한국공작기계학회 2005 춘계학술대회 논문집 pp.197~202

자동설계 프로그램을 이용한 비구면 렌즈의 가공 및 검증에 관한 연구

김수용*, 한민식+, 김세민+, 김태호+, 전언찬++

The Study on the Manufacturing and Inspection of Aspheric Lens using Automatic Design Program

Kim Soo Yong*, Han Min Sik+, Kim Se Min+, Kim Tea Ho+, Jeon Eon Chan++

Abstract

An aspheric lens is one of a key point optical element in the optical industry. The feature of an aspheric lens is not to have the spherical aberration. An aspheric lens is also essential element for high-precision and light-weight in the optical machine. Generally it have been used in a tailor progression an aspheric lens modelling much. In this study we applied a lay back-tracer using a index of refraction to draw a creative aspheric lens. Also we developed the automatic design program for aspheric lens. We manufactured the aspheric lens and executed a comparison experiment for refraction situation of shape and straightness experiment to inspect the drawn aspheric lens in this study.

Key Words : Automatic Design Program(자동설계프로그램), Aspheric Lens(비구면 렌즈), Manufacturing(가공), Inspection(검증), Spherical Aberration(구면 수차)

Nomenclature

Y axis	: One side surface of the aspherical lens
$F(x)$	: The equation for curvature surface of the aspherical lens
$F'(x_1)$	: The gradient of tangent line at B point $(= dy/dx)$
θ_0	: The maximum spread angle of laser seat
θ_1	: The angle of refraction at A point
θ_2	: The angle of incidence for tangent line at B point
θ_3	: The angle of refraction for tangent line at B point
$\tan\theta$	: The gradient of a straight line
H	: The distance between a laser seat generator and a center of aspherical lens
t	: The maximum width of the aspherical lens
n_1	: The index of refraction at A point
n_2	: The index of refraction at B point

1. 서 론

일반적으로 많이 사용되는 구면 렌즈는 태생적으로 수차를 포함하고 있으며, 이 수차는 렌즈를 통하여 얻어지는 결상을 불명확하게 하거나 원래의 상을 변형시킴으로써 렌즈의 광학적 특성을 저하시키게 된다. 이러한 구면수차는 초점의 크기를 크게 함으로써 렌즈의 결상 기능을 저해하는 큰 요인으로 알려지고 있으며, 수차를 감소시키기 위한 방법으로 첫째, 수학적 수식에서 가능한 높은 차수의 수식을 적용함으로써 수차를 감소시키는 방법[1] 둘째, 하나의 렌즈에 다양한 굴절률을 가지도록 새로운 재료를 사

* 발표자, 동아대학교 기계공학과 대학원 (9630208@hanmail.net)
주소: 604-714 부산시 사하구 하단2동 840 동아대학교 기계공학과 정밀가공실험실
+ 동아대 기계공학과 대학원
++ 동아대 기계공학과

용하는 방법[2),3)] 셋째, 수차보정용 렌즈를 수차를 가지고 있는 렌즈와 동시에 사용함으로써 광학계의 수차를 보정하는 방법[4)] 등이 사용되고 있다.

그러나 이러한 문제점들은 근본적으로 수차를 제거하는 것이 아니며, 보정의 어려움으로 인해 최근에는 초점 집광 성능을 향상시켜 구면 수차를 제거하고, 복잡한 렌즈 조합을 필요로 하지 않으며 높은 투과율이 얻어지는 등 많은 장점을 지닌 비구면 렌즈의 활용이 높아지고 있는 실정이다. 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 고성능화를 위하여 필수적이다.

비구면 렌즈에 대한 국내 연구는 가공 및 제작에 국한되어 있으며[5),6)], 설계에 대한 연구는 전무한 실정이다. 비구면 렌즈를 설계하는 방법으로는 수식을 사용하여 직접 곡면을 생성하는 방법과 광선 역추적 방식을 이용하여 구면 수차 보정을 하는 방법 등이 사용된다[7)]. 그러나 이러한 수식 전개 및 보정에는 많은 변수들이 작용하고, 이들 변수의 변화에 따라 비구면 렌즈의 정밀도가 크게 달라진다. 또한 비구면 렌즈의 설계는 수많은 수식이 사용되고 있으나 선진국에서의 특허 문제 등으로 인하여 많은 제약을 받고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 독창적인 비구면 렌즈를 설계하기 위하여 물질의 굴절률을 이용한 광선 추적방식을 적용하였다. 이는 광선 역추적방식과 달리 광원의 위치와 입사각을 고정시킬 수 있는 장점을 가진다. 그리고 본 연구에서 설계한 비구면 렌즈를 검증하기 위하여 고속 가공기를 이용해 아크릴 재질의 실제 대구경 비구면 단렌즈(직경 300 mm)를 제작하고자 한다. 또한 레이저 시트 발생기에서 생성된 레이저 광원을 비구면 렌즈 광학계에 통과시키고 이 광원의 직진성 실험을 통해 비구면 렌즈의 수식 전개, 설계 및 가공의 정확성을 검증하고자 한다.

