

技 術 解 說

光 纖 維 와 그 특 성

崔 相 三*

◎ 차 례 ◎

- I. 서 론
- II. 광섬유의 구조 및 특성
 - 1. 구조와 특성
 - 2. Numerical Aperture(NA)
 - 3. 편광 현상(Polarization effect)
 - 4. 신호의 감쇄
 - 5. 투과 대역폭(Transmission Bandwidth)
- III. 결 론

I. 서 론

광섬유를 이용한 Light-wave Communication System의 실용화는 이미 실험적 단계를 지나서 표준화된 상품으로서 국제시장에 출현하기 시작하였다. 광자를 전달하는 광섬유 cable의 개발로 전자를 전달하는 동선을 대체하게 되었고 나아가서는 광섬유 응용의 이점을 최대한 활용하려는 연구가 진행하게 되었다. 급속히 진전되는 개발현황으로 연구결과가 곧 상품화 단계를 거쳐서 이용자가 활용할 수 있게 되었고 이것은 광섬유 응용의 이점이 너무나 명확하고 또한 많은 연구투자와 인력이 투입되고 있다는 증거가 된다. 특히 주목할 만한 점은 연구과정에서 많은 사람들이 우려하였던 실용화단계에서의 문제점들이 미국, 일본, 유럽 제국 및 국내의 실험결과로부터 해결되고 있다는 것이다.

광섬유의 통신 이용에서 가장 유리한 이점은 광섬유가 투과율이 높고 또한 광범위한 대역폭을 갖고 있다는 점이다. 설치된 광섬유 cable의 감쇄율은 0.8~0.9 μm 파장에서 약 4dB/km이며, 장파장 대역인 1.3μm 근처에서는 0.5dB/km까지 실험에 성공하였다. 이러한 특성의 광섬유 cable로서는 40Mbit/s의 bit rate에서 증계기 거리가 10km까지 확장될 수 있다는 것이다. single mode fiber에서는 1.3μm 근처에서 약 100

Gbit.km/s까지 가능하다. 이러한 경우에는 통신 system 설치에 증계기 경비가 동선의 경우보다 매우 절약되며 wideband의 경우에는 더욱 효과적이 될 수 있다. 미국의 Bell system은 Atlanta Ga.에서 성공적으로 설치한 45 Mbit/s system의 경험을 바탕으로 Boston과 Washington D.C. 사이의 약 600mile 거리를 광섬유 통신 system을 설치하기 시작하였고 또한 1980년 후반에는 대서양 횡단 cable system을 구상 중에 있는 것으로 알려졌다.

이러한 광섬유 통신 system에서 중요한 요소는 빛을 전달하는 광섬유와 빛을 발산하는 laser diode 및 light emitting diode, 그리고 검출기이다.

광섬유의 제조방법은 대체로 네 가지를 들어 설명할 수 있다. 미국의 Corning 회사가 처음으로 사용한 Outside Vapor-phase Oxidation(OVPO)의 방법이 있고 Bell Lab.에서 개발한 Modified Chemical Vapor Deposition(MCVD) 방법은 매우 좋은 투과성을 가진 광섬유를 생산할 수 있는 방법으로서 세계적으로 많은 곳에서 사용되고 있다. 또한 일본의 Nippon Telegraph and Telephone Co.(NTT)에서는 근간에 Vapor-phase Axial Deposition방법으로 높은 투과성의 광섬유를 생산할 수 있다고 발표했다. 이상의 방법에서는 광섬유 주요 재질인 SiO₂에 약간의 Ge, P 또는 B를 dopants로 사용하여 굴절율을 조절하였다. 이 외의 방법으로는 영국의 British Post Office에서 개발한 것으로 Multi Component Glass로서 이것은 낮은 온도에서 취급할 수 있는 재질로서 curcible에서 drawing할 수 있는 특징이 있으며 연속적으로 생산할 수 있으나 광섬유 초기 재질인 유리의 저렴가 공급이 문제시 된다. 현재로서는 MCVD, OVPO, VAD 방법이 가장 높은 투과율과 wide bandwidth의 광섬유를 생산하는데 사용되고 있다.

