

## 막대 형태의 비구면 렌즈를 이용한 광통신용 시준기의 설계

강석봉 · 강은경 · 황보창권<sup>†</sup>

인하대학교 자연과학대학 물리학과  
Ⓣ 402-751 인천광역시 남구 용현동 253번지

강상도

AG광학 광기술연구소  
Ⓣ 506-258 광주광역시 광산구 안청동 731-8번지

김중섭

한국광기술원 시험생산센터  
Ⓣ 500-460 광주광역시 북구 월출동 971-35번지

(2007년 12월 26일 받음, 2008년 1월 15일 수정본 받음)

결합효율이 높고 정렬오차 발생 시 결합효율의 저하가 작은 광통신용 비구면 렌즈 시준기를 설계하였다. 비구면 시준 렌즈는 GRIN 렌즈와 작동거리와 두께가 유사하고 외경이 동일한 원통형 막대 형태로 설계해 GRIN 렌즈를 대체할 수 있도록 하였다. 결합효율의 저하는 시준렌즈의 구면수차에 의해 주요하게 발생하므로, 비구면 렌즈 시준기가 볼 렌즈, GRIN 렌즈 및 C-렌즈 시준기보다 높은 결합효율을 가지도록 비구면 계수를 최적화 해 구면수차를 낮추었다. 설계한 비구면 렌즈 시준기의 결합효율은 기존 시준기들보다 높았으며 정렬오차에 따른 결합효율의 감소도 작았다.

주제어 : Optical collimator, Aspheric lens, Coupling efficiency

### I. 서 론

광통신용 시준기(collimator)는 그림 1과 같이 송신 광섬유(source fiber)의 모드를 시준렌즈(collimation lens) 및 광학박막필터와 같은 소자를 통하여 수신 광섬유(receiving fiber)의 끝단에 전달해 주는 부품이다.<sup>[1-5]</sup> 모드 전달 과정 중 시준렌즈의 수차나 정렬오차에 의해 위상의 변화가 생기면 모드가 변형되어 수신 광섬유에 결상된다. 이러한 모드 불일치가 발생하면 광신호의 전달 효율 즉 두 광섬유 사이의 결합효율(coupling efficiency)이 감소한다.

Wagner와 Tomlinson은 광통신용 시준기를 네 개의 광학면(물체면, 입사동면, 출사동면, 상면)으로 구성하고 각 면간의 모드 전달 과정을 스칼라 회절 이론을 이용하여 결합효율을

유도하였고, 전달된 모드의 상을 수신 광섬유의 모드와 비교하여 결합효율을 계산하였다.<sup>[1]</sup> Ramos 등은 Wagner 등의 연구 결과를 이용해 볼 렌즈 시준기의 결합효율을 계산하고, 실제 시준기의 결합효율 측정치와 일치함을 보고하였다.<sup>[2]</sup> 또한 볼 렌즈의 두께를 일정하게 변화시키며 결합효율을 계산해 최적의 두께를 가지는 볼 렌즈를 설계하였다.

Yuan 등은 광섬유 모드의 전달을 근축광선 추적을 통해 계산하고, 이를 통해 GRIN 렌즈 시준기의 결합효율을 계산하였다.<sup>[3]</sup> GRIN 렌즈의 작은 수차를 무시하고, 시준렌즈의 정렬오차에 의해 변형되어 전달된 모드가 수신 광섬유의 모드와 일치하지 않아 결합효율의 손실이 발생함을 보고하였다. 한편 Côté와 Shannon은 볼 렌즈의 결합효율을 Strehl 비(ratio)를 이용하여 계산하였다.<sup>[4]</sup> Strehl 비는 광학계를 지난 후 상이 변형된 정도를 나타내므로, 볼 렌즈 시준기를 지난 후 수신 광섬유 끝단에 결상된 모드의 변형 정도를 상용 광학 설계 프로그램(CODE-V)으로 계산하고 실험치와 일치함을 보고하였다.

