

블록-오목형 비구면 렌즈 설계에 관한 연구

*한민식¹, 김수용¹, 박대균¹, 박정우², 장성규³, 전인찬⁴

¹ 동아대학교 기계공학과 대학원, ² 동아대학교 기계공학과, ³ 동의과학대학 자동차과, ⁴ 동아대학교 기계공학부

The Study on the Design for Aspheric Lens of the Convex and Concave - Shaped

*M. S. Han¹, S. Y. Kim¹, D. G. Park¹, J. W. Park², S. G. Chang³, E. C. Jeon⁴

¹ Graduate School of Mech. Eng., Dong-A Univ., ² Dept. of Mech. Eng., Dong-A Univ., ³ Dept. of Automobile, Dong-eui institute of technology, ⁴ Div. of Mech. Eng., Dong-A Univ.

Key words : Aspheric Lens, Index of Refraction, Aberration, Automatic Design Program

1. 서론

정밀기계산업과 디지털 전자산업이 결합된 광학산업은 부가가치가 높은 첨단 기술 산업중 하나이다. 최근의 광학 장비들은 고 정밀화, 소형 경량화 및 고 기능화가 필수적으로 요구되고 있다. 이러한 조건을 만족하는 광학 부품 중 하나인 비구면 렌즈는 디지털 광학 기기 및 복합 OA기기 등과 같이 주변에서 흔히 볼 수 있는 제품에서부터 광 의료기기, 인공위성 카메라 및 반도체 노광기와 같은 첨단 기기에 이르기까지 다양하게 사용되고 있다.

일반적으로 많이 사용되는 구면 렌즈는 태생적으로 수차를 포함하고 있다. 이러한 수차는 렌즈를 통하여 얻어지는 결상을 불명확하게 하거나 원래의 상을 변형시킴으로써 렌즈의 광학적 특성을 저하시키는 주요 원인이 된다.

이러한 수차중 하나인 구면 수차는 초점의 크기를 크게 함으로써 렌즈의 결상 기능을 저해하는 큰 요인으로 알려져 있으며, 수차를 감소시키기 위해 다음과 같은 방법이 사용되고 있다.

- 1) 수학적 수식에서 가능한 높은 차수의 수식을 적용함으로써 수차를 감소시키는 방법¹⁾
- 2) 하나의 렌즈에 다양한 굴절률을 가지도록 새로운 재료를 사용하는 방법²⁻³⁾
- 3) 수차보정용 렌즈를 수차를 가지고 있는 렌즈와 동시에 사용함으로써 광학계의 수차를 보정하는 방법⁴⁾

그러나 이러한 방법들은 근본적으로 수차를 제거하는 것이 아니라 단순히 감소시키거나 보정하는 역할을 한다. 따라서 이러한 구면 수차를 근본적으로 제거하기 위한 방안으로 비구면 렌즈를 제시할 수 있다.

비구면 렌즈를 사용함으로써 렌즈 모듈과 동일한 효과를 얻을 수 있으며, 렌즈 두께 감소로 인한 광학 장비의 경량화 및 소형화의 효과가 얻어진다. 따라서 비구면 렌즈의 채용은 광학 장비의 소형화, 경량화 그리고 고 성능화를 위하여 필수적이다.

이러한 비구면 렌즈를 설계하는 방법으로는 수식을 사용하여 직접 곡면을 생성하는 방법과 광선 역추적방식을 이용하여 구면 수차 보정을 하는 방법 등이 사용된다⁵⁾.

따라서 본 연구에서는 비구면 렌즈를 설계하기 위하여 물질의 굴절률을 이용한 광선 추적 방식을 적용하였다. 이는 광선 역추적 방식과 달리 광원의 위치와 입사각을 고정시킬 수 있는 장점을 가진다. 또한 본 연구에서 광선 추적 방식을 적용하여 구한 수식을 이용하여 비구면 렌즈를 모델링하였다. 이 모델은 향후 비구면 렌즈의 제작 및 실험을 위한 기초 데이터가 될 것이다.

2. 광선추적방식(Ray tracing method)

기하광학에서 렌즈의 배율과 상의 위치를 작도하기 위해서 광선추적방식이 적용된다. 이는 초점거리를 알고 있는 렌즈를 이용하여 물체의 크기, 위치가 변할 때 렌즈를 통한 위치와 크기 등을 판단하는 간단한 방법이다. 본 연구에서는 기존의 광선추적 방식 중 비구면 렌즈 광축상의 초점을 통과하는 광선은 광축과

평행하게 진행한다는 규칙을 적용하여 비구면 렌즈를 설계하고자 한다.