광섬유 cable의 설계는 동선과는 달리 유리의 강도 및 광학적 특성 등을 감안하여 수행되어야 한다. 그 이

* 韓國科學技術院 應用科學 研究室長 · 理博

유는 광섬유는 급격히 구부러지게 되면 광섬유 내에서 전달되는 빛 신호는 크게 감쇄하기 때문이다. 즉 microbending loss를 일으키게 된다. 그러나 많은 cable 회사에서 광섬유에 적합한 설계 및 제조에 의하여 이러한 문제점들을 해결하고 있다.

광통신 분야에서 광원은 매우 어렵고 흥미있는 분야이다. 반도체 레이저와 LED는 현재로서는 가장 유리한 위치에 있다. Laser의 특성이 광섬유 통신에 적합한 이유는 광섬유에 빛을 삽입시키기 쉽고 파장폭이 좁아서 intrinsic material dispersion의 영향을 줄일 수 있다. 현재 상용으로 쓰이고 있는 것은 0.82~0.9 μm 파장의 laser이다. 장거리 통신에는 출력이 큰 laser가 유리하다. LED는 data link등 단거리에서 벌써 많이 사용되고 있으며 현재 장파장 영역에서는 LED의 이용이 조만간 실용화 될 것으로 간주된다. 대개 단거리에서는 LED를 많이 사용하고 있는데 이것은 laser가 system에서 발생하는 온도에 의하여 그 특성이 변화되기 때문이다. Laser의 emission threshold는 온도에 매우 민감하므로 laser를 이용할 때는 driving current를 자동적으로 조절하여 광출력을 안정화하여야 한다. Laser를 높은 온도에서 계속 사용하게 되면 수명이 단축되므로 laser와 LED는 서로의 장단점을 살려서 각각 특성에 맞는 곳에 이용되어야 할 것이다. 계속되는 이 laser의 연구분야는 laser의 수명과 또한 광출력을 single mode 형태로 발광하도록 하는 점이다.

광통신에 있어서 광검출기는 광원과 한 쌍을 이루는 주축이 된다. 검출소재의 첫 세대는 잘 알려진 silicon 재료로서 0.8~0.9 μm 파장에서 사용되며 avalanche gain을 이용하므로 검출효율이 매우 크다. 파장 1.3~1.5 μm 영역에서는 p-i-n detector로서 InGaAs와 InGaAsP등이 개발되고 있다. 이 system에서 avalanche gain을 이용할려면 noise문제가 심각하여 아직 어려운 점이 있다. 광섬유의 주요 재료가 SiO₂로서 1.3 μm 의 장파장에서는 최소의 chromatic dispersion 특성이 있으므로 이 장점을 이용하기 위하여 InGaAs와 InGaAsP등의 새로운 재료로서 laser, LED와 검출기를 제조하여 상품화하는 것이 연구개발의 커다란 도전으로 수행되고 있다.

광섬유의 특성 중에서 전자장의 유도장애가 없는 것이 또한 중요한 이용가치를 갖게 한다. computer의 연결에서 잡음이 없고 굵기가 가늘며, 가볍고 또한 넓은 대역폭을 갖고 있기 때문에 LED와 함께 광섬유 system을 사용하는 것이 이상적이다.

현재 일본에서 광섬유 system을 전력 system의 조

절, 감독, 안전 등의 회로에 이용하는 것은 거의 상품화되고 있다. 가장 큰 이유는 유도장애가 없고 절연체에 기인한 잡음 등을 완전히 제거할 수 있다는 데에 있다. 한편 일반 가정용 정보전달에서의 광섬유 이용은 실험단계에서 개발되고 있다. 이 응용분야에서는 broad band를 이용할 수 있는 것으로 경제적인 면에서 커다란 혁신이 필요하다. 물론 광섬유 이용이 점점 폭 넓게 현실화된다면 broad band의 이용은 확실시 될 것이고 이로서 인간의 생활형태의 변화를 초래하게 될 것이다. 이 이용은 물론 일반 사용자의 취미에 따라 어떤 형태로 정보전달 방법이 개조되었지만 대체적으로 새로운 정보전달 service를 부여하는 기술분야에서 중요한 역할을 하게 될 것은 틀림 없을 것이다.

한편 군수장비에서도 광섬유의 이용도는 매우 유리하게 평가되고 있다. 이것은 통신분야에서는 광섬유가 동선 cable에 비하여 무게와 비용을 절감할 수 있고, 또한 군장비가 다루어져야 하는 환경에서 잡음을 해소할 수 있기 때문이다. 이외의 응용으로는 hydrophone, rotation sensor, acceleration sensor, high voltage current sensor 등으로 미국의 군용장비 연구소에서 집중적으로 개발하고 있다.