광통신용 시준기와 같이 하나의 렌즈로 구성된 광학계는 비구면 렌즈를 이용하면 수차를 효과적으로 감소시킬 수 있다. 또한 최근 유리성형(glass molding press)기술의 발전으로 정확한 형상의 소형 비구면 유리 렌즈를 제작할 수 있게 되었으므로, 수차를 줄인 유리 재질의 비구면 렌즈를 설계해 시준기를 구성하면 광통신용 시준기에서 결합효율을 증가시킬 수 있을 것이다.

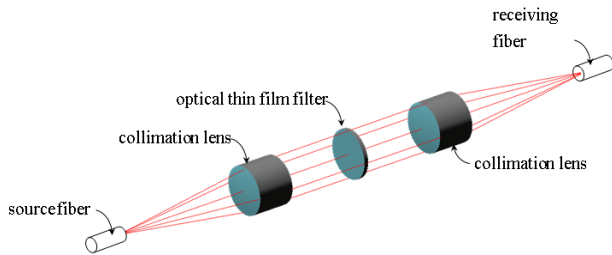


그림 1. 광통신용 시준기 광학계.

<sup>†</sup>E-mail: hwangbo@inha.ac.kr

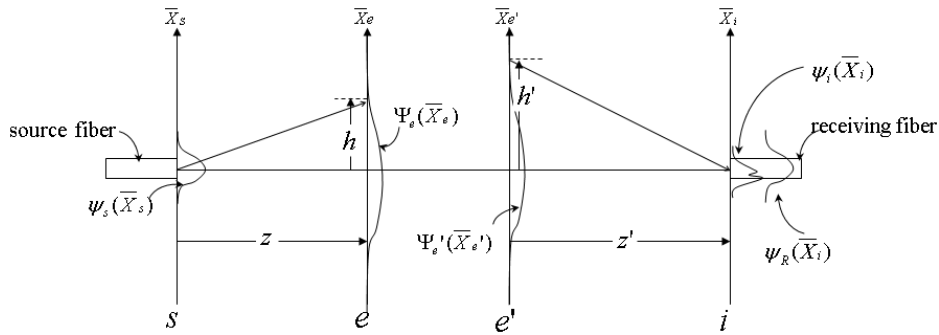


그림 2. 광통신용 시준기 광학계의 개략도.

본 논문에서는 기존의 GRIN 렌즈나, 볼 렌즈 및 C-렌즈 시준기에 비해 수차를 감소시켜 결합효율을 증가시킨 비구면 유리 렌즈를 설계하고자 한다. GRIN 렌즈가 굴절률 분포를 포물선 형태로 조절해 구면 수차를 감소시킨 것과 같이 비구면 렌즈의 비구면 계수를 조절해 구면수차를 감소시키고, GRIN 렌즈와 동일한 외경과 유사한 두께, 작동거리를 가진 원통 막대 형태로 설계해 GRIN 렌즈를 비구면 유리 렌즈로 대체하고자 한다.

II. 결합효율의 계산

광통신용 시준기 광학계는 그림 2의 개략도와 같이 물체면  $s$ , 입사동면  $e$ , 출사동면  $e'$ , 상면  $i$ 로 나타낼 수 있다.<sup>[1]</sup>

송신 광섬유의 모드  $\psi_s(\bar{X}_s)$ 는 물체면  $s$ 에서  $e$ 면으로 전달되며,  $e$ 면에서의 모드 분포  $\Psi_e(\bar{X}_e)$ 는  $\psi_s(\bar{X}_s)$ 의 Fraunhofer 회절 분포이다.  $\Psi_e(\bar{X}_e)$ 는 시준렌즈의 광전달함수(optical transfer function)에 의해  $e'$ 면으로 전달되며, 광전달함수는

$$L = \exp(-ikW(\bar{X}_e')) \tag{1}$$

로 나타낼 수 있고, 여기서  $W(\bar{X}_e')$ 는 시준 렌즈의 수차이다. 따라서  $e'$ 면의 모드 분포  $\Psi_e'(\bar{X}_e')$ 은  $\Psi_e(\bar{X}_e)$ 와 광전달함수의 곱으로 나타낼 수 있다.  $\Psi_e'(\bar{X}_e')$ 은 다시 Fraunhofer 회절로  $i$ 면에  $\psi_i(\bar{X}_i)$ 으로 결상된다. 이 때 결합효율  $T$ 는 물체면의 송신 광섬유 모드가 상면의 수신 광섬유에 전달되는 효율이므로, 송신 광섬유의 모드  $\psi_s(\bar{X}_s)$ 와 수신 광섬유의 모드  $\psi_R(\bar{X}_i)$ 로부터

$$T = \left| \int \psi_i(\bar{X}_i) \psi_R(\bar{X}_i) d\bar{X}_i \right|^2 \tag{2}$$

