

Tapered Lens를 사용한 Light Source와 Optical Fiber의 高效率 Coupling (A Highly Efficient Method of Light Coupling into Optical Fiber with a Tapered Microlens)

李 相 滄*, 姜 玟 鎬*
(Lee, Sang Ho and Kang, Min Ho)

要 約

LED나 laser diode와 optical fiber의 coupling efficiency를 높이기 위해서는 lens의 곡률반경을 작게 하는 것이 효과적이다. 본 연구에서는 heating and pulling 방식에 의한 tapered lens를 考案함으로써 最適 size의 lens製作을 용이하게 하였으며, taper의 特性을 이용하여 高效率 coupling을 가능하게 하였다.

理論的 계산에 의하여 90%까지의 light coupling이 가능함을 보였으며, 實驗결과 flat end에 대한 improvement factor는 LED에서 3dB, laser diode에서 6dB까지 증가시킬 수 있었다. epoxy를 사용하여 LED에 pigtail을 부착한 결과 溫度特性 및 기계적 安定性에서 實用化에 충분할 정도로 우수하였다.

Abstract

Microlenses with an extremely small radius of curvature are efficiently used to couple LED/laser diode light into optical fiber. We propose a Tapered lens for the highly efficient coupling of the optical fiber communication light sources into the fiber.

Ray optical analysis shows that the maximum coupling efficiency is as high as 90%. Tapered lens with optimum parameters are fabricated by using heating and pulling technique. Experiment shows that this new technique improves the coupling efficiency by two and four times for LED and laser diode, respectively, as compared with the simple flat-end coupling.

1. 序 論

Optical fiber를 사용한 光通信方式이 실용화됨에

따라 laser diode 및 LED와 optical fiber의 coupling 방법에서도 많은 研究가 이루어져왔다. coupling efficiency가 높고 기계적으로 安定한 coupling 방법으로는 selfoc lens나 spherical lens 등의 external lens를 사용한 connector type^[1]과 epoxy를 사용하여 pigtail을 달아낸 pigtail type^[2]이 많이 사용되고 있다. 그러나 前者는 connector 제작의 어려움이 따르므로 비교적 간단하고 coupling efficiency가 높은 pigtail type이

* 正會員, 韓國通信技術研究所
(Korea Telecommunications Research
Institute)
接授日字 : 1979年 6月 11日

더 많이 이용되고 있는 실정이다.

pigtail type의 coupling에서는 fiber의 끝을 lens로 만들므로써 coupling efficiency를 높일 수 있으며, 이때 coupling efficiency는 lens의 곡률반경을 작게 할수록 증가한다.^[3,4] 따라서 높은 coupling efficiency를 얻을 수 있는 lens의 design이 이 분야의 중요한 연구과제로서, cutting and heating에 의한 hemispherical lens,^[5] 化學的 처리에 의한 hemispherical lens,^[6] grinding and heating에 의한 cylindrical lens^[7] 등 여러가지 형식의 lens가 연구되어 왔다.

그러나 대부분이 商用化하기에는 제작과정이 복잡하고 어려운 방식으로 실제 商用化되고 있는 것은 이들 중 efficiency가 가장 낮은 cutting and heating에 의한 hemispherical lens이다.

이에 본 研究에서는 제작이 간단하면서도 높은 coupling efficiency를 얻을 수 있는 방법으로 tapered lens를 考案하였다.

ray tracing method를 사용하여 optimum taper angle을 결정하였으며, coupling efficiency를 理論的으로 계산하여 hemispherical lens와 비교하였다. 또한 laser diode와 LED를 사용하여 flat end에 대한 improvement factor를 實驗으로 확인하고, LED에 pigtail을 부착하였다.