3 비구면 렌즈의 수학적 모델링

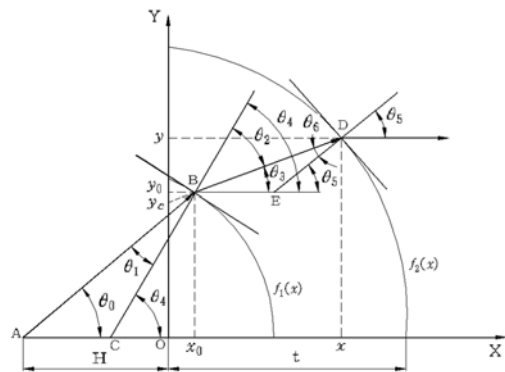


Fig. 1 Schematic diagram of geometric model for the aspheric lens

Table 1 Explanation of symbol

Y axis	비구면 렌즈의 한쪽 단면
$f_1(x)$	렌즈 안쪽 오목한 면에 대한 수식
$f_2(x)$	비구면 렌즈의 볼록한 면에 대한 수식
θ_0	레이저 시트의 최대각
θ_1	B점에서의 입사각
θ_2	B점에서의 굴절각
θ_5	D점에서의 입사각
θ_6	D점에서의 굴절각
H	비구면 렌즈 중심과 레이저 시트 발생기까지의 거리
t	비구면 렌즈 최대 두께
n_1	B점에서의 굴절률
n_2	D점에서의 굴절률(= $\frac{1}{n_1}$)

비구면 렌즈의 수학적 모델링을 위한 기본 가정 조건은 다음과 같다.

- 1) 각 레이저 광선은 레이저 시트 발생기에서 발생된 레이저(A →)가 렌즈를 통과(B → D →)한 후 X 축과 평행해야 한다.
- 2) 안쪽 단면의 식은 기지값으로 $f_1(x)$ 는 일단 $y = -ax^b + c$ 이라 가정한다.
- 3) $f_1(x)$ 를 지나는 점을 (x_0, y_0) 라 한다.

원점에서 y 절편까지 0에서 c까지 계산되어진 등분수 만큼 등분하고 이를 통해 $f_1(x)$ 는 기지값이므로 각각의 (x_0, y_0) 를 구할 수 있다.

이때 θ_0 는 각각의 (x_0, y_0) 와 $(-H, 0)$ 의 두 좌표를 통해 다음과 같이 구한다:

$$\tan \theta_0 = \frac{y_0}{H + x_0} \quad (1)$$

$$\theta_0 = \tan^{-1} \left(\frac{y_0}{H + x_0} \right) \quad (2)$$

안쪽 단면에서 각각의 (x_0, y_0) 에 대한 접선 및 법선의 기울기를 구하기 위해, $f_1(x)$ 를 미분하게 되면 접선의 기울기는 $-a \cdot b \cdot x_0$ 이다. 따라서 법선의 기울기는 $\frac{1}{a \cdot b \cdot x_0}$ 이므로 이 값을 통해 $\tan \theta_4$ 를 구할 수 있다. 또한 $\tan \theta_4$ 의 역함수로 θ_4 를 구하고 θ_1 은 Fig.1의 $\triangle ABC$ 에서 다음과 같이 구할 수 있다:

$$\theta_1 = \theta_4 - \theta_0 \quad (3)$$

B지점에서 굴절률을 이용하여 θ_2 는 다음과 같이 구한다:

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{\sin \theta_1}{n_1} \right) \quad (4)$$

Fig. 1의 점 B점의 관계에 의해 θ_3 은 다음과 같이 구할 수 있다:

$$\theta_3 = \theta_4 - \theta_2 \quad (5)$$

D지점에서 굴절률은

$$n_2 = \frac{\sin \theta_6}{\sin \theta_5} \quad (6)$$

이고, $n_1 = \frac{1}{n_2}$ 의 관계를 가지고 있다. 또한 $\triangle BDE$ 에서

$$\theta_6 = \theta_5 - \theta_3 \text{ 이므로 } \theta_5 \text{에 대해 정리하면 다음과 같다:}$$

$$\theta_5 = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \theta_3}{\cos \theta_3 - \frac{1}{n_1}} \right) \quad (7)$$

그리고 점 D와 점 B를 지나는 직선의 방정식을 구하면 직선의 기울기가 $\tan \theta_3$ 이고 (x_0, y_0) 를 지나므로

$$y - y_0 = \tan \theta_3 (x - x_0) \quad (8)$$

이다. 위의 결과에서 비구면의 좌표점은 D 점을 지나는 접선과 직선 BD를 지나는 직선(식 (8))과의 교점이다.