이와같이 광신호를 이용하는 기술은 지난 100여 년간의 전자신호 이용기술의 후계자로 등장하였고 이에 대한 앞으로의 연구 개발 가치는 막대하다. single mode wave를 이용한 광유도의 집적회로(integrated optics) 기술이 벌써 가시광선 영역에서 발표되었고 single mode 회로의 실용화가 곧 이루어 질 것으로 기대된다. 복잡한 정보망과 고차원의 computer 이용에 따른 전자와 빛의 회로상의 어려움을 극복하기 위하여 동일 기관 위에 전자 및 광자 회로를 동시에 설계 제작한다면 광전자 효과를 동시에 이용할 수 있는 광전공학의 새로운 혁신이 되리라 기대된다. 결론적으로 새로운 대형 memory 집적회로가 광섬유 system과 보조를 같이하여 개발되므로 인류사회에서는 또 다른 커다란 기술 혁신이 이루어지리라 믿어진다⁽¹⁾

II. 광섬유의 구조 및 특성

1910년 경부터 벌써 유전체의 전파유도에 대하여 연구가 시작되었으나 실제로 이용되기 시작된 것은 1940년 대의 microwave와 더불어 구체화 되고 또 1960년 대에 강력한 광원인 laser가 개발되면서 실용화에 눈을 뜨기 시작하였다. 초기의 연구 단계에서 low order guided mode의 장거리 신호전달을 위한 감쇄율이나 pulse distortion등 정보 전달에 필요한 특성 분야가

무시되어 왔다가 지난 10여 년 동안 급격히 발전되어 온 결과 multimode fiber의 실용화는 벌써 표준화에 이르게 된 것이다. 여기에서 소개되는 것은 중요한 광섬유의 구조와 parameter 및 이에 따른 특성에 관한 것이다.

논의될 문제들은 multimode 및 single mode fiber wave guide로서 기본적인 구조, 물리적 parameter, 재료의 특성, 감쇄요인, 감쇄 및 bandwidth spectra, 굴절률분포 등 투과 특성의 극대화가 쫓점이 되겠다. (2)(3)(4)

1. 구조와 특성

광섬유의 중요한 특성은 단면의 굴절률 및 dimension에 크게 영향을 받는다. Multimode광섬유의 규격은 상품화 단계에서 표준화되어 가고 있고, single mode 광섬유는 사용하는 광원의 파장에 따라 광섬유 core의 크기가 달라진다. 그림 1은 구조와 dimension등을 보여준다.

single mode광섬유의 경우는 step index 광섬유 core 내에 진행하는 광 전파 상태가 single mode로서 다음의 조건을 만족하면 single mode만 진행하게 된다.

즉, normalized frequency V 값이 2.405보다 작을 때 single mode 광섬유가 된다.

$$V = ka(n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \tag{1}$$

여기서 $2a$ 는 core의 직경이고 $k=2\pi/\lambda$ 에서 λ 는 진공에서의 파장을 말한다. 또 n_1 과 n_2 는 각각 core와

cladding의 굴절률이다. 예로서 core 직경이 $6\mu\text{m}$ 이고 $n_1 - n_2 = 0.001$ 이 되는 광섬유 core 내에서 $0.85\mu\text{m}$ 파장보다 긴 파장에서는 높은 order의 mode는 전파될 수 없고 mono mode만 진행하게 된다. 식 (1)의 경우는 step index인 경우이고 만약 굴절률 분포가 step이 아닐 경우는 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$V_{\text{eff}}^2 = 2k^2 \int_0^a [n^2(r) - n_2^2] r dr \tag{2}$$

여기서 $n(r)$ 은 반경에 따른 굴절률 변화를 말한다. 식 (2)에서 $V_{\text{eff}} = 2.405$ 를 적용하면 cut off frequency를 구할 수 있다. 예를 들어 power-law profile의 경우 굴절률 분포는 다음과 같이 표현할 수 있다.