2. Tapered lens

Hemispherical lens에 의한 coupling efficiency는 reference 3에서 상세하게 계산되어 있으며, 이에 의하면 coupling efficiency를 높이기 위해서는 lens의 곡률반경을 작게할수록 좋다. 그러나 cutting and heating 방법^[5]으로는 fiber 반경(cladding 반경)보다 작은 곡률반경을 가지는 lens는 제작할 수가 없다.

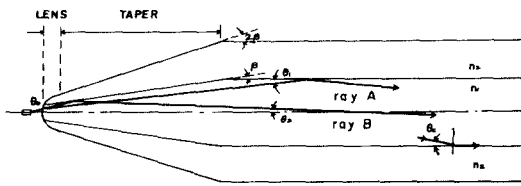


그림 1. Tapered lens의 원리

Fig. 1. Definition of the tapered lens.

그림 1은 tapered lens의 model이며, 해석을 간단히 하기 위해 곡률반경이 매우 작은 hemispherical lens와 taper의 결합으로 생각하였다. light source의 size가 fiber의 core 직경에 비해 충분히 작다고 가정하고 hemispherical lens部分에서의 해석은 reference 3의 fig. 2를 사용하였다.

light source로부터 fiber의 axis에 대하여入射角 θ_0 로 lens에入射된 ray는 lens 표면에서 axis에 대한角 θ_1 으로 屈折된다. 이때 lens에서 屈折된 ray는 θ_1 의 크기에 따라 ray A와 ray B로 나타낸 두 group으로 나누어 생각할 수 있다.

(1) ray A의 group

$$\theta_1 < \theta_c \quad (1)$$

즉, lens에서 屈折된 ray의 fiber axis에 대한角이 fiber의 critical angle θ_c 보다 작은 경우로써, 이 group에 屬한 모든 ray는 taper에 관계없이 fiber의 core에 guide된다.

(2) ray B의 group

$$\theta_1 \geq \theta_c \quad (2)$$

lens에서 屈折된 ray의 axis에 대한角이 θ_c 보다 큰 경우이며, 이들 ray는 taper에서 反射됨으로서 core에 guide될수 있다. core의 taper angle을 β 라 하면角 θ_1 의 ray B가 taper의 core와 cladding 경계에서 total reflection되기 위해서는

$$\theta_1 - \beta \leq \theta_c \quad (3)$$

가 되어야 한다. 그리고 taper에서 反射된 ray가 core에 guide되기 위해서는

$$\theta_2 = |\theta_1 - 2\beta| \leq \theta_c \quad (4)$$

의 條件이 만족되어야 한다. 따라서 式(3)과 式(4)로부터

$$\theta_1, \max = \theta_c + \beta \quad (5)$$

임을 알 수 있다. 그런데 $\theta_1 \geq \theta_c$ 인 모든 ray가 taper에서 反射되기 위해서는

$$\beta \leq \theta_1, \min \quad (6)$$

이 되어야하며 $\theta_1, \min = \theta_c$ 이므로

$$\beta, \max = \theta_c \quad (7)$$

가 된다. 式(7)을 式(5)에 代入하면

$$\theta_1, \max = 2\theta_c \quad (8)$$

즉, core의 taper angle β 를 fiber의 critical angle θ_c 와 같게하면 fiber의 有效 critical angle을 두배로 증가시킬 수 있게 된다.

그림 2는 reference 3의 그림 2와 式(8)을 사용하여 flat end와 hemispherical lens 및 tapered

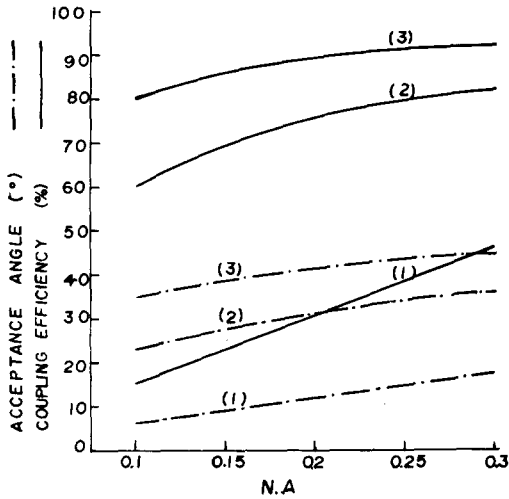


그림 2. 각 방법의 광섬유 N.A.에 따른 maximum acceptance angle 과 maximum coupling 효율 (1) flat end (2) hemispherical lens (3) tapered lens

