

## 렌즈에 따른 광콜리메이터 성능 비교 분석

선화영\*, 최두선, 제태진, 최기봉(한국기계연구원), 김동식(㈜포엠)

### Analysis and Comparison of the Performance of Optical Collimator by Lenses

H. Y. Sun\*, D. S. Choi, T. J. Je, K. B. Choi (KIMM), D. S. Kim (Biz4m Co., Ltd.)

#### ABSTRACT

Optical collimating lenses are play a role as maintenance parallel light and as a kind of optical collimating lens, there is Ball lenses, GRIN-rod lenses, spherical lenses and aspherical lenses etc. but recently GRIN lens has monopolized a market. The performance of optical collimator depended on the coupling efficiency.

In this paper, we were compared and analyzed to be measured values of coupling efficiency with respect to optical working distance using GRIN rod lenses and spherical lenses. In the case of GRIN lenses with a beam size of 420  $\mu\text{m}$ , the minimum coupling efficiency was obtained to a measured value of 0.15 dB and in the case of spherical lenses was obtained to a measured value of 0.12 dB on the same condition. In results, we found that a performance of spherical lenses be better as compared with a that of GRIN lens.

**Key Words :** optical collimator (광 콜리메이터), Ball lens (볼 렌즈), GRIN lens (Gradient Index lens), Spherical lens (구면 렌즈), coupling efficiency (결합효율)

#### 1. 서론

광통신이란 전기통신에서 전기적 신호를 정보 전달 수단으로 이용하는 것과는 달리 빛을 이용하여 통신을 가능하게 하는 방식을 말한다. 이러한 정보 전달의 수단으로 사용되는 빛은 기본성질에 의해서 발산하게 되고, 발산된 빛은 결과적으로 결합효율을 크게 저하시키게 된다. 따라서 광손실을 줄이거나 조절의 편리성을 위하여 평행광을 만들어 줄 필요가 있는데, 이때 사용되는 부품이 광콜리메이터이다.<sup>1,2</sup>(Fig. 1)

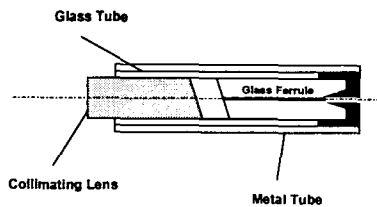


Fig. 1 Structure of Optical Collimator

광통신용 광콜리메이터는 페룰에 광섬유가 삽입되어 있는 피그테일과 광콜리메이터용 렌즈, 그리고 피그테일과 광 콜리메이터용 렌즈를 고정해주는 유리관으로 구성된다. 광콜리메이터에서 빛을 평행광으로 유지하기 위한 역할을 주로 수행하는 것은 광콜리메이팅 렌즈이다. 렌즈는 빛을 집속, 확대 또는 평행하게 하는 중요한 광학 소자이다. 광 콜리메이터에 필수적인 콜리메이팅 렌즈는 Ball 렌즈, GRIN (Gradient index) 렌즈, 구면렌즈, 비구면 유리 렌즈 등이 있다. 주요 요소 부품인 콜리메이팅 렌즈의 가격 및 성능이 콜리메이터의 가격과 성능을 좌우하는 데 현재는 GRIN 렌즈가 시장을 독점하고 있지만 이를 대체하는 비구면 렌즈, 구면 렌즈 등이 가격 및 성능면에서 뒤지지 않으므로 멀지않아 기존의 GRIN 렌즈 시장을 대체할 것으로 추정된다.

광통신용 광콜리메이팅 렌즈의 성능은 결합효율을 최소로 하는 것이다. 결합효율은 렌즈의 수차에 의해 크게 좌우된다. 수차란 렌즈 등의 광학계에서 상을 맺을 때 한 점에서 나온 빛이 광학계를 지난 다음, 한 점에 모이지 않아 영상이 빛깔이 있어 보이거나 일그러지는 현상을 말한다. 광콜리메이터를 제작하고 평가하는 데 있어서 수차를 고려해야만 한다.

본 연구에서는 광콜리메이터에 사용되는 콜리메이팅 렌즈에 대하여 알아보고 굴절률에 따른 렌즈의 수차를 해석적으로 비교하고자 한다. 또한 광콜리메이터를 렌즈(GRIN 렌즈, 구면렌즈)에 따라 직접 제작하여 결합효율을 측정하고 분석하고자 한다.