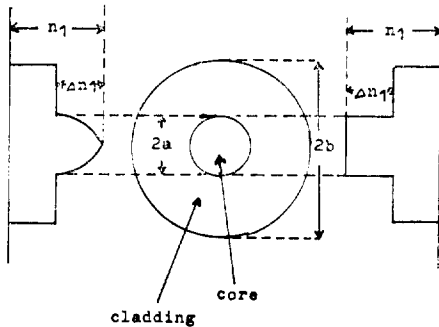
$$n(r) = n_1 [1 - 2\Delta (r/a)^\alpha]^{1/2} \tag{3}$$

여기서 $\Delta = (n_1^2 - n_2^2) / 2n_1^2 \approx (n_1 - n_2) / n_1$ 이고 α 는 power law coeff.이다. 실질적인 single mode 광섬유에서는 cut off frequency가 이론적인 계산치보다 약간 짧을 수가 있다. 이것은 다음 order의 mode가 waveguide의 불완전에 따른 손실이, 보다 낮은 order mode의 손실보다 크기 때문이다. (5)(6)(7)

2. Numerical Aperture(NA)

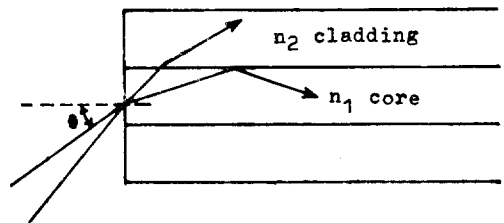
대용량 통신을 전달하기 위하여 신호가 광섬유 내에서 진행하는 동안 mode에 의한 dispersion을 감소시키기 위해서는 광섬유 단면의 굴절률 분포를 그림 1에서와 같이 중심에서는 높고 중심에서 멀어 질수록 점차적으로 굴절률이 감소되어야 한다. 이러한 graded index 광섬유의 중요한 특성은 core의 직경($2a$)과 power law 계수(α) 그리고 numerical aperture(NA)에 의하여 결정된다. NA는 광섬유 core내에서 빛이 유도되어 갈 수 있는 가장 큰 입사각의 sine을 말한다. 다시 말해서 그 광섬유가 얼마나 많은 빛의 양을 core내로 입사시킬 수 있는가를 말한다. NA는 core와 cladding의 굴절률 합수로써 다음과 같이 표현된다(그림 2 참조).

Graded-index fiber Step-index fiber



Multi mode fiber	Single mode fiber
Core = $50\mu\text{m}$	Core = $6\mu\text{m}$
Cladding = $125\mu\text{m}$	Cladding = $125\mu\text{m}$
$\Delta n_1 = 0.02$	$\Delta n_1 = 0.001$
NA = 0.2	$\lambda_c = 0.85$

그림 1. 광섬유의 구조



2. Numerical Aperture

$$NA = \sin(\theta_m) = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (4)$$

n_1 : core 굴절을 n_2 : cladding 굴절을 굴절을 본포가 power law profile(α)로서 표현될 때 (식(3)), 동일한 단면적의 광섬유 core와 광원 LED 발광소자의 광접속 효율은

$$\eta = \frac{\text{광원에서 광섬유로 입사되는 광량}}{\text{광원전체의 발광량}} = \frac{(NA)^2}{(1+2/\alpha)} \quad (5)$$

로서 표현된다

여기서 광섬유 core의 단면적이 증가하게 되면 접속 효율, η 도 물론 증가하게 된다.

이 광섬유 core 내에서 유도되는 mode의 수 N 은 normalized frequency V number와 관계되며 다음과 같다.

$$N = V^2/2(1+2/\alpha) \quad (6)$$

위의 두 관계를 연결하면

$$\eta = (NA_{eff})^2 \quad (5a)$$

$$N = V_{eff}^2/2 \quad (6a)$$

가 되고 여기서 $NA_{eff} = V_{eff}/ka$, $V_{eff}^2 = 2k^2 \int_0^a (n^2(r) - n_2^2) r dr$ 이다.

상표화된 대부분의 graded index 광섬유의 NA 는 약 0.2이고 광섬유 단면에 입사되는 각도는 $\theta = 11^\circ$ 가 된다. NA 가 큰 광섬유일수록 대역폭은 감소된다. core와 cladding의 굴절을 차가 크면 NA 가 증가되어 빛을 많이 삽입할 수 있지만 빛의 속도차이가 커지므로 이로 인해서 dispersion이 증가하게 된다.

