전치증폭기와 밴드패스 필터를 사용하여 신호 파장을 제외한 증폭기의 ASE를 제거하도록 하였다. 160km 광섬유 전송라인의 손실은 광커넥터 접속손실을 포함하여 35dB이며, 광가변감쇄기를 사용하여 수신단의 최소 수  
그림 8. 광전치 증폭기 입력단의 BER



신감도는 -32dBm으로 하여 전체 손실을 44dB로 하였다. 광가변 감쇄기만을 사용한 경우에는 광경로 페널티를 고려하여 최소수신감도 -34dBm으로 하였다.

그림 7(a)는 UPS4 국소의 광섬유 전송라인의 광송신기의 출력파형을 나타낸다. 광원으로 사용한 DFB LD의 파장은 1552nm이고 송신 광출력은 0dBm, -20dB에서의 발진선폭은 0.23nm, 소광비는 12dB, 그리고 인접모드 억압비는 38dB이다. 그림 7(b)는 SMF 160km를 전송한후 광전치 증폭기의

그림 9. 광후치 증폭기의 광출력 변화율  
-33.4



출력단에서 측정된 출력파형이다. 이때 광전치증폭기의 잡음지수는 4.7dB이다. Eye pattern이 뚜렷하지 않은 것은 증폭기의 ASE 잡음이 누적되어 OSNR이 감소하고 신호광과 ASE 성분간의 비트잡음이 증가하였기 때문이다. 광전치증폭기의 입력광을 변화시키면서 측정된 BER 특성곡선을 그림 8에 나타내었다. 광전력증폭기와 광전치증폭기만을 사용하고 광섬유를 사용하지 않는 경우의 수신감도는 BER  $1 \times 10^{-12}$ 에서 -35.7dBm이다. 160km의 광섬유를 통한 광전송시 약 1.7dB의 광경로 패널티가 나타나고 -33.5dBm에서 error floor현상이 나타난다.

그림 9는 온도변화시 광전력증폭기의 광출력 변화를 나타낸 것이다. 온도를 0°C에서 50°C까지 변화시켜도 후치증폭기의 출력은 0.2dB이내의 흔들림 밖에 없는 아주 안정된 광출력변화를 얻을 수 있다.

이상의 실험결과 국간 전송로에 설치되어 있는 단일모드 광섬유를 2.5Gb/s 광전송 시스템에 적용하더라도 충분한 마진을 갖고 160km 전송을 할 수 있음을 알 수 있다.

## 4.2 광대역 광증폭 기술

서로 다른 파장을 갖는 다수의 광신호를 동시에 하나의 광섬유를 통하여 전송함으로써 대용량의 광전송과 파장 라우팅을 실현하는 것을 파장다중(Wavelength Division Multiplexing : WDM) 광전송이라 한다. 이 같은 광전송시스템에서는 증폭파장 특성이 평탄한 광대역의 광증폭기가 요구되는데 이를 WDM용 광증폭기라고 한다. 단순한 point-to-point 파장다중 전송시 전송용량을 크게 하기 위한 방법은 광증폭기의 광대역에 걸친 이득 평탄화이다. 만약 광증폭기의 이득 대역폭이 평탄하지 않고 불균일하다면, 여러개의 광증폭기가 일렬로 연결된 전송시스템에서 증폭기가 가지는 채널간의 작은 이득차, 수신단에서 수신 신호의 세기에 큰 차이를 유발하며 이로 인하여 각 채널이 가지는 BER의 차도 더불어서 큰 차이를 갖게 한다.

광대역 증폭특성을 갖도록 하는 방법은 주로 다음과 같은 방식이 고려되고 있다. Host 원소를 교체함으로써 희토류 이온의 발광스펙트럼을 조작하여 이득을 평탄화, 광대역화하는 방법, 이득 등가기를 삽입하여 이득을 평탄화하는 방법 그리고 발광특성이 다른 증폭매체를 조합하여 이득스펙트럼을 평탄화 및 광대역화하는 방식 등이 있다.