2. 비구면렌즈 설계

2.1 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 방법으로서 다음과 같은 간단한 규칙을 가진다.

1) 물체를 출발하여 렌즈에 평행하게 입사하는 광선은 렌즈 반대쪽 초점(Focal point)을 지난다.

2) 물체를 출발하여 렌즈 입사쪽 초점을 지나는 광선은 렌즈를 통과한 후 광축(Optical axial)과 평행하게 진행한다.

3) 물체를 출발하여 렌즈의 중심을 지나는 광선 은 굴절하지 않고, 직진한다.

본 연구에서는 기존의 광선추적방식 중 비구면 렌즈 광축(Optical axial)상의 초점을 통과하는 광선은 광축과 평행하게 진행한다는 규칙을 적용하여 비구면 렌즈를 설계하고자 한다.

Fig. 1에서 Y축은 축대칭 렌즈의 한 면이고, θ_0 는 레이저 시트의 최대각이다. 또한, H는 레이저 시트 발진부와 렌즈 중심까지의 거리를 나타내며, 이를 초점거리라 한다. 광선 추적방식에 의해 광축상의 레이저 시트 발생기(generator)에서 생성된 레이저가 렌즈를 통과한 후 축과 평행하게 된다.

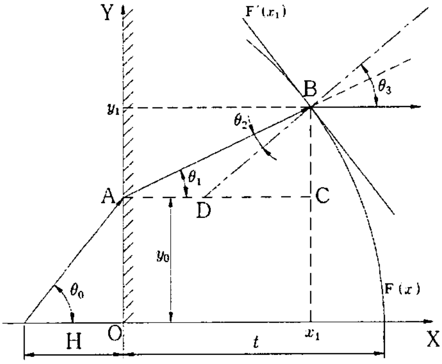


Fig. 1 Schematic diagram of geometric model for the aspherical lens

Fig. 1의 점 B를 통과하는 접선의 방정식F'(x_1)을 구하기 위하여, 먼저 θ_1, θ_2, θ_3를 구해야 한다. A점에서의 굴절률 n_1에 스넬의 법칙을 적용하면

$$n_1 = \frac{\sin\theta_0}{\sin\theta_1} \qquad 1)$$

이다.

(공기와 아크릴의 굴절률 은 1/0.65 이므로 기지값이다.)

여기서, θ_0는 처음 조건에서 주어지는 기지값이므로 θ_1은 다음과 같다:

$$\theta_1 = \sin^{-1}\left(\frac{\sin\theta_0}{n_1}\right) \qquad 2)$$

점 A와 B에서의 굴절률은 다음과 같은 관계를 가지고 있다:

$$n_1 = \frac{1}{n_2} \qquad 3)$$

그리고 점 B에서의 굴절률 n_2는 다음과 같이 정의된다:

$$n_2 = \frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_3} \qquad 4)$$

또한, θ_3는 동위각으로 $\angle BDC$와 같고 $\triangle ABD$에 삼각함수의 덧셈공식을 이용하여 정리하면 다음과 같다:

$$\frac{1}{n_2} = \frac{\sin\theta_1}{\tan\theta_2} + \cos\theta_1 \qquad 5)$$

식 3)을 식 5)에 대입하면

$$n_1 = \frac{\sin\theta_1}{\tan\theta_2} + \cos\theta_1 \qquad 6)$$

이고, 식 6)에서 θ_2에 대해 정리하면 다음과 같다:

$$\theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{\sin\theta_1}{n_1 - \cos\theta_1}\right) \qquad 7)$$