3. 편광현상(polarization effect)

일반적인 광통신에서 광의 편광현상은 중요하지 않다. 이것은 사용되는 photodiode는 빛의 편광이나 위상차를 검출할 수 없고 오직 빛의 세기만을 검출할 수 있기 때문이다. 그러나 single mode 광섬유일 경우는 검출하기 전에 광의 신호처리를 위하여 편광분석기를 이용하면 빛의 강도 이외에 또 하나의 차원의 정보를 전달할 수 있는 이점이 있다. 그러나 이 문제는 아직 많은 연구가 뒤따라야 한다. 광섬유를 진행하는 편광은 진행하는 동안 편광특성을 그대로 유지하기가 매우 어렵다. 이것은 편광특성이 광섬유의 구부림, 비틀림, 직경변화, 온도 등에 매우 예민하게 변화하기 때문이다. (8)(9)(10)

4. 신호의 감쇄

광섬유 특성에서 가장 중요한 것은 진행신호의 감쇄

특성이다. 감쇄량을 표시할 때는 우선 사용하고자 하는 광원의 파장을 명시하고 그 파장에서 decibel/kilometer로 표시한다. 즉,

$$dB = 10 \log \frac{P_{in}}{P_{out}} \quad (7)$$

여기서 P_{in} , P_{out} 은 각각 빛의 입, 출력을 말한다. 그러나 빛의 강도는 가끔 $1mW$ 를 표준으로 한 dBm으로 나타내기도 한다. 만약 $100\mu W$ ($-10dBm$ 에 해당)가 입사하여 $1km$ 진행한 후 $10\mu W$ 가 된다면 $-20dBm$ 로 표시된다.

즉,

$$dBm = 10 \log \frac{P(w)}{1mW} \quad (8)$$

광신호가 광섬유를 진행하는 동안 일어나는 감쇄의 요인은 다음과 같이 나눌 수 있다.

- 가) 재질에 의한 흡수
- 나) 재질에 의한 산란
- 다) 구조 결함에 의한 감쇄
- 라) Cladding과 Jacketing의 효과
- 마) 접속에 의한 감쇄
- 바) Leaky modes

광신호 감쇄량에 큰 요인이 되는 빛의 흡수는 주로 Hydroxyl(OH), transition metal ions, U.V. 영역에서의 electronic bands의 영향, glass 재질의 vibrational bands의 영향, IR bands의 영향, 등으로 생각할 수 있다. 산란에 의한 감쇄현상은, 주로 glass lattice에 의한 Rayleigh 산란으로 그 크기는 파장(λ)의 4승에 역비례한다. 현재의 광섬유제조기술로서 불순물에 의한 흡수 등을 충분히 제거할 수 있게 되었고 따라서 감쇄율은 단지 산란에 의한 intrinsic 감쇄율에 의해 결정된다. 이 결과로 통신에 이용할 수 있는 투과 영역은 $0.7 \sim 1.6\mu m$ 까지 확장되었다. 한편 광섬유 유리 재질 속의 OH 함유량은 매우 중요하다.

1ppm의 함유량은 $30 \sim 40dB/km$ 의 흡수율 $1.4\mu m$ 에서 가져온다. 현재 기술로서(MCVD방법) 가장 우수한 광섬유는 $1.3\mu m$ 파장에서 $0.5dB/km$ 의 감쇄율을 보여준다. 일반적인 광섬유 loss spectrum은 그림 3과 같다.

다음으로 광섬유 구조의 결함으로는 다음과 같이 구분할 수 있다.

- 가) core와 cladding의 경계면의 굴곡과 core 직경의 변화
 - 나) coating 및 cabling 작업 중에 일어나는 microbends
 - 다) cable 설치 중에 굴곡에 의한 결함
- 을 들 수 있으며 cable 설계 및 제조를 최적화 해서