### 4.2.1 알루미늄 co-doped EDFA와 불화물 EDFA

순수한 석영 glass는 그물눈 구조에  $Er^{3+}$ 의 이온

이 들어가는 경우, 들어간 곳의 주위 구조는 국소 배위를 만족하기 때문에 정8면체 구조에서 왜곡된 4면체 구조로 바뀌게 된다. 이 때문에 Er<sup>3+</sup> 이온이 가지는 에너지 준위는 Stark 분열이 크게 나타난다. 그러나 석영 glass는 강한 공유결합을 하고 있어서 Er<sup>3+</sup> 이온이 들어간 site의 수가 한정되기 때문에 site의 상이(相異)에서 발생하는 불균일 폭은 크지않다. 그 결과 석영계 glass에 첨가된 Er<sup>3+</sup> 이온의 발광 및 증폭파장 특성은 피크값을 가지는 급격히 변하는 곡선이 된다. 이것을 개량하여 보다 평탄화된 발광 증폭 특성을 가지도록 하기 위하여 알루미늄 co-doped EDFA와 불화물 EDFA가 검토되었다. 두개 모두 Er<sup>3+</sup> 가의 알루미늄을 첨가하거나 이온 결합성의 불화물 glass를 사용함으로 국소 배위를 만족하기 때문에 Er<sup>3+</sup> 이온 주위의 왜곡구조 및 Er<sup>3+</sup> 이온의 전자구름의 왜곡을 작게하여 발광스펙트럼의 파장 의존성을 평탄하게 한다. 알루미늄 co-doped EDFA에서는 1540~1560nm 사이에서 20nm의 이득 평탄 영역의 확보가 가능하며 불화물 EDFA에서는 1530~1560nm 파장영역에서 30nm의 평탄한 이득 스펙트럼이 얻어진다[22].

#### 4.2.2 수동적 이득 등가기

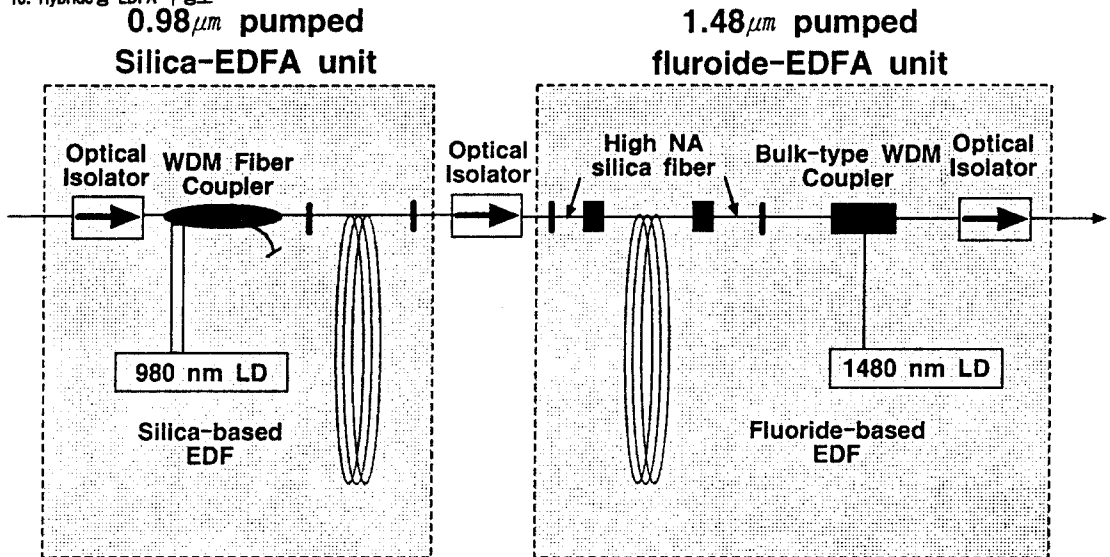
EDFA의 이득을 평탄화하기 위하여 EDFA의 이

득 파장 특성과 역특성을 가지는 광필터(이득 등가기)를 삽입하여 이득을 평탄화하는 수동적인 방법이 있다. 이득 등가기로는 광섬유 격자, 평면도파로형 광필터, Mach-Zehnder 등이 검토되고 있다. 이득등가기는 기본적으로 손실매체로서 파장특성을 정밀하게 맞출 수 있다는 점으로 인하여 양호한 평탄화를 실현가능하게 하고 있다. 최근에는 장주기 광섬유 격자를 개발하여 40nm에 이르는 파장영역에서 이득 평탄화를 실현한 예가 있다[24]. 수동형 필터를 사용하는 이득평탄화 방법의 장점은 구조가 간단하다는 점과 낮은 광 손실을 갖는다는 사실이다. 그러나 단점은 입력신호 레벨의 증가시 이득 포화에 의하여 발생하는 이득의 변화에 능동적으로 대처를 못한다는 점이다.