## 2. 광콜리메이팅 렌즈의 종류 및 특성

### 2.1 Ball 렌즈

Ball 렌즈(Fig. 3(a))은 광섬유나 발광기 그리고 검출기 사이의 신호 결합을 향상시키는 역할을 하는 렌즈이다. 두꺼운 렌즈 공식<sup>3</sup>에 의해 Ball 렌즈의 초점거리는

$$f = \frac{n}{2(n-1)}r \quad (1)$$

이다. 그리고 3 차 수차 이론에 의해 Ball 렌즈의 구면수차는 식 (2)와 같다.

$$\varepsilon = \frac{1}{4} \left[ \frac{n}{(n-1)^2} \right] / N.A.^3 \quad (2)$$

여기에서  $\varepsilon$  는 수차원의 반경,  $n$  은 Ball 렌즈의 굴절률,  $N.A.$  는 광섬유의 개구수,  $f$  는 식 (1)에 의해 주어진 초점거리이다.

### 2.2 GRIN 봉 렌즈

GRIN (Gradient Index) 봉 렌즈는 굴절률이 점진적으로 변하는 매질을 이용하여 통상적인 렌즈의 역할을 한다. 파의 서로 다른 부분들이 서로 다른 속도로 진행하며, 이에 따라 이 파의 파면의 모양이 변한다. 또한 굴절률이 반경을 따라 변하여 중심축으로부터 멀어지면서 포물체 모양으로 감소한다. (Fig.2)

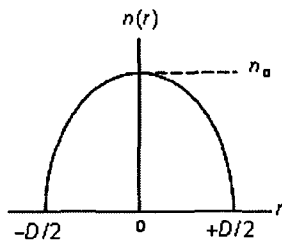


Fig.2 GRIN Refractive Index Profile

따라서, GRIN 봉 렌즈(Fig. 3(b))는 포물선 분포에 의해 굴절률을 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$n^2(r) = n_0^2 [1 - (gr)^2] \quad (3)$$

GRIN 봉 렌즈에 입사하는 빛은 피치  $2\pi/g$  를 가

진 사인 곡선을 따라 경유한다. 일반적으로 GRIN 봉 렌즈의 초점거리는

$$f = 1/n_0\varepsilon \quad (4)$$

이다. 3 차 구면 이론에 의해 GRIN 봉 렌즈의 수차원의 반경은 식 (5)와 같다.

$$\varepsilon = \frac{\pi}{2} \frac{1}{n_0^2} f N.A.^3 \quad (5)$$

여기에서  $\varepsilon$  는 수차원의 반경,  $N.A.$  는 광섬유의 개구수,  $f$  는 초점거리,  $n_0$  는 광축상의 굴절률을 나타낸다.

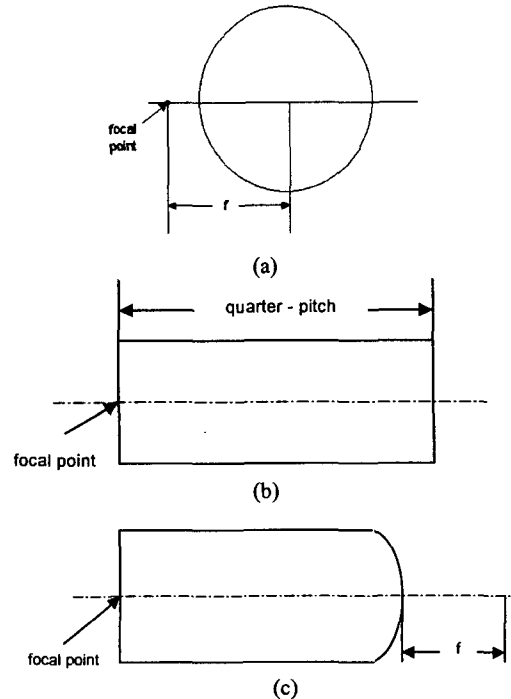


Fig. 3 Fundamental imaging parameters : (a) Ball lens (b) GRIN rod lens and (c) Spherical lens

### 2.3 구면 렌즈

구면 렌즈의 초점은 렌즈의 평면에서 선택된다. 광콜리메이터에 쓰이는 구면 렌즈는 Fig. 3(c)와 같은 형태이며, 두꺼운 렌즈 공식에 의해 구면 렌즈의 초점거리는

$$f = \frac{1}{n-1}r \quad (6)$$

이다. 3 차 수차 이론에 의해 구면렌즈의 수차원의 반경은 식(7)과 같다.

$$\varepsilon = \frac{1}{n^2(n-1)^2} / N.A.^3 \quad (7)$$

여기에서  $\varepsilon$  는 수차원의 반경,  $N.A.$  는 광섬유의 개구수,  $f$  는 초점거리,  $n$  는 구면렌즈의 굴절률을 나타낸다.