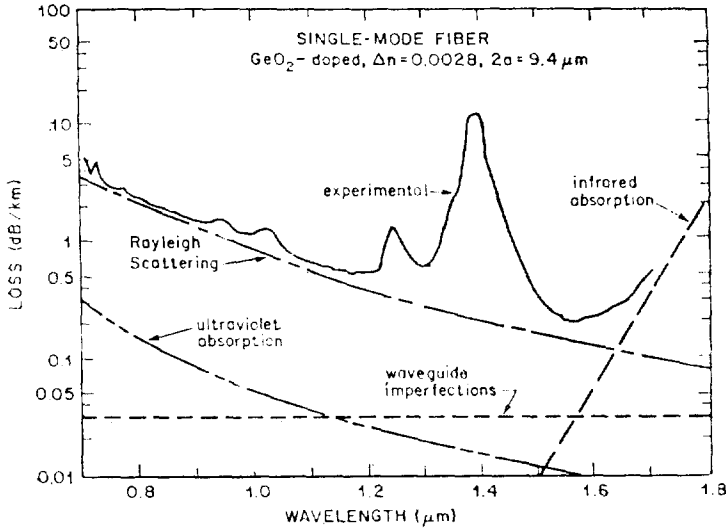


그림 3. 광섬유의 Loss Spectrum

광섬유 투과율에 미치는 영향을 극히 최소로 줄일 수 있다. 현재의 광섬유 preform제조 및 drawing과정은 정밀한 조절 기술로서 구조오차에서 일어나는 현상을 충분히 줄일 수 있으며 그림 3에서 보여 주듯이 0.05 dB/km 이하의 손실만 추가할 뿐이다. Microbending loss는 최적한 cable설계에 의하여 약 0.2dB/km이내로 감쇄량을 줄이고 있다.

접속에 의한 감쇄는 접속과정에서의 alignment 문제와 연결되는 광섬유 간의 중심축과의 불일치 및 intrinsic loss로서 광섬유간의 굴절율 차이에서 기인된다. 현재로서 multimode 광섬유 접속(splice) loss는 평균 0.2dB 정도로서 field에서 작업이 수행되고 있다. 실험실에서는 fusion 방법으로 평균 0.1dB까지 접속에 성공을 거두고 있다.

Leaky mode의 대부분은 매우 큰 감쇄율을 가지고 있으므로 광섬유에 진입한 후 수 meter에서 감쇄되어 버린다. 그러나 그 중 일부의 mode는 kilometer거리를 진행하기도 한다. Leaky mode는 주로 LED에서 발광되며, 광섬유 감쇄량 측정에서 짧은 길이의 측정 시에는 포함이 되나 1km이상의 거리를 진행할 수 없으므로 장거리 통신에 필요로 되는 빛 강도에는 기여를 하지 못한다. (12)(13)(14)

5. 투과 대역폭(Transmission Bandwidth)

광섬유의 대역폭은 구조 및 재료의 물리적 성질에 의하여 결정되며 특히 chromatic 및 intermodal dis-

ersion으로 구분할 수 있다.

chromatic dispersion은 material과 wave guide dispersion이 있으며 material dispersion 현상은 광신호의 파장에 따른 성분사이의 진행속도 차이에 의하여 생긴다. 즉,

$$D_m(\lambda) = \frac{\lambda}{c} \frac{d^2n}{d\lambda^2}$$

: material dispersion (9)

n : 굴절율, c : 진공중의 빛 속도.

waveguide dispersion은 광섬유 구조의 결함에 의하여 생기는 것이다. Intermodal dispersion은 mode 사이의 group delay의 차이에 의한 효과로서 주로 multimode 광섬유 경우에는 굴절율 분포에 의

하여 크게 영향을 입는다. 그 외에 대역폭에 영향을 주는 현상들은 mode에 따라 다른 감쇄율, 편광 그리고 mode coupling 효과 등을 들 수 있다.

실용상의 광섬유 대역폭은 주로 MHz·km 또는 ns/km로서 나타내며 표현 방법은 예를 들면 500MHz·km의 광섬유는 1km 진행에서 500MHz의 신호가 3dB의 감쇄율 갖는다는 뜻이다. 그리고 2ns/km-3dB dispersion의 표현은 0.35를 2ns로 나누면 MHz·km로 나타낼 수 있다. 즉 175MHz·km의 -3dB 대역폭이 된다. ns·km의 뜻은 signal rise time이 km 진행하는 동안 증가하는 양을 표시하는 방법이다.

Multimode광섬유의 대역은 물론 광원으로 LED를 이용할 경우는 material dispersion도 고려되어야 하지만 intermodal dispersion에 의한 영향이 크다. 굴절율 분포에 따라서 광섬유 대역폭이 변하는 graded index광섬유의 경우를 보면 power-law variation의 계수들이 최적치로 적용되어야만 최대의 대역폭을 얻을 수 있다. 그러나 사용하는 광원(LED 또는 laser)에 따라 계수의 최적치는 변한다. 이 이유는 광섬유의 core 및 cladding재료의 굴절율이 파장에 따라 다르기 때문에 그 최적치도 달라지기 때문이다.

