

단일모드 광섬유의 Spot Size 측정에 관한 연구

84323

박 호 철 박 한 구
연세대학교 전자공학과

A Study of SPOT - Size Measurement in Single -
mode Optical fibre

Ho Cheol PARK Han Kyu PARK
Dept. of Electronics, Yonsei Univ.

ABSTRACT

The mode spot size is a fundamental parameter of a single mode optical fibre which determines especially the splices and the microbending loss. The spot-size measurement is recognised to be a useful mean to define the cut-off wavelength of single-mode fibres, ESI parameters and to predict the modal dispersion. To determine the ESI parameters, this paper is based on the use of a Ronchi ruling.

1. 서 론

일반적으로 광섬유를 제조하는데 필요한 측정 항목으로 광파이버의 기하학적 구조, 굴절률 분포 (refractive index distribution) 등의 광섬유 파라미터를 들 수 있는데 본 논문은 단일 모드 광섬유 (single mode optical fibre) 에서 기본적인 파라미터 중의 하나인 spot size 를 측정하고 이에 의해 ESI (Equivalent Step Index) 파라미터를 구해 splicing loss 와 microbending loss 를 조정하고 모드의 분산성질 (modal dispersion)을 분석한다. 한편 1978년 Dickson 1) 은 비교적 정밀한 Ronchi ruling 을 이용해 Gaussian beam diameter 를 측정하는 것을 발표했고 1980년 strekert 2) 는 단일 모드 광섬유의 splicing loss 이론을 근거로 한 spot size 를 결정하는 방법을 발표했다. 그 후 여러 방법들이 연구되오다 1983년 J. P. POCHOLLE 과 J. AUGE 3) 가 Ronchi ruling 을 이용해 Spot Size 를 측정함으로써 ESI 파라미터

계산했다.
본 연구에서는 spot size 측정 및 이에 수반되는 여러 손실 파라미터들과의 관계를 조사하였다.

2. 이론 및 실험 방법

모드의 spot size 를 측정하는 데 지금까지 발표된 바로는 Halogen lamp 나 LED (Light Emitting Diode) 즉 incoherent source 를 light source 로 하여 비교적 광대역 파장 (0.6 - 1.5 μm)대에서 측정을 했는데 본 실험에서는 헬륨-네온 레이저를 광원으로 하여 0.6 μm 파장대 즉 가시 영역에서 조사를 했다.

대략 시스템 구성은 다음과 같다.

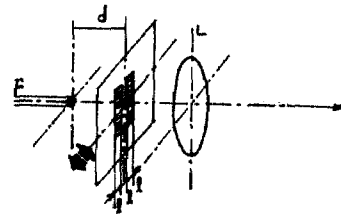
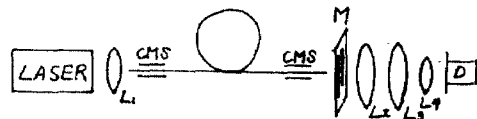


그림 1. 측정 시스템
Fig. 1. Measurement system

그림 1에서 파이버의 출사단으로 부러 나온 빔이 마스크의 opaque bar 증양을 통과할 때 power density를 P_m , transparent bar 증양을 통과 할 때의 power density 를 P_M 이라면 P_m 은 최소, P_M 은 최대를 나타내게 된다. 한편 파이버 코어가 완전한 원형이라는 가정하에 거리 d 지점에서 $Wd/\lambda < 1.35$ 일때 P_m , P_M 비는 다음과 같다.³⁾

$$\frac{P_m}{P_M} = \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{31}{Wd\sqrt{2}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{1}{Wd\sqrt{2}}\right)}{1 + \operatorname{erf}\left(\frac{1}{Wd\sqrt{2}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{31}{Wd\sqrt{2}}\right)} \quad (1)$$

여기서 Wd 는 파이버 출사단으로 부러 만큼 떨어진 거리에서의 far field 빔 반경을 나타내며 마스크의 위치를 파이버 출력안과 출력 power 를 검사하는 optical system 사이에 적당히 놓음으로써 결정된다.