## 2.4 비구면 렌즈

비구면 렌즈란 중앙부는 구면이고, 그 주변부는 타원면인 렌즈이다. 렌즈의 주변부에서 상의 왜곡, 비점수차를 극소화시킨 렌즈로 렌즈의 직경이 커져도 렌즈의 주변부에서 왜곡현상과 비점수차가 생기지 않는 장점을 가지고 있다. 비구면 렌즈에서 가장 고려해야 할 수차는 구면과 왜곡이다.

구면 수차란 빛이 렌즈를 투과할 때 렌즈의 주변부를 통과한 빛이 중심부를 통과한 빛보다 더 짧은 거리에 초점을 맺는 현상으로 중심부와 주변부의 초점 위치가 달라지게 된다. 구면 수차로 인해 빛이 한 점으로 모이지 않고 주변부로 흩어지게 되므로 피사체의 초점이 정확하게 맺히지 않기 때문에 이를 해결하기 위한 것이 비구면 렌즈이다.

일반적으로 비구면 면형상함수는 다음과 같다.

$$f(x) = \frac{cx^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2x^2}} + A_2h^2 + A_4h^4 + \dots \quad (8)$$

여기에서  $A_2, A_4$  는 비구면 계수,  $C$  는 곡률반경,  $K$  는 원추 계수이다. 두꺼운 렌즈 공식에 의해 초점거리  $f$  는

$$f = \frac{1}{n-1}r \quad (9)$$

이다. 비구면 렌즈는 수차의 문제를 해결하기 위해 설계된 렌즈이므로 구면 수차는 거의 0에 가깝다.

## 3. 콜리메이팅 렌즈 비교 분석

### 3.1 굴절률에 대한 렌즈의 수차

광콜리메이터에 쓰이는 렌즈는 Ball 렌즈, GRIN 봉 렌즈, 구면렌즈, 비구면 렌즈가 있다. 렌즈는 빛을 집속, 확대 또는 평행하게 하는 중요한 소자로서 콜리메이터의 성능을 평가하는 데 있어서 중요하다. 제 2 절의 서술된 이론을 바탕으로 렌즈의 종류에 따른 구면수차를 해석적으로 구하였다. 그리고 CODE-V 를 이용하여 4f 시스템 (Fig. 4)에서 같은 초점거리, 개구수를 사용하였으며, 식 (2), (5), (7)로부터 수차 변수  $\varepsilon/fN.A.^3$  가 단지 굴절률에만 관계하도록 시뮬레이션 하였다. 즉, 수차변수  $\varepsilon/fN.A.^3$  는 굴절률의 함수로 나타내었다.

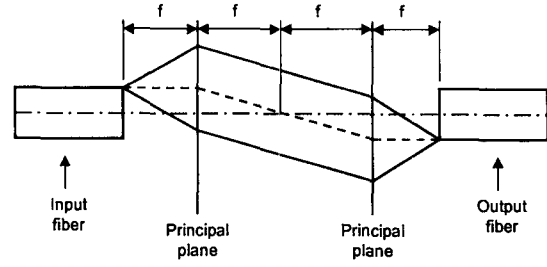


Fig. 4 Universal arrangement for optical lens coupling

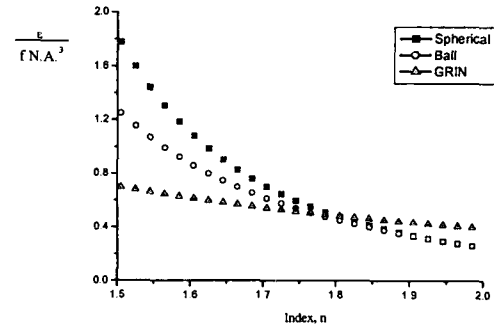


Fig. 5 Comparison of Spherical Aberration with respect to Collimating Lens Types

Fig. 5 는 굴절률의 변화에 따른 구면 수차를 비교한 것이다. 구면렌즈나 Ball 렌즈의 경우는 굴절률에 따라 수차가 크게 다르지만, GRIN 렌즈의 경우는 거의 일정하며,  $n > 1.75$  일 때, 굴절률이나 렌즈에 거의 관계없이 수차의 정도가 비슷함을 알 수 있다. 또한 렌즈의 수차를 줄이기 위해서는 고굴절률을 가진 렌즈를 사용하는 것이 좋다는 것을 알 수 있다.