여기서 θ_3는 식 2)와 식 7)을 이용하여

$$\theta_3 = \theta_1 + \theta_2 \qquad 8)$$

과 같이 구할 수 있다. 점 B를 지나는 접선의 방정식은 다음과 같다:

$$y = -\frac{1}{\tan\theta_3}x + C \qquad 9)$$

그리고 점 A와 B를 지나는 직선의 방정식을 구하면 다음과 같다. 이때, 직선의 기울기가 $\tan\theta_1$이고, y절편이 y_0이므로

$$y = \tan\theta_1 \cdot x + y_0 \qquad 10)$$

이다. 위의 결과에서 비구면의 좌표점은 B점을 지나는 접선(식 9))과 직선 $\overline{AB}$ 를 지나는 직선(식10))과의 교점이다.

그런데, 식 9)의 상수계수를 구할 필요가 있다. 즉, 연속성을 고려하여 θ_0를 분할하고 우선 $(t, 0)$의 초기조건을 사용하여 좌표값을 구한 후 순차적으로 그 결과로부터 비구면 좌표점을 구한다.

따라서, 식 10)의 접선의 방정식은 (x_{old}, y_{old})를 지나고, $-\frac{1}{\tan\theta_3}$의 기울기를 가지므로 다음과 같이 새롭게 정의할 수 있다:

$$(y - y_{old}) = -\frac{1}{\tan\theta_3}(x - x_{old}) \qquad 11)$$

여기서 (x_{old}, y_{old})는 순차적인 계산에 있어서 기지값이고, 계산순서에 따라 초기치를 $(t, 0)$로 한다. 따라서 식 10)과 식 11)을 연립하여 구하면 비구면의 각 위치 좌표를 다음과 같이 얻을 수 있다:

$$x = \frac{\frac{1}{\tan\theta_3}x_{old} + y_{old} - y_0}{\tan\theta_1 + \frac{1}{\tan\theta_3}} \qquad 12)$$

$$y = \tan\theta_1 \cdot x + y_0 \qquad 13)$$

2.2 비구면렌즈 자동설계 프로그램

굴절률을 이용한 광선추적방식에 의해 구해진 수식 12)와 13)을 이용하여 비구면 렌즈 모델링을 AutoCAD의 개발자 프로그램인 VisualLISP으로 구현하는 자동설계 프로그램을 개발하였으며, 이를 Fig. 2에 나타내었다.

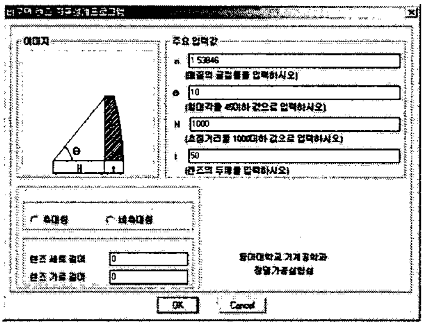
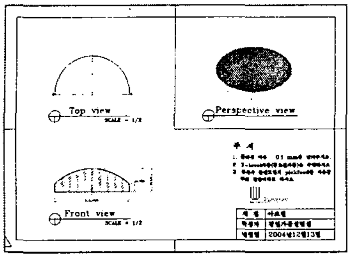
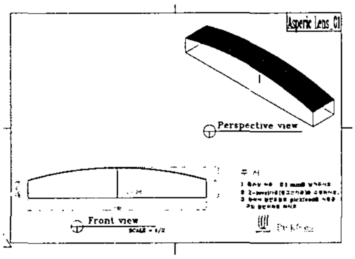


Fig. 2 Automatic design program for the aspherical Lens

Fig. 2에 나타난 비구면 렌즈 자동설계프로그램은 렌즈재료의 굴절률 n과 최대 입사각 Θ, 초점거리 H, 렌즈의 최대 두께를 입력하면 본 연구에서 제안한 굴절률을 이용한 광선추적방식을 적용하여 축대칭 비구면렌즈와 비축대칭 비구면렌즈의 3차원 모델을 생성한다. 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다.



a) axisymmetric aspherical lens



b) Large-Caliber aspherical lens

Fig. 3 Drafting of geometric model for the aspherical lens

3. 비구면 렌즈 가공

3.1 CAM 및 모의가공

수학적 모델링을 통해 얻어진 점 데이터들을 이용한 비구면 렌즈를 검증하기 위하여 본 연구에서는 강화아크릴을 사용하여 비구면 렌즈를 직접 제작하였다.