* $n_1 = 1.5$, laser 의 $W_0(\omega) = 0.28 \mu m$, $\lambda = 0.8652 \mu m$

Fig. 2. Theoretical acceptance angles and maximum coupling efficiencies as a function of N.A. of the fiber.

lens 에서의 maximum acceptance angle 과 maximum coupling efficiency 를 fiber 의 N.A. 의 함수로 나타낸 것이다. 여기서 coupling efficiency 의 계산은 junction 에 수직방향에서의 half beam waist 가 $0.28 \mu m$ 이고 peak power wavelength 가 $0.8652 \mu m$ 인 laser diode 를 light source 로 가정하고, core 의 屈折率이 1.5 인 step index multimode fiber 에 대하여 계산하였다. 長距離 通信에 사용되는 fiber 의 N.A. 는 보통 0.15~0.2 정도이므로 이 범위에서 tapered lens 가 hemispherical lens 에 비해 약 20% 정도 높은 coupling efficiency 를 얻을수 있음을 알 수 있다.

3. 實 驗

Tapered lens 는 본 研究室에서 개발한 optical fiber 用 fusion splicer 를 사용하여 heating and pulling 방법으로 製作하였다. 製作時 core 의 taper angle 을 직접 測定하기가 곤란하지만, cladding 직경이 core 직경의 2배인 fiber 를 使用하

면, 대개, cladding 의 taper angle 이 core 의 taper angle 의 2배가 되므로 cladding 의 taper angle 을 測定하였다. taper 의 angle 과 lens 의 곡률반경은 pulling speed 에 의하여 조절할수 있었으며 式(7)에 의하여 N.A. = 0.2 인 fiber 에서 taper angle 2β 는 약 15° 로 하였다. 사진 1은 hemispherical lens 와 tapered lens 의 實物을 비교한 것이다.

coupling efficiency 는 LED 와 laser diode 에 대하여 각각 實驗하였다. LED 는 發光面의 size 가 $25.4 \times 152.4 \mu m$ 인 美國 RCA 社의 C-30119



사진 1. Hemispherical lens (上) 와 tapered lens (下) 와의 비교

Photo. 1. A comparison of the hemispherical lens (top) and the tapered lens (bottom).

를 사용하였으며, laser diode 는 美國 Laser Diode Labs. 社의 LCW-5 로 發光面의 size 는 $0.25 \times 12.7 \mu m$ 이었다.

LED 와 laser diode 의 total output power 를 정확히 測定할수 없어 coupling efficiency 는 fiber 에 coupling 된 power 를 測定하여 flat end 및 hemispherical lens 와 비교하였다.

그런데 실제의 LED 나 laser diode 는 fiber 의 core 에 비해 point source 라 할수 없으므로 lens 의 最適 곡률반경은 각각의 경우 實驗에 의해 구하였다. LED 에서의 最適 곡률반경은 $20 \mu m$ 정도였으며, laser diode 에서는 $5 \sim 8 \mu m$ 로 나타났다.

LED 와 laser diode 의 coupling 實驗결과는 각각 그림 3 과 그림 4 에서 보였다.