#### 4.2.3 능동형 광필터를 사용한 이득 평탄화

RF 구동신호에 의하여 파장 투과 특성을 조절하는 acousto-optic tunable filter(AOTF)는, 가해지는 RF 신호의 수와 주파수 그리고 신호 세기를 각각 조절하여 필터되는 파장의 위치와 깊이 그리고 넓이를 조절하는 것이 가능하다. 이러한 능동적 필터를 광증폭기내에서 이득 평탄화 필터로 사용하는 경우의 장점은 다른 방법과 달리 낮은 입력

그림 10. Hybride형 EDFA 구성도



—|— Thermally Expanded Core (TEC)

—■— Tilted V-groove Connection

레벨뿐만 아니라 이득 포화 영역에서도 충분히 이득 평탄화 기능을 충분히 할 수 있다는 점이다 [25]. AOTF 사용의 단점은 많은 수의 채널을 이득 등가화 하는 경우에는 비교적 높은 RF 세기를 필요로 한다는 점이다.

#### 4.2.4 Hybrid형 구성에 의한 이득 평탄화

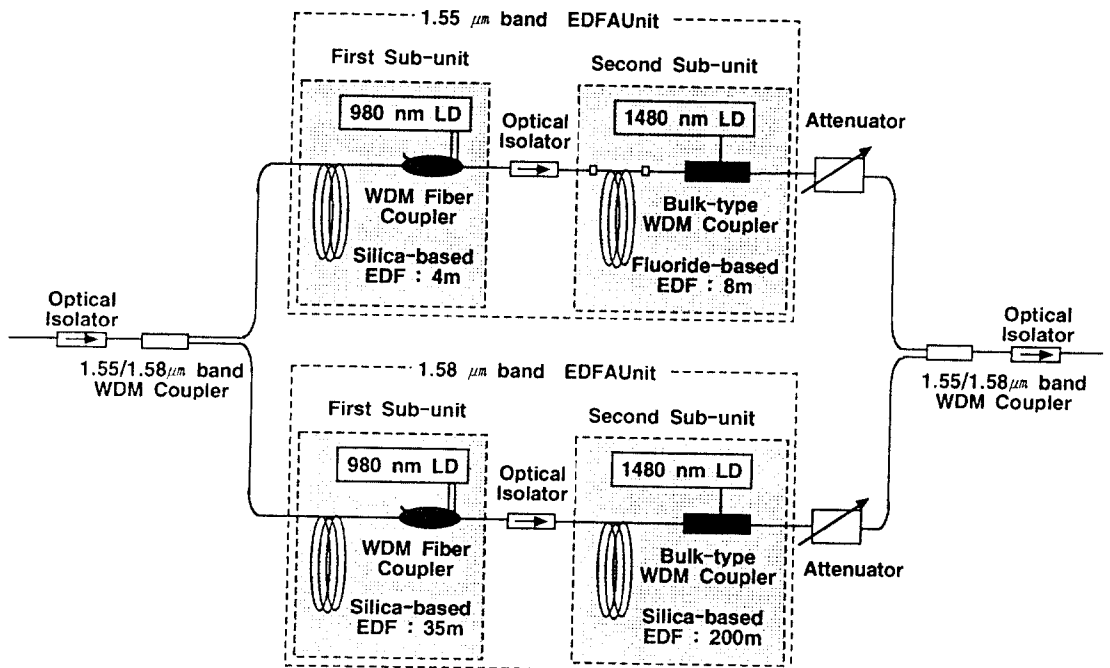
EDFA의 이득을 평탄화하는 또다른 방법은 특성이 다른 증폭매체를 조합하는 방법이 있는데, 알루미늄 co-doped EDF, 불화물 EDF, 다성분 EDF 등을 조합하여 이득 평탄화와 광대역화를 실현하는 것이 검토되고 있다. 조합하는 방법으로는 Al co-doped EDF와 Al/P co-doped EDF, Al co-doped EDF와 다성분 EDF, 그리고 Al co-doped EDF와 불화물 EDF가 양호한 결과를 보이고 있다. 그림 10은 hybrid형 EDFA의 구성을 보여 주고 있다. 그림에 보이는 것처럼 hybrid형 EDFA는, 전단에는 0.98 $\mu\text{m}$  파장 여기용 저잡음 silica EDFA를 배치하여 저잡음으로 신호를 증폭한 후, 1.48 $\mu\text{m}$  파장 여