## 3.2 광콜리메이터 결합효율 측정 및 비교

### 3.2.1 실험장치 및 방법

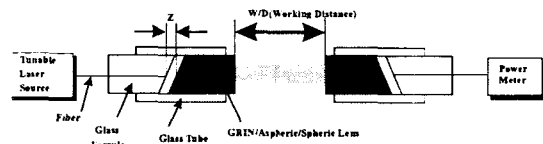


Fig. 6 Schematic Diagram of the Experiment

Fig. 6 은 결합 효율을 측정하기 위한 실험 장치의 개략적인 모습을 나타낸 것이다. 먼저 실험을 수행하기 위하여 광콜리메이터 2 세트를 제작하였다.

첫 번째 콜리메이터의 광파이버에는 광원을 연결하여  $P_0$  의 세기로 입력광을 주고, 두 번째 콜리메이터는 전력계(power meter)를 연결하고 측정을 하여 수광부에서의 광의 세기  $P_1$  을 관측을 하여 식 (10)에 의해 결합효율을 비교하였다.

$$\text{Coupling Loss} = -10 \log \frac{P_1}{P_0} \quad (10)$$

이 때, 렌즈와 피그테일 사이의 거리(z)에 따라 콜리메이터에서 나오는 빔의 크기가 변하게 되는데, 콜리메이터 끝단에서부터 50 mm 떨어진 지점에 빔형상기를 설치하여 렌즈와 피그테일 사이의 거리(z)에 상응하는 빔의 크기별로 콜리메이터를 제작하였다. 또한, 두 콜리메이터 사이의 거리인 작동거리를 변화시켜가면서 결합손실을 측정하였다. 이때, 콜리메이팅 렌즈로 NSG 사의 SLW 모델로 광축상의 굴절률  $n_0 = 1.6$  을 사용하였으며, 구면렌즈는 굴절률  $n = 1.73$  을 사용하였다.

Fig. 7 은 광콜리메이터를 제작하고 성능을 평가하기 위한 실험 장치이다. 비전인식 시스템은 CCD 카메라와 이미지 분석 소프트웨어로 구성되며 피그테일과 렌즈의 경사각을 상호 평행이 되도록 회전 정렬시켰다. 또한 조립용 4 축 스테이지는 X, Y, Z 축 1  $\mu\text{m}$ ,  $\theta$  축 0.247° 의 분해능을 가지며, 각종 계측 및 인식장치와 함께 미세 정렬 기능을 수행한다. 패키징 시스템은 크게 UV 경화기, 정량 토출기 (dispenser)로 구성되어 있고, 초정밀 6 축 스테이지는 콜리메이터 간의 광축을 정밀하게 정렬하기 위하여 위치 정확도 5  $\mu\text{m}$ , 반복특성  $\pm 3 \mu\text{m}$ , 분해능 0.05  $\mu\text{m}$ 의 기본 성능을 가지고 있다.

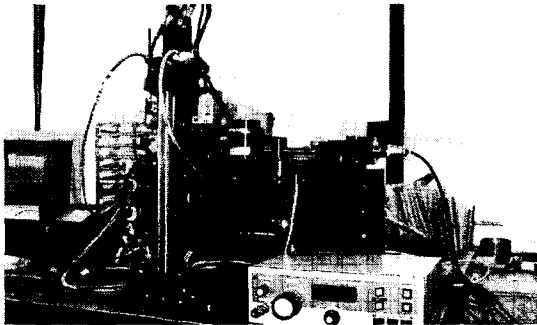


Fig. 7 Experimental setup for manufacture of optical collimator

### 3.2.2 결합효율 측정 결과 및 분석

제작된 광콜리메이터를 가지고 작동거리에 따른 결합 효율을 측정한 결과 Fig. 8 과 Fig. 9 의 그래프를 얻었다.