일반적으로 Ge, P doped SiO₂의 power-law variation α 값이 약 2이다.

이 최적치가 대역폭에 주는 영향이 파장에 따라 매우 예민하기 때문에 대용량의 광섬유를 제조하기 위하여서는 공정상에서 재질의 굴절율을 결정하는 dopants

의 투입과정을 정밀하게 조절하여야 한다. 근래에 제조되는 광섬유의 대역폭은 1GHz·km 이상의 우수한 특성을 가지고 있다. ⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾

III. 결 론

이제 광섬유는 연구의 단계에서 벗어나 실질적인 정보 전달 매개체로서 통신분야의 중요한 위치를 차지하게 되었다. 그 동안의 광섬유 특성 및 구조연구의 결과들이 실제로 생산 공정 과정에 투입되어 우수하고 신뢰성 있는 광섬유 cable들이 생산되고 있으며 나아가서는 이러한 cable들이 실제로 설치되어 사용되고 있다는 것은 매우 고무적인 현상이다. 뿐만 아니라 이러한 의욕적인 광섬유의 이용에 관한 연구를 그 필요성에 따라 확대 추진하여 간다면 무한한 빛의 특성을 이용하는 새로운 기술 혁신을 이룩할 수 있을 것이다.

參 考 文 獻

1. R.D. Maurer; "Glass Fiber for Optical Communication", Proc. IEEE, vol. 61, p.452(1973)
2. D. Gloge; "Propagation Effects in Optical Fibers", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-23, p.106(1975)
3. R. Olshansky; "Propagation in Glass Optical Waveguides", Rev. Mod. Phys., vol. 51, 341 (1979)
4. J.E. Midwinter; Optical Fibers for Transmission, New York, Wiley, 1979.
5. K. Okamoto and T. Okoshi; "Analysis of Wave Propagation in Optical Fibers having core with α -power Refractive-index Distribution and Uniform Cladding", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-24, 416 (1976)
6. D. Marcuse; "Gaussian Approximation of the Fundamental Modes of Graded-index Fibers", J. Opt. Soc. Am., vol. 68, 103 (1978)
7. W.A. Gambling and H. Matsumura; "Propagation in Radially-homogeneous Single-mode Fiber", Opt. Quantum Electron., vol. 10, 31 (1978)
8. R.A. Steinberg and T.G. Giallorenzi; "Performance Limitations Imposed on Optical Wave Guide Switches and Modulators by Polarization", Appl. Opt. vol. 15, 2440(1976)
9. R.H. Stolen, V. Ramaswamy, P. Kaiser and W. Pleibel; "Linear Polarization in Birefringent Single-mode Fibers", Appl. Phys. Lett., vol. 33, 699 (1978)
10. M.J. Adams, D.N. Payne, and C.M. Regdale; "Birefringence in Optical Fibers with Elliptical cross-section", Electron. Lett., vol. 15, 298 (1979)
11. T. Miya, Y. Terunuma, T. Hosaka and T. Miya shita; "Ultimate Low-loss Single Mode Fiber at 1.55 μ m", Electron. Lett., vol. 15, 106 (1979)
12. D. Gloge; "Bending Loss in Multimode Fibers with Graded and Ungraded core Index". Appl. Opt., vol. 11, 2506(1972)
13. D. Marcuse; "Curvature Loss Formula for Optical Fibers", J. Opt. Soc. Amer., vol. 66, 216 (1976)
14. J. Sakai and T. Kimura; "Splice Loss Evaluation for Optical Fibers with Arbitrary Index Profile", Appl. Opt., vol. 17, 2848(1978)
15. D.N. Payne and W.A. Gambling; "Zero Material Dispersion in Optical Fibers.", Electron Lett. vol. 11, 176(1975)
16. L.G. Cohen and C. Lin; "Pulse Delay Measurements in the Zero Material Dispersion Wavelength Region for Optical Fibers", Appl. Opt. vol. 12, 3136(1977)
17. S. Kawakami and S. Nishida; "Anomalous Dispersion of New Doubly Clad Optical Fibers", Electron Lett., vol. 10, 38(1974)