와 같이 나타낼 수 있다.<sup>[1]</sup>

결합효율의 손실은 식 (1)과 (2)에서 수차  $W(\bar{X}_e')$ 에 의해 발생함을 알 수 있다. 따라서 높은 결합효율의 시준기를 설계하기 위해서는 수차가 작은 시준 렌즈를 설계해야 한다.

본 논문에서는 상용 광학 설계 프로그램(CODE-V)을 활용하여 식 (2)의 결합효율을 계산하였다.<sup>[6]</sup>

III. 볼 렌즈, GRIN 렌즈 및 C-렌즈 시준기의 수차 특성

비구면 렌즈 시준기를 설계하기에 앞서 볼 렌즈, GRIN 렌즈 및 C-렌즈 시준기의 수차특성을 분석해, 비구면 렌즈 시준기의 설계를 보다 효율적으로 진행하고자 하였다. 수차 특성의 분석에 사용한 볼 렌즈는 제일 높은 효율을 가진 것으로 보고된 1 mm 두께로 하였다.<sup>[2]</sup> GRIN 렌즈는 현재 광통신 시스템에서 많이 사용되고 있는 0.23 pitch GRIN 렌즈(NSG)를 사용하였으며, C-렌즈는 두께를 조절해 높은 결합효율을 가지도록 설계하였다. 그림 3은 분석에 사용된 볼 렌즈, GRIN 렌즈, C-렌즈 시준기의 개략도를 나타내며, 각 시준기의 사양은 표 1과 같다.

각 시준기 광학계의 3차 Seidel 수차계수들은 표 2와 같으며, 구면수차가 다른 수차에 비해 큰 것을 알 수 있다. 이는 시준기의 물체와 상이 되는 광섬유 모드의 크기가 단일 모드 광섬유일 경우 수  $\mu\text{m}$ 임에 비해 광학계 전체의 길이나 구경은 수 mm로서 약 1000배 이상 크므로, 주광선의 높이와 경

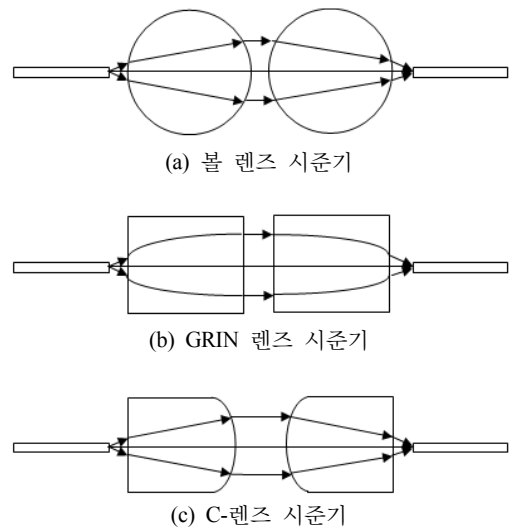


그림 3. 광통신용 시준기의 종류.

표 1. 볼 렌즈, GRIN 렌즈 및 C-렌즈 시준기의 사양

| surface number | ball lens collimator |           |          | GRIN lens collimator |           |          | C-lens collimator        |           |          |
|----------------|----------------------|-----------|----------|----------------------|-----------|----------|--------------------------|-----------|----------|
|                | curvature            | thickness | material | curvature            | thickness | material | curvature                | thickness | material |
| obj.           | -                    | 0.2493 mm | air      | inf.                 | 0.2428 mm | air      | inf.                     | 0.2784 mm | air      |
| 1              | 2 mm <sup>-1</sup>   | 1.0000 mm | BK7      | inf.                 | 4.4344 mm | SLW1550  | inf.                     | 2.5000 mm | BK7      |
| 2              | -2 mm <sup>-1</sup>  | 0.4986 mm | air      | inf.                 | 0.4856 mm | air      | -1.0273 mm <sup>-1</sup> | 0.5568 mm | air      |
| 3              | 2 mm <sup>-1</sup>   | 1.0000 mm | BK7      | inf.                 | 4.4344 mm | SLW1550  | 1.0273 mm <sup>-1</sup>  | 2.5000 mm | BK7      |
| 4              | -2 mm <sup>-1</sup>  | 0.2493 mm | air      | inf.                 | 0.2428 mm | air      | inf.                     | 0.2784 mm | air      |