직접 제작에 앞서 가공상의 문제점 및 가공 경로등을 확인하고자 CAM software를 이용하여 모의 가공을 실시하였다. 이때 CAM software와 호환이 가능한 파일을 생성하기 위해 AutoCAD에서 dxf 코드로 저장된 파일을 사용하여 형상을 확인하고 적절한 가공 공정을 도입하고 공구를 선정하여 모의 실험을 행하였다.

정확한 형상을 얻기 위해 먼저 전체 외곽 프로파일 가공을 하고 밀링 커터를 이용한 평면 절삭을 통해 비구면 렌즈의 두께를 맞추었다.

Fig. 4와 Fig. 5에 CAM software에서의 가공공정과 모의 가공을 나타내었다.

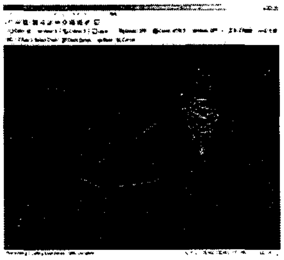


Fig. 4 Process of machining using a CAM software

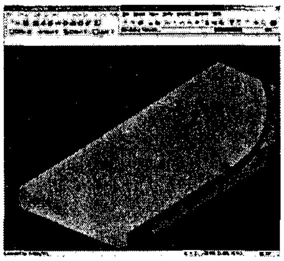


Fig. 5 Test machining using a CAM software

3.2 가공 장비 및 조건

Fig. 6에 비구면 렌즈 가공에 사용된 고속가공기를 나타내었다. 이 장비는 독일산(DECKEL MAHO)으로 30,000 rpm 까지 가능하다. 그리고 공구의 탈 · 부착시 열박음함으로써 진동을 최소화시킨다.

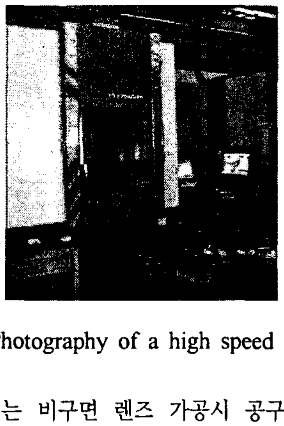


Fig. 6 Photography of a high speed machine

본 연구에서는 비구면 렌즈 가공시 공구 회전 속도를 20,000 rpm으로 가공하였으며, 폴리싱 여유를 0.025 mm로 하였다. 황삭시 HSS ф3 End-mill을 사용하였고, 정삭시 ф 1 End-mill을 사용하였다. 또한 비구면 렌즈의 두께를 맞추기 위해 밀링 커터를 이용하여 평면 절삭을 행하였다. 그리

고 절삭유는 사용하지 않고, 고압의 공기를 이용하여 칩 제거 및 냉각을 수행하였다.

3.3 가공결과

가공을 위해 고속 가공기에 가공 데이터를 (x, y)의 좌표 데이터로 입력하게 된다. 따라서 점데이터의 입력에 의한 스텝가공으로 인해 비구면 표면에 미세한 각짐이 발견되었다. 이러한 각짐을 없애기 위하여 폴리싱 과정을 거쳐 스텝 가공에 의한 미세한 각짐 현상이 없는 깨끗한 표면을 얻을 수 있었다.

가공 후 폴리싱한 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

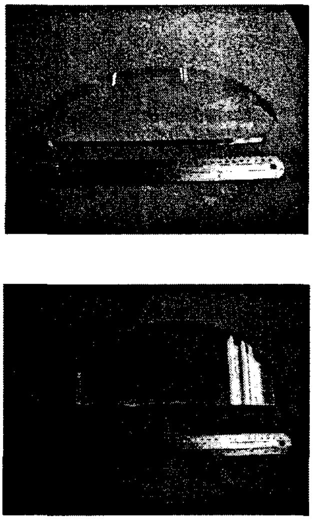


Fig. 7 Photography of the aspherical lens

4. 비구면 렌즈 실험 및 검증

4.1 실험장치 및 실험방법

레이저 광선은 위상이 고른 단색광이며 코히런트 성이 좋기 때문에 비구면 렌즈를 통한 광원의 직진성을 확인하는데 가장 적합한 광원으로 판단된다. 따라서 비구면 렌즈 모델링의 정확성을 실험하기 위하여 본 연구에서는 레이저 시트 발생기(generator)에서 생성된 레이저를 비구면 렌즈에 통과시킨 후 렌즈로부터 1 m 떨어진 지점과 5 m 떨어진 지점의 광선 폭을 측정하였다. 그리고 광선의 직진성과 폭 확인 및 사진 촬영을 위하여 암실조건 및 연무 발생기를 사용하였다.