따라서, D점의 접선의 법선의 방정식은 (x_{old}, y_{old}) 를 지나고 $-\frac{1}{\tan \theta_5}$ 의 기울기를 가지므로 다음과 같이 새롭게 정의할 수 있다:

$$(y - y_{old}) = -\frac{1}{\tan \theta_5} (x - x_{old}) \quad (9)$$

여기서 (x_{old}, y_{old}) 는 순차적인 계산에 있어서 기지값이고, 계산순서에 따라 초기치를 $(t, 0)$ 으로 하고 그 전단계 계산에서 구한 비구면 렌즈($f_2(x)$) 좌표점 (x_{old}, y_{old}) 값으로 하면 된다. 따라서 식 (8)과 식 (9)를 연립하여 구하면 비구면의 각 위치 좌표를 다음과 같이 얻을 수 있다:

$$x = \frac{\frac{1}{\tan \theta_5} \cdot x_{old} + y_{old} + \tan \theta_3 \cdot x_0 - y_0}{\tan \theta_3 + \frac{1}{\tan \theta_5}} \quad (10)$$

$$y = \tan \theta_3 (x - x_0) + y_0 \quad (11)$$

4. 자동설계프로그램

굴절률을 이용한 광선추적방식에 의해 구해진 수식 (10)과 (11)을 이용하여 비구면 렌즈를 모델링하였다. 모델링을 위해 AutoCAD의 개발자 프로그램인 VisualLISP으로 구현하는 자동설계 프로그램을 개발하였으며, 이를 Fig. 2에 나타내었다.

Fig. 2에 나타난 비구면 렌즈 자동설계프로그램은 렌즈재료의 굴절률 n 과 최대 입사각 θ , 초점거리 H , 렌즈의 최대두께 등과 같은 변수를 입력하면 비구면 렌즈의 단면이 모델링 된다. 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 4는 Fig. 3의 결과를 3차원 모델로 생성한 것이다. 3차원 데이터는 비구면 렌즈의 가공 등에 활용된다.

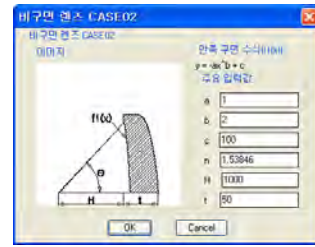


Fig. 2 Automatic design program for the aspheric Lens



Fig. 3 Geometric model for the aspheric lens



Fig. 4 Shape of 3D model for the aspheric lens

5. 결론

굴절률을 이용한 광선추적방식을 적용하여 비구면 렌즈의 수학적 모델링을 개발하고, 이를 바탕으로 비구면렌즈 자동설계 프로그램을 개발하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 광선추적방식에 굴절률을 적용함으로써 수치 해석적 방법과 달리 비구면 좌표에 대한 엄밀해를 구하였으며, 이로써 설계과정을 표준화할 수 있다.
2. 굴절률을 적용한 광선추적방식에 의해 설계시 초점거리, 입사각 등의 간단한 변수를 적용함으로써 손쉽게 비구면을 생성할 수 있다.
3. 비구면 렌즈 자동설계 프로그램을 개발함으로써 불록-오목형 비구면 렌즈의 2차원 및 3차원 형상을 쉽게 얻을 수 있다.

후기

이 논문은 2006년 정부(산업자원부)의 재원으로 한국산업기술평가단의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

1. Beamonte, J. I., "Stability of the spherical aberration up to the fifth order in cemented doublets", Journal of Optics A-pure and Applied Optics 2, pp. 161-168, 2000
2. Roman Ilinsky, "Gradient-index meniscus lens free of spherical aberration", Journal of Optics A-pure and Applied Optics 2, pp. 449-451, 2000
3. Mller, K. D., Optics, University Science Books, pp. 1-73, 434-464, 2000
4. Park K., Han C. Y., "Flow Simulation and Deformation Analysis for Injection Molded Plastic Lenses using Solid Elements", Proceeding of Korean Society of Precision Engineering, pp. 784-787, 2003
5. Kim H.S., Park K.Y., Lee W.K., Jeon J.U., "Design of Spherical Aberration Free Aspherical Lens by Use of Ray Reverse Tracing Method", Journal of Korean Society of Precision Engineering, Vol. 20, No. 10, pp. 191-198, 2003