표 2. 볼 렌즈, GRIN 렌즈 및 C-렌즈의 수차계수

| lens type | $W_{040}$        | $W_{131}$         | $W_{222}$        | $W_{220}$        | $W_{311}$         |
|-----------|------------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------|
| ball lens | 0.0676 $\lambda$ | 0.0004 $\lambda$  | 0.0002 $\lambda$ | 0.0001 $\lambda$ | 0.0000 $\lambda$  |
| GRIN lens | 0.0330 $\lambda$ | -0.0003 $\lambda$ | 0.0000 $\lambda$ | 0.0000 $\lambda$ | -0.0002 $\lambda$ |
| C-lens    | 2.5390 $\lambda$ | 0.0151 $\lambda$  | 0.0005 $\lambda$ | 0.0002 $\lambda$ | 0.0000 $\lambda$  |

사각이 가장자리광선에 비해 매우 작기 때문에 발생하게 된다. 이에 따라 주광선의 굴절 불변량은 가장자리 광선의 굴절 불변량에 비해 매우 작고, 주광선의 굴절 불변량에 영향을 받지 않는 구면 수차를 제외한 다른 수차들은 작은 값을 가지게 된다. 이로부터 높은 결합효율을 가지는 시준기를 설계하기 위해서는 구면 수차를 중점적으로 제거해야 함을 알 수 있다.

#### IV. 비구면 렌즈 시준기의 설계

시준 렌즈의 작동거리(working distance)와 두께의 초기값은 근축광선 추적으로 결정하였고, 두 굴절면의 형상은 동일하게 앞, 뒷면의 구분이 없도록 하여 조립이 용이하도록 하였다.

그림 4는 물체면에서 광선이 출발하여 렌즈를 거쳐 평행 광선이 출사되는 근축광선 추적을 나타낸다. 물체면과 렌즈 첫 면간의 거리인 작동거리(working distance, WD)  $d_0$ 는 근축광선 추적 식으로부터

$$d_0 = \frac{n_1 - d_1 c_1 (n_1 - 1)}{2c_1 (n_1 - 1)n_1 - d_1 c_1^2 (n_1 - 1)^2} \quad (3)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서  $c_1 = -c_2$ ,  $d_1$ 은 렌즈의 두께,  $n_1$ 은

렌즈의 굴절률(LBAL35(Ohara))이다.

렌즈의 작동거리는 GRIN 렌즈와 유사하게 0.2740 mm, 두께도 GRIN 렌즈와 유사한 4 mm로 하였으며, 곡률  $c_1$ 은 식 (3)으로부터 두 개의 해중 작은 값인 0.6152 mm<sup>-1</sup>로 결정하였다. 광학 설계 프로그램(CODE-V)에서 결합효율 식 (2)가 최대가 되도록 비구면 렌즈를 최적화 하였으며, 이때 결합효율은 -0.05822 dB이고 원추곡면계수는  $k = -0.4488$ 이다.

#### V. 비구면 렌즈 시준기의 결합효율

표 3에 비구면 렌즈 시준기와 볼 렌즈, GRIN 렌즈 및 C-렌즈 시준기의 결합효율과 Seidel 수차를 비교하였다. 다른

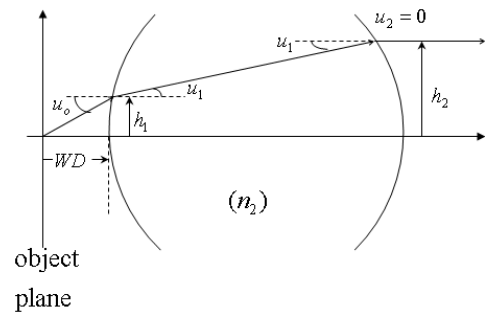


그림 4. 근축광선 추적.