또한 Gaussian field approximation에서 spot size W_0 는

$$W_0 = d \cdot \lambda / \pi \cdot Wd \quad (2)$$

그리고 spot size W_0 를 light wavelength 의 함수로 다음과 같이 나타내는데⁴⁾

$$W = A_e \left[0.65 + 0.43435 \left(\frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^{3/2} + 0.01488 \left(\frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^6 \right] \quad (3)$$

여기서 A_e 는 ESI 파이버의 코어 반경이고 λ_c 는 LP₁₁ 모드의 차단 파장 (cut-off wavelength) 이론치를 나타낸다.

한편 ESI 파라미터의 하나인 굴절률 차 Δn_e 는

$$\Delta n_e \sim 5 \times 10^{-2} \left(\frac{\lambda_c}{A_e} \right)^2 \quad (4)$$

이고 W_0 와 정규화된 전파 상수 (normalised propagation constant) B 및 $d(BV)/dV$ 의 관계는 다음과 같다.^{5) 8)}

$$B = -\frac{z}{V^2} \left(\frac{a}{W_0} \right)^2 + 1 - e^{-z(a/W_0)^2} - \frac{4a^2}{W_0^2} \int_0^z \frac{\Delta(x)}{\Delta_0} e^{-zx^2(a/W_0)^2} dx$$

$$\frac{d(BV)}{dV} = \frac{z}{V^2} \left(\frac{a}{W_0} \right)^2 + 1 - e^{-z(a/W_0)^2} - \frac{4a^2}{W_0^2} \int_0^z \frac{\Delta(x)}{\Delta_0} e^{-zx^2(a/W_0)^2} dx$$

그리고 $\frac{W_0}{a} = \frac{W_0}{A_e} \times \frac{A_e}{a}$ 로 부러 $\frac{W_0}{a} = F(V)$ 즉 $\frac{W_0}{a}$ 가 정규화 주파수 (normalised frequency)

V 값에 따라 정해지므로

$$F'(V) = \frac{dF}{dV} = \frac{A_e}{a} \frac{V_0}{V} \frac{d(W_0/A_e)}{dV_0}$$

$d(W_0/A_e)/dV$ 는 (3)식으로 부러 구할 수 있다.

결국

$$\frac{Vd^2(BV)}{dV^2} = -4(VF'+F) - \frac{4VF'}{F^3} e^{-a/F^2} - \frac{8F'V}{F^3} \int_0^z x \frac{\Delta(x)}{\Delta_0} \left(\frac{zx^2}{F^2} - 1 \right) e^{-zx^2/F^2} dx$$

Spot-size 를 정의하기 위해서는 HE₁₁ 모드가 다음과 같은 Gaussian field 에 의해 최대 입사 효율을 갖도록 해야 한다.⁴⁾⁵⁾⁸⁾

$$\psi(r) = \frac{1}{W_0} \left(\frac{z}{\pi} \right)^{1/2} \exp\left[-\left(\frac{r^2}{W_0^2}\right)\right] \quad (5)$$

단일 모드 광섬유로 입사시키는 Gaussian 빔의 launching 효율은 ⁶⁾

$$I_w^2 = \frac{\left[\int_0^w \psi(r) e^{-r^2/W^2} r dr \right]^2}{\int_0^w \psi^2(r) r dr \int_0^w e^{-2r^2/W^2} r dr} \quad (6)$$

여기서 w 는 Gaussian 빔의 1/e field width 이다. 한편, 기본 모드의 spot-size 는 식 (6) 으로 부러 I_w^2 을 최대화 하는 w 로 정해진다.

Ψ 를 ψ 의 Hankel Transform 으로 정의하면⁷⁾

$$\Psi(p) = \mathcal{H}(\psi) \equiv \int_0^{\infty} \psi(r) J_0(pr) r dr \quad (7)$$

따라서 far field $\Psi(\theta)$ 와 near field $\psi(r)$ 의 관계식은 다음과 같다.

$$\psi(r) = k^2 \int_0^{\infty} \Psi(\theta) J_0(k \sin \theta r) \sin \theta d \sin \theta \quad (8)$$

여기서 J_0 는 Zero-order Bessel function 이고 k 는 wave number 를 나타내며 θ 는 far field 에서는 각도를 뜻한다.

식 (8)을 (6)에 대입하여 Parseval's theorem 을 적용하면

$$I_w^2 = \frac{\frac{1}{2} [k w \int_0^{\infty} \Psi(\theta) e^{-k^2 w^2 \sin^2(\theta)/4} \sin z \theta d \theta]^2}{\int_0^{\infty} \Psi^2(\theta) \sin z \theta d \theta} \quad (9)$$

그러므로 식 (9)로 부러 launching efficiency 는 측정된 far-field 데이터로 부러 직접 구할 수 있으며 기본 모드 spot-size 도 알 수 있다.