기용 불화물 EDFA를 사용하여 전체적으로 저잡음을 가진 평탄한 이득 특성을 구현하였다. 그 이유는 Al co-doped EDF와 불화물 EDF는 서로 이득 스펙트럼의 요철을 보상하여 주기 때문이다. 불화물 EDFA의 전단에 0.98 $\mu\text{m}$  파장 여기용 silica EDFA를 배치하면, 잡음 특성은 1.48 $\mu\text{m}$  파장 여기용 불화물 EDFA가 가지는 6dB의 잡음지수에서 5dB로 개선되며 이득편차도 28nm의 파장대역에서 1.4dB로 작아진다. silica EDFA의 경우 이득 편차가 4dB인 것을 고려할 때 불화물 EDFA가 이득 등가기 없이도 이득평탄대역을 넓히는데 유용하다는 것을 알 수 있다. 이 hybrid형 EDFA는 1Tbit/s 광전송 실험에 사용되었으며 그 우수한 증폭 특성은 시스템 실험으로 확인되었다[26].

#### 4.2.5 병렬증폭에 의한 대역확대

1.58 $\mu\text{m}$  파장 대역도 WDM 광전송 시스템의 전송용량 확대에 기여가 가능한 파장 대역이다. 따라서 EDFA의 1.58 $\mu\text{m}$ 대역의 WDM 신호 증폭에

그림 11. 병렬형 EDFA 구성도





관한 연구가 진행되고 있다[27].

EDFA와 같은 3준위계 광증폭기의 증폭대역은 활성 광섬유의 길이와 여기 광세기를 변화시켜 제어한다. 특히 광섬유의 길이를 길게 하면 증폭대역은 장파장 대역으로 이동한다. 그러므로 증폭 광섬유의 길이를 다르게 한 두종류의 EDFA를 사용하여 병렬 증폭을 하게 되면 1530~1600nm 사이의 파장대역을 광증폭하는 것이 가능하다. 그림 11은 1530~1600 nm 사이의 파장대역의 광을 증폭하기 위하여 구성한 병렬형 증폭기이다. 먼저 입력 신호는 1.55/1.58 $\mu$ m WDM coupler에 의해 1.55 $\mu$ m대의 신호와 1.58 $\mu$ m대의 신호로 분리된다. 분리된 신호는 각각 1.55 $\mu$ m대 및 1.58 $\mu$ m대의 증폭 유니트에 의하여 증폭되고 다시 WDM coupler에 의하여 합성되는 구조이다. 각 증폭 유니트에서는 0.98 $\mu$ m 여기용 불화물 EDFA에서 전치증폭을 한 후, 1.55 $\mu$ m대는 불화물 EDFA로, 1.58 $\mu$ m대는 Al codoped EDFA로 증폭한다. 1530~1560nm의 30nm 및 1576~1600nm의 24nm의 대역폭에서 평탄한 증폭특성이 얻어지며 이득 평탄대역에서의 신호 증폭이득은 30dB이고 잡음지수는 1530~1560nm의 파장대역에서 6dB이하, 1576~1600nm 파장대역에서 7dB이하의 값을 갖는다는 사실이 보고되었다[28].

#### 4.2.6 Tellurite EDFA

굴절률을 높이고 큰 유도방출 단면적을 실현하기 위하여 tellurite계 host glass에 의한 광대역 EDFA가 구현되었다[29]. tellurite glass는 TeO<sub>2</sub>를 주성분으로 하는 산화물 glass로서 이를 주성분으로 하고 Er이 첨가된 저손실 단일모드 광섬유를 제작하여 증폭 활성 매체로 사용하여 EDFA를 구성한다. Er의 농도는 4000ppm이고 길이가 0.9m인 광섬유를 1480 nm의 파장을 가진 광으로 300mW의 광세기로 여기하였을 경우, 입력신호가 -30dBm 일 때 1530~1610nm 사이의 80nm 파장대역에서 20dB이상의 이득이 얻어짐이 확인되었다. 0dBm

의 입력신호의 경우에는, 1535~1610nm 사이의 75nm 파장대역에서 평균 출력 18.5dBm, 이득편차 1.5dBm의 출력이 확인되었다. 불화물 광섬유와 석영계 광섬유에서는 광섬유 길이를 다르게 하여 병렬증폭하였지만, tellurite EDFA를 사용하는 경우에는 하나의 광섬유를 일괄 증폭하여 출력을 얻으므로 증폭기의 구성이 간단하다.