표 3. 시준기의 결합효율

| type                | ball lens        | GRIN lens         | C-lens           | aspheric lens     |
|---------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| coupling efficiency | -0.1077 dB       | -0.09646 dB       | -0.3089 dB       | -0.05822 dB       |
| $W_{040}$           | 0.0676 $\lambda$ | 0.0330 $\lambda$  | 2.5390 $\lambda$ | -0.0012 $\lambda$ |
| $W_{131}$           | 0.0004 $\lambda$ | -0.0003 $\lambda$ | 0.0151 $\lambda$ | 0.0000 $\lambda$  |
| $W_{222}$           | 0.0002 $\lambda$ | 0.0000 $\lambda$  | 0.0005 $\lambda$ | 0.0001 $\lambda$  |
| $W_{220}$           | 0.0001 $\lambda$ | 0.0000 $\lambda$  | 0.0002 $\lambda$ | 0.0001 $\lambda$  |
| $W_{311}$           | 0.0000 $\lambda$ | -0.0002 $\lambda$ | 0.0000 $\lambda$ | 0.0000 $\lambda$  |

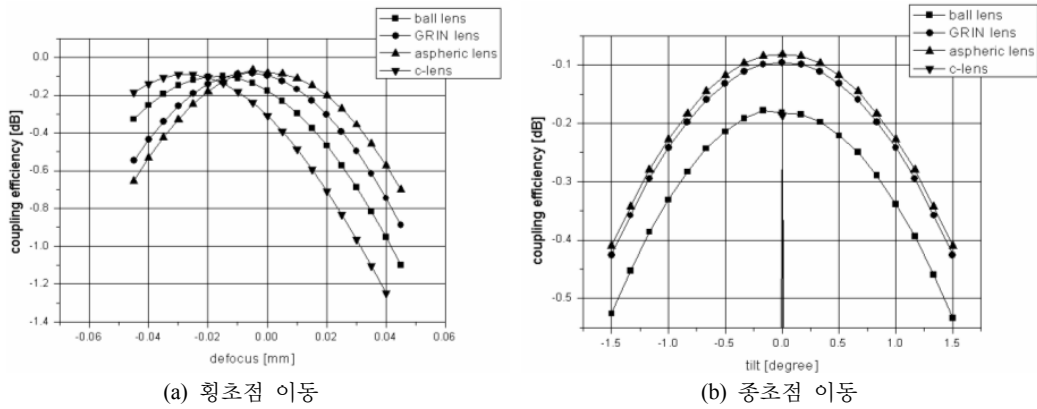


그림 5. 정렬오차의 변화에 따른 결합효율의 변화.

표 4. 정렬오차 허용 범위

| type                     | permissible range |
|--------------------------|-------------------|
| ball lens collimator     | 0.05349 mm        |
| GRIN lens collimator     | 0.05229 mm        |
| C-lens collimator        | 0.05128 mm        |
| aspheric lens collimator | 0.05499 mm        |

| type                     | permissible range    |
|--------------------------|----------------------|
| ball lens collimator     | -0.88896° ~ 0.86895° |
| GRIN lens collimator     | -1.17947° ~ 1.17947° |
| C-lens collimator        | -0.00230° ~ 0.00230° |
| aspheric lens collimator | -1.22454° ~ 1.22454° |

시준기에 비해 결합효율이 높고 비구면 렌즈 시준기의 수차가 작은 것을 알 수 있다.

시준기의 결합효율은 시준기의 제작 시 발생하는 정렬오차에 의해서도 낮아질 수 있다. 정렬오차는 종초점 이동(defocus)과 황초점 이동(tilt)을 증가시켜 결합효율을 낮춘다고 보고된 바 있다.<sup>[1]</sup> 그림 5는 각 시준기의 정렬 오차에 따른 결합효율의 변화이며, 결합효율이 -0.3 dB 보다 높기 위한 정렬오차 범위는 표 4와 같다. 그림 5와 표 4로부터 설계한 비구면 렌즈 시준기가 현재 널리 사용되고 있는 GRIN 렌즈 시준기보다 약간 넓은 정렬오차 범위를 가지고 있음을 알 수 있다. 특히 종초점 이동의 경우는 0.05499 mm로 볼렌즈와 유사하고, 황초점 이동의 경우는 ±1.22454°로 GRIN 렌즈와 유사한 정렬오차 범위를 가지고 있다.