LED 는 dc 200mA 로 구동시켰으며 flat-end 에 대한 improvement factor 는 hemispherical lens 가 약 1.9dB 인데 비해 tapered lens 는 3

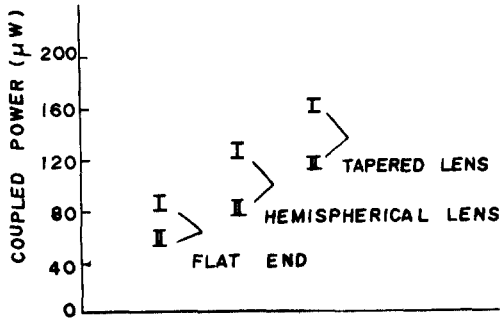


그림 3. LED의 coupling 실험결과
 ※ LED : C - 30119
 광섬유 : I - S.I., core 70 μm, N.A. 0.2
 II - G.I., core 60 μm, N.A. 0.2
Fig. 3. Results of LED coupling into fibers.

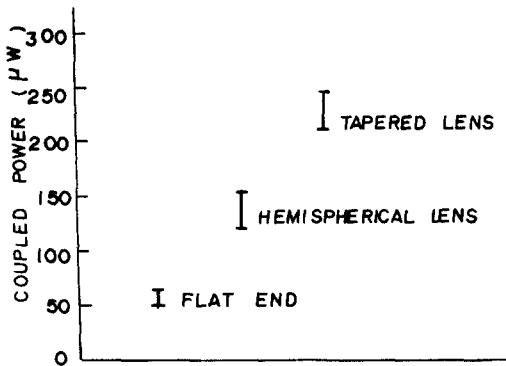


그림 4. Laser diode coupling 실험결과
 ※ laser diode : LCW - 5
 광섬유 : G. I., core 62.5 μm, N.A. 0.21
Fig. 4. Result of laser coupling into fibers.

dB였다. graded index fiber의 경우 coupling efficiency는 step index fiber에 비해 약 1.3dB 정도 낮았으나 flat end에 대한 improvement factor는 step index와 거의 같았다. laser diode는 dc 240 mA로 threshold current보다 낮은 電流로 구동하여 실험하였으며 flat end에 대한 improvement factor는 hemispherical lens가 3.6dB 정도, tapered lens에서 6dB로 LED에 비해 훨씬 크게 나타났다.

LED에서의 pigtail 附着은 epoxy를 사용하여 그림 5와 같은 구조로 하였다.

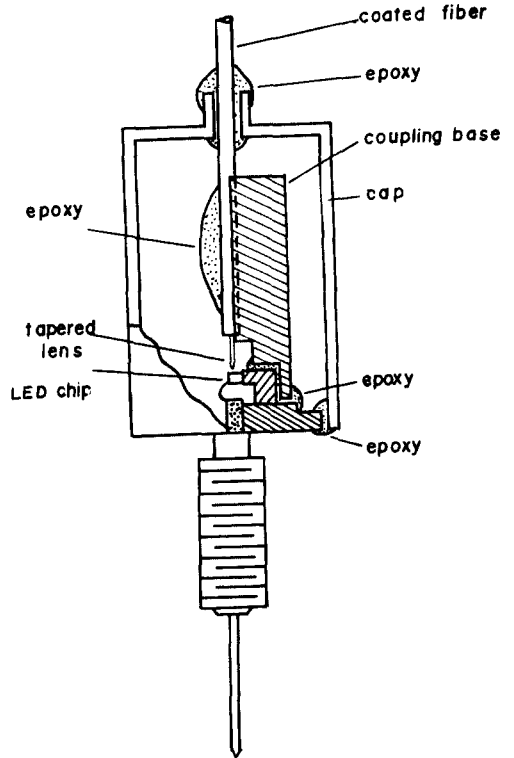


그림 5. LED의 Pigtail 부착구조
Fig. 5. Structure of pigtailed LED.