그외에 이득 포화영역에서 광섬유내에 나타나는 spatial hole burning의 원리를 이용하는 방법[30]과 광증폭기의 이득 증가화보다는 필터를 사용하여 입력신호의 세기를 조절함으로써 증폭기 각채널의 출력 신호의 세기를 증가화시키는 방법등 여러 방법이 제시되고 있다[31].

## V. 결론

지금까지 초고속 광전송 및 고밀도 파장다중 전송시 광신호의 열화를 가져오는 광섬유의 광학적 성질과 이를 보상하여 왜곡된 신호를 복원할 수 있는 여러 방안들에 대하여 알아 보았다. 광섬유에 의한 전송 손실은 어쭙침가 광섬유 증폭기의 개발로 보상할 수 있는 기반이 마련되었다. 국내에도 기존 통신망내의 2.5Gb/s 전송시스템에 전/후치 광증폭기를 적용함으로써 무중계 전송거리를 증가하여 기존의 전자식 3R 중계기를 대체해 가고 있다. 미래 정보화 사회에서 대량의 정보 교환을 위하여 채용할 10Gb/s이상의 대용량 광전송 방식은 2.5Gb/s 시간다중 신호를 여러 파장의 광신호로 다중화하여 전송하거나 10Gb/s 이상의 고속의 시간다중 광신호를 전송하는 방식을 예상할 수 있다. 통신망에 어떤 방식을 채용하느냐의 여부는 경제성 및 신뢰성과 통신용량의 수요 증대 여부에 따라 결정되겠지만 궁극적으로 국간의 수 Tb/s의 전송을 위해서는 10Gb/s 이상의 시간 다중 광신호를 수십개의 파장 채널에 다중화하여 전송하는 기술이 요구된다. 이 경우에 장거리 통신선로 및 네트

역상에서 필수적으로 수반되는 손실 보상을 위해서는 여러 파장에 할당된 광신호를 같은 이득으로 증폭할 수 있고 가변적인 작동조건에 능동적으로 대응하는 광대역의 WDM용 광증폭기가 필요하며 국내외적으로 연구가 활발히 이루어지고 있다. 시간 다중화 방식으로 10Gb/s 이상의 초고속 광신호 전송시에 광섬유의 색분산과 비선형성으로 인한 전송거리 제한효과도 동시에 극복하기 위해서는 본고에서 살펴본 바와 같이 그 동안 전 세계적으로 많은 연구가 이루어져 왔으므로 각각의 상황에 따라 가장 효과적이고 경제적으로 이를 보상할 수 있는 방법을 강구해야 한다. 이와 더불어 특히 통신망이 고속화 및 대용량화 함에 따라 구조적으로 복잡해지면서 궁극적으로는 광학적으로 transparent 하게 진화해 갈것으로 예측되므로 통신선로상의 선로와 통신 부품들을 효율적이면서 효과적으로 감시 유지할 수 있는 방법도 개발되어야 할 것이다.