## VI. 결 론

기존 광통신용 시준기 보다 수차가 작고 결합효율이 높은 비구면 렌즈 시준기를 설계하였다. 비구면 시준 렌즈는 GRIN 렌즈 시준기에 곧바로 적용이 가능하도록 두께와 외경이 동일하고 작동거리가 거의 같도록 설계하였다. 결합효율은 -0.05822 dB로 볼 렌즈, GRIN 렌즈 및 C-렌즈 시준기보다

높았으며, 결합효율이 -0.3 dB까지 감소하는 정렬오차 허용 범위에도 기존의 시준기보다 약간 넓었다. 따라서 본 연구의 비구면 시준 렌즈는 기존 GRIN 렌즈 시준기의 GRIN 렌즈를 대체할 수 있을 것으로 기대한다.

## 감사의 글

본 연구는 산업자원부 지역산업기술개발사업 지원으로 수행되었음.

## 참고문헌

- [1] R. E. Wagner and W. J. Tomlinson, "Coupling efficiency of optics in single-mode fiber components," *Appl. Opt.*, vol. 21, no. 15, pp. 2671-2688, 1982.
- [2] M. Ramos, I. Verrier, J. P. Goure, and P. Mottier, "Efficient ball lens coupling between a single-mode optical fiber and a silica microguide at 1.3 μm," *J. Opt. Commun*, vol. 16, no. 5, pp. 179-185, 1995.
- [3] Shifu Yuan and Nabeel A. Riza, "General foormula for coupling-loss characterization of single-mode fiber collimators by use of gradient-index rod lenses," *Appl. Opt.*, vol. 38, no. 15, pp. 3214-3222, 1999.
- [4] M. Côté and R. Shannon, "Optimization of waveguide coupling lenses with optical design software," *Appl. Opt.*, vol. 35, no. 31, pp. 6179-6185, 1996.
- [5] R. P. Ratowsky, L. Yang, R. J. Deri, K. W. Chang, J. S. Kallman, and G. Trott, "Laser diode to single-mode fiber ball lens coupling efficiency: full-wave calculation and measurements," *Appl. Opt.*, vol. 36, no. 15, pp. 3435-3438, 1997.
- [6] Optical Research Associates, *CODE-V reference manual, Ver. 9.5*, (Optical Research Associates, California, USA, 2005), pp. 19.161-19.188.

## **Design of a Rod-Type Aspheric Lens Collimator for Optical Telecommunication**

Seok Bong Kang, Eun Kyoung Kang, and Chang Kwon Hwangbo<sup>†</sup>

*Department of Physics, Inha University, Incheon 402-751, Korea*

<sup>†</sup>*E-mail: hwangbo@inha.ac.kr*

Sang Do Kang

*R&D Center of Optical Technology, AG Optics, Gwangju 506-258, Korea*

Jong Sup Kim

*Optical Components Pilot Production Center, Korea Photonics Technology Institute, Gwangju 500-460, Korea*

(Received December 26, 2007, Revised manuscript January 15, 2008)

A rod-type aspheric lens collimator for the optical telecommunication system which shows high coupling efficiency and experiences small coupling loss for misalignment errors is designed. The working distance, thickness, and diameter of the rod-type aspheric lens are determined to be close to those of the GRIN lens collimator in order to replace the GRIN lens with the rod-type aspheric lens. Since the coupling loss mainly originated from the spherical aberration of the lens, the spherical aberration in the rod-type aspheric lens is reduced drastically, and it turns out that the coupling efficiency of the rod-type aspheric lens collimator is higher than that of the available collimators, such as ball lens, GRIN lens, and C-type lens collimators.

OCIS code : 060.2340, 080.3620, 220.3620.