먼저 tapered lens가 製作된 fiber를 coupling base에 고정된 후 micropositioner를 사용하여 align하고 coupling base와 LED의 heat sink를 epoxy로 接着하였다. 이때 接着의 強度를 높이고 epoxy의 變形에 의한 效率變化를 줄이기 위하여 接着面積을 최대한 넓게 design하고 epoxy의 curing time을 충분히 길게 하였다. pigtail을 附着한 LED는 0 °C에서 40 °C까지의 溫度變化試驗에서 特性의 變化를 확인한 수 없었으며 기계적 安定性 역시 우수하였다.

표 1은 현재 商用化되고 있는 pigtail type의 LED 중 長距離 光通信에 적합한 것과 본 研究의 결과를 비교한 것이다.

効率面에서 본 研究의 결과가 기존 제품에 비해 훨씬 우수함을 일수 있으며, 기존 제품의 경우 pigtail을 附着함으로써 LED의 價格을 100弗 이상 더 받고 있는 점을 감안하면 본 研究의 경제적 効果도 충분함을 알 수 있다.

표 1. 상용화되고 있는 pigtail type LED와의 특성비교
Table 1. Comparisons with existing pigtailed LED.

L E D			fibér			coupled power (μW)	price (\$)	
company	type	power (μW)	core dia. (μm)	index profile	N. A		LED	pigtailed LED
L.D. Labs.	IRE 160	7,000	65	G. I.	0.27	100	223	360
* RCA	C - 30119	500	70	S. I.	0.2	150	118	
* RCA	C - 30119	500	60	G. I.	0.2	110	118	

* 표는 본 연구 결과임.

4. 結 論

Light source 와 optical fiber 의 高効率 coupling 을 위하여 tapered lens 를 考案하였다.

ray tracing method 를 사용하여 taper angle 의 最適値는 fiber 의 critical angle 과 일치함을 알았다. maximum acceptance angle 과 coupling efficiency 를 理論的으로 계산하여 hemispherical lens 와 비교하였으며, flat end 에 대한 improvement factor 를 實驗으로 확인하였다. tapered lens 는 heating and pulling 방식으로 製作하기 때문에 pulling speed 에 의하여 taper angle 과 lens 의 곡률반경을 임의로 조절할 수 있으며, 最適 곡률반경은 LED에서 약 $20 \mu m$, laser diode 에서 $5 \sim 8 \mu m$ 이었다. taper angle 을 15° 로 하였을 때, N. A.=0.2 인 graded index multimode fiber 에서 flat end 에 대한 improvement factor 는 LED 의 경우 3dB, laser diode 는 6dB 까지 증가시킬 수 있었다. epoxy 를 사용하여 LED에 pigtail 을 附着한 결과, $0^\circ C$ 에서 $40^\circ C$ 까지의 溫度試驗에서 특성의 變化가 없었으며, 外形과 기계적 安定性 역시 實用化에 充分한 정도로 우수하였다.

- bers" Appl, Opt. Vol. 45, No. 6 1974.
4. 강민호, 이상호. "Cylindrical Lens 를 사용한 Laser Coupling" 通信技術 Vol. 1, No. 1, 1979.
 5. D. Kato, "Light Coupling from a Stripe-geometry GaAs Diode Laser into an Optical Fiber with Spherical End" J. Appl. Phys. Vol. 44, No. 6, 1973.
 6. C. C. Timmerman, "Highly Efficient Light Coupling from Ga Al As Lasers into Optical Fibers," Appl. Opt. Vol 15, No. 10. 1976.
 7. Y. Kohanzadeh, "Injection Laser Coupling to Optical Waveguides With Integral Lenses" J. Appl. Phys. Vol. 47, No. 1, 1976.

參 考 文 獻

1. K. Iwamoto, et al, "Efficient Light Emitting Diodes for Optical Communications Systems" NEC Research and Development, No. 51, Oct. 1978.
2. RCA Catalog OPT-113C "Solid State IR Emitters and Injection Lasers" July 1977.
3. C. A. Bracket, "On the Efficiency of Coupling Light from Stripe-geometry GaAs Lasers into Multimode Optical Fi-