식 (9)는 Gaussian approximation 을 사용하지 않으므로 spot-size 를 결정하는 데 정확하다.

3. 실험 결과

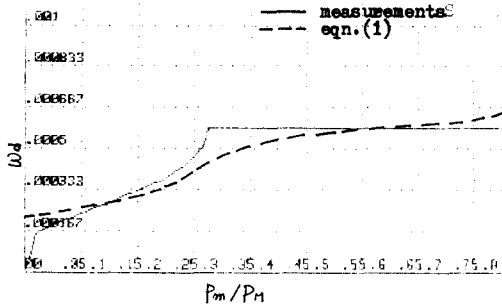


그림 2. Wd의 함수인 Pm / PM비의 변화
Fig. 2. Variation of ratio Pm/PM as a function of Wd.

Anderson 과 Philen's⁹⁾의 실험치와 비교한 결과는 다음과 같다.

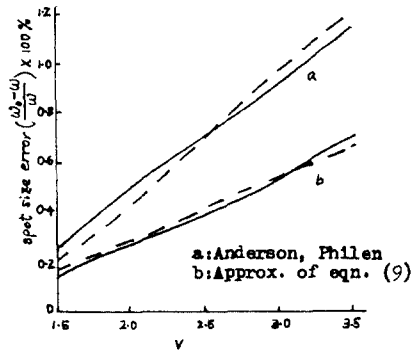


그림 3. 계산된 spot size 에서 발생한 오차
Fig. 3. Error in computed spot sizes

그림 3에서 보는 바와 같이 Anderson 과 Philen의 실험결과와 일치하지 않은 이유는 far - field 빔의 폭 θ_w 가 증가함에 따라 spot size도 커지기 때문이다.

4. 결론

단일 모드 광섬유의 Spot size 는 far - field 빔의 반경에 의해 변화하는 것을 확인했고 그 밖에 정규화 주파수 (normalised frequency) 정규화 전파 상수 (normalised propagation constant)와도 상관 관계가 있음을 보았다.

그림 2에서 보는 바와 같이 Pm / PM 의 값이 3이상의 범위에서 일정한 Wd 의 값 0.0006 을 갖는 것으로 보아 far-field 빔의 반경이 중요한

factor 라는 것을 알 수 있다.

5. 참고 문헌

1. L.D. Dickson, "Ronchi Ruling Method for Measuring Gaussian Beam Diameter" Opt. Eng., Vol.18, No.1, pp.70-75, Jan., 1979
2. J. Streckert, "New Method for measuring the Spot Size of Single-mode fibres" Opt. Lett., Vol.5, No.12, pp.505-506, Decem., 1980
3. J.P. POCHOLLE, J. AUGÉ, "New Simple Method for Measuring the Mode Spot Size in Monomode Fibres" ELECT. LETT., Vol.19, No.6, pp.191-193, Mar., 1983.
4. F. ALARD, L. JEUNHOMME, P. SANSONETTI, "Fundamental Mode Spot-Size Measurement in Single Mode Optical Fibres" ELECT. LETT., Vol.17, No.25, pp.958-960, Decem., 1981
5. P. SANSONETTI, "Prediction of Modal Dispersion in single-mode fibres from Spectral Behaviour of mode spot size." ELECT. LETT., Vol.18, No.3, pp.136-138, Feb., 1982.
6. P.J. SAMSON, "Computation of Fundamental-mode spot size from Far-Field pattern of single mode optical fibres", ELECT. LETT., Vol. 20, No.17, pp.680-681, Aug., 1984
7. C. PASK, "Physical Interpretation of PETERMANN'S STRANGE Spot Size for single-mode fibres", ELECT. LETT., Vol.20, No.3, pp. 144-145, Feb., 1984
8. P. SANSONETTI, "Modal Dispersion in single mode fibres; Simple Approximation issued from Mode Spot Size Spectral Behaviour", ELECT. LETT., Vol.18, No.15, pp.647-648, Jul., 1982
9. W.T. ANDERSON, D.L. PHILEN, "Spot Size measurements for single mode fibres - a comparison of four techniques," IEEE J. Lightwave Technol., 1., pp.20-26, 1983