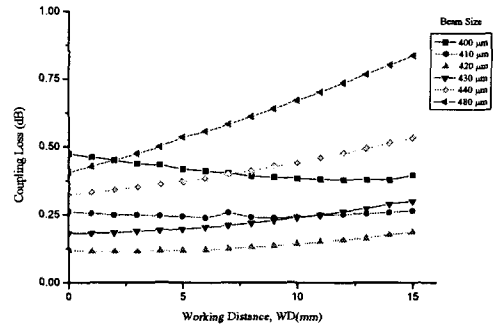


Fig. 8 Coupling Loss of Fiber-Optic Collimator with Spherical Collimating Lens (Working Distance 0-15 mm)

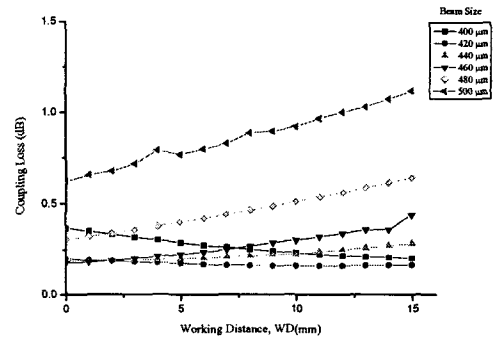


Fig. 9 Coupling Loss of Fiber-Optic Collimator with GRIN Collimating Lens (Working Distance 0-15 mm)

최소 결합 효율은 구면 렌즈의 경우, 빔 크기 420  $\mu\text{m}$  일 때, 0.12 dB 를 얻었으며, GRIN 렌즈의 경우는 빔 크기 440  $\mu\text{m}$  일 때, 0.15 dB 를 얻었다. 이 결과를 기준으로 하여 광콜리메이터 조립시 최적 조건을 선정할 수 있다. 또한 측정 결과를 비교했을 때 빔 크기가 420  $\mu\text{m}$  일 때가 두 렌즈 모두 결합효율이 좋은 것으로 나타났다.

Fig. 10 은 빔크기가 420  $\mu\text{m}$  일 때의 두 광콜리메이팅 렌즈의 결합효율을 비교한 것이다. 비교한 결과 구면 렌즈가 대체적으로 GRIN 렌즈에 비해 더 성능이 좋음을 알 수 있다.

## 참고문헌

1. "2000 광산업 예측 편람," Fuji Chimera Research Institute, Inc., Japan.
2. Huey-Daw Wu, Frack S. Barnes, "Micro Lenses," IEEE Press, 1991.
3. F. A. Jenkins and H. E. White., Fundamentals of Optics McGraw-Hill, New York, pp. 84-87, 1976

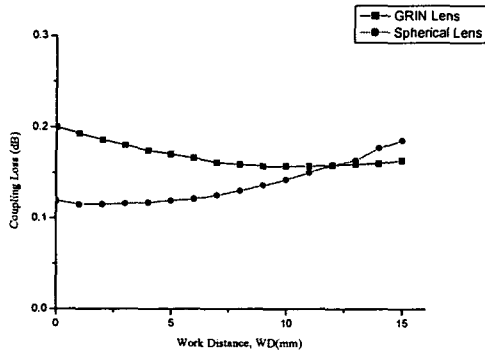


Fig. 10 Comparison of coupling efficiency with GRIN lens and Spherical collimating lens (beam size : 420  $\mu\text{m}$ )

## 4. 결론

굴절률에 따른 구면 수차를 각각의 렌즈에 따라 비교해보았다. 그 결과 렌즈의 굴절률이  $n > 1.75$  일 때, 렌즈들의 성능이 비슷해짐을 알 수 있다.

구면 렌즈와 GRIN 렌즈를 사용하여 광콜리메이터를 제작하고, 작동거리에 따른 결합효율을 측정 한 결과 최소 결합 효율은 구면 렌즈의 경우, 빔 크기 420  $\mu\text{m}$  일 때, 0.12 dB 를 얻었으며, GRIN 렌즈의 경우는 빔 크기 440  $\mu\text{m}$  일 때, 0.15 dB 를 얻었다. 그 결과 GRIN 렌즈에 비해 구면렌즈의 성능이 더 나음을 알 수 있었다. 이것은 현재 독점하고 있는 GRIN 렌즈의 시장을 구면 렌즈로 대체할 수 있으리라 기대된다.

향후에는 기존의 양산성 및 생산성이 검증된 GMP(Glass Mold Pressing) 공정에 의해 생산이 가능하고, 원가 경쟁력이 있으며, 구면 수차 등을 최소화 하도록 설계하여 성능 또한 향상이 가능한 장점을 가지고 있는 비구면 렌즈를 사용하여 광콜리메이터의 성능을 비교 분석해 보고자 한다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대 신기술 개발 사업 중 한국기계연구원이 주관하고 있는 고기능 초미세 광·열유체 마이크로 부품 기술 개발 사업의 세부과제로서 수행 중이며 이에 관계자 여러분들에게 감사의 말씀을 올립니다.