#### 참고문헌

- [1] G. Keiser, "Optical Fiber Communication" McGraw Hill, New York, 1991.
- [2] J. Palais, "Fiber Optic Communication 2nd Ed," Prentice Hall, New Jersey, 1988.
- [3] N. S. Bergano, Optics & Photonics News, January, 8, 1993.
- [4] M. Born and E. Wolf, "Principles of Optics", Pergamon, 1980.
- [5] A. Yariv, "Optical Electronics", Holt, Rinehart and Winston, 1985.
- [6] Y. R. Shen, "The Principles of Nonlinear Optics", Wiley-Interscience, 1984.
- [7] G. P. Agrawal, "Nonlinear Fiber Optics", Academic Press, New York, 1989.
- [8] L. F. Mollenauer and K. Smith, Opt. Lett 13, 675, 1988.
- [9] P. S. Henry, J. Quantum Electron., QE-21, 1862, 1985.
- [10] Y. Sorel, J. F. Kerdiles, C. Kazmierski, M. Dlez, D. Mathoorasing and A. Ougazzaden, Electron. Lett 29, 973, 1993.
- [11] T. L. Koch, J. E. Bowers, Electron. Lett. 20, 1038, 1984.
- [12] B. Wedding, B. Franz, B. Junginger, B. Clesca and P. Bousselet, Electron. Lett. 29, 1498, 1993.
- [13] A. D. Ellis, S. J. Pycock, D. A. Cleland and C. H. F. Starrock, Electron. Lett. 28, 954, 1992.
- [14] X. Gu and L. C. Blank, Electron. Lett. 29, 2209, 1993.
- [15] S. Watanake, T. Naito and T. Chikama, IEEE Photon. Technol. Lett. 5, 92, 1993.
- [16] D. Gartho, W. S. Let, R. E. Epsworth, T. Bricheno and C. P. Chew, Proc. ECOC'94 PD 11-4, 1994.
- [17] H. Izadpanah, C. Lin, J. Gimlett, H. Johnson, W. I. Way and P. Kaiser, Technical Digest of OFC'92 PD 15, 1992.
- [18] D. A. Cleland, X. Y. Gu, J. D. Cox and A. D. Ellis, Electron. Lett. 28, 307, 1992.
- [19] M. Nishimura, Opt. Lett. 16, 143, 1991.
- [20] M. J. O'Mahony, J. Lightwave Technol. 6, 531, 1988.
- [21] E. Desurvire, "Erbium-doped Fiber Amplifiers", Wiley-Interscience, 1994.
- [22] Y. Ohishi, M. Yamada, T. Kanamori and S. Sudo, NTT Review 10, 45, 1998.
- [23] ITU-T G.scs Draft.
- [24] E. Delevaque, T. Georges, J. F. Bayon, M. Monerie, P. Niay, P. Bernage, Electron. Lett. 29, 1112, 1993.
- [25] S. Su, R. Olshansky, D. A. Smith and J. E. Baran, ECOC'92 WeD2.3, 1992.
- [26] T. Morioka, H. Takara, S. Kawanishi, O. Kamatani, K. Takiguchi, K. Uchiyama, M.

Szruwatari, H. Takahashi, M. Yamada, T. Kanamori and H. Ono, OFC' 96, PD21, 1996.

[27] H. Ono, M. Yamada, T. Kanamori, S. Sudo and Y. Ohishi, OECC' 97, 9D4-2, 1977.

[28] M. Yamada, H. Ono, T. Kanamori, S. Sudo and Y. Ohishi, Electron. Lett. 33, 710, 1997.

[29] A. Mori, Y. Ohishi, M. Yamada, H. Ono, Y. Nishida, K. Oikawa and S. Sudo, OFC' 97,

PD1, 1997.

[30] R. I. Laming, J. D. Minelli, L. Long and M. N. Zervas, OFC' 93, ThD3, 1993.

[31] A. R. Chraplyvy, J. A. Nagel and R. W. Tkach, IEEE Photonics Technol. Lett. 4,920, 1992.

### 이 달 석

- '93년 : 명지대학교(학사)
- '95년 : 명지대학교(석사)
- '95년 ~ 현재 : 대우통신 종합연구소 광통신연구실
- 관심분야 : EDFA, WDM, 광송/수신기, 광통신 시스템 등.

### 최 봉 수

- '94년 명지대 공과대 전자공학과 학사
- '96년 명지대 대학원 공학석사
- '96년 대우통신(주) 광통신연구소 연구원
- 관심분야 : 광성유증폭기, 광전송, 광섬유레이저 등

### 이 규 행

- '84년 연세대 이과대 물리학과 학사
- '86년 연세대 대학원 이학석사
- '94년 연세대 대학원 이학박사 (전공: 광학)
- '92년 한국과학기술연구원 응용물리 연구실 위촉 연구원
- '95년 한국과학기술연구원 응용물리연구실 Post Doc.
- '96년 연세대학교 SRC 연구원
- '97년 대우통신(주) 광통신연구소 선임연구원
- 관심분야 : 반도체레이저, 광성유증폭기, 광섬유센서, 광응용소자 등

### 이 관 우

- 1975년 ~ 1982년 : 인하대학교(학사)
- 1982년 ~ 현재 : 대우통신 종합연구소 광통신연구실장
- 관심분야 : SDH, WDM, 광통신 시스템  
: FLC 광가입자 전송시스템  
: XDSL 가입자 전송시스템.