Fig. 8에서는 본 실험에 사용되어진 레이저 시트 발생기 및 광 케이블, 레이저 등을 나타내었다.

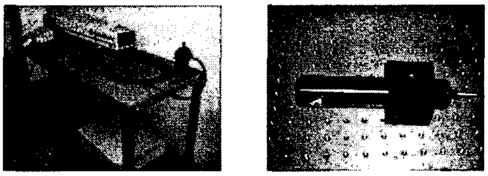
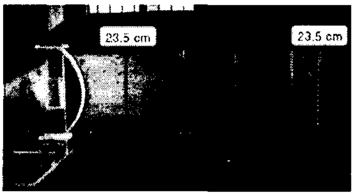


Fig. 8 Photography of an experiment apparatus

4.2 실험결과

비구면 렌즈 모델링의 정확성 실험 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 연무를 통과하는 레이저 광선 폭의 선명성을 확인할 수 있으며, b)에서 보는 바와 같이 레이저 발생기에서 퍼지는 광선이 비구면 렌즈를 통과하면서 직진하는 것을 시각적으로 확인할 수 있다.

a)



b)

Fig. 9 Photography of an experiment result for the aspherical lens

Table 1에 본 실험의 결과를 나타내었다. 비구면 렌즈로부터 1 m 떨어진 지점과 5 m 떨어진 지점의 광선폭이 각각 평균적으로 23.508 cm와 23.506 cm로 빛이 직진함을 알 수 있었다. 여기서 나타나는 미세한 차이는 가공상의 문제로 생각되어질 수 있으나 여기서 나타나는 대부분의 오차는 측정 오차로 판단되어진다.

따라서 본 연구를 통해 수학적으로 모델링한 비구면 렌즈

는 레이저 시트 발생기로부터 1 m 떨어진 지점과 5 m 떨어진 지점의 광선폭이 23.5 cm로 일치하고 빛이 직진함을 알 수 있다.

위의 결과로 수학적 모델링, 가공 방법 및 폴리싱 과정 모두 적절했다고 판단된다.

Table 1 Experiment results

	1m(cm)	5m(cm)
First time	23.52	23.53
Second time	23.51	23.51
Third time	23.50	23.52
Fourth time	23.53	23.50
Fifth time	23.49	23.51
Sixth time	23.51	23.50
Seventh time	23.49	23.48
Eighth time	23.50	23.50
Nineth time	23.51	23.50
Tenth time	23.52	23.51
The mean distance	23.508	23.506

5. 결 론

굴절률을 이용한 광선추적방식을 적용하여 비구면 렌즈의 수학적 모델링을 개발하고, 이를 바탕으로 비축대칭 비구면 렌즈를 가공하였다. 또한 이를 검증하기 위해 직진성 실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 광선추적방식에 굴절률을 적용함으로써 수치 해석적 방법과 달리 비구면 좌표에 대한 엄밀해를 구하였으며, 이로써 설계과정을 표준화 할 수 있다.

2. 고속가공을 통한 비구면 렌즈 가공기술의 가능성을 확인하였다.

3. 직진성 실험 장치를 고안하였고, 이를 통해 광선 폭이 23.5 cm로 일정하게 직진함을 확인하였다.

4. 비구면 렌즈의 설계, 가공 및 측정을 통해 본 연구에서 개발한 비구면 렌즈 수식의 정확성을 검증하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(신소형재가공청정공정개발연구센터) 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

(1) Beamonte, J. I., 2000, "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.

(2) Roman Ilinsky, 2000, "Gradient-index meniscus lens free of spherical aberration", Journal of Optics A-pure and Applied Optics 2, pp. 449-451.

(3) Möller, K. D., 2000, Optics, University Science Books, pp. 1-73, 434-464.

(4) K. Park, C. Y. Han, 2003, "Flow Simulation and Deformation Analysis for Injection Molded Plastic Lenses using Solid Elements", Proceeding of Korean Society of Precision Engineering, pp. 784-787.

(5) W. B. Kim, S. J. Lee, Y. J. Kim, E. S. Lee, 2002, "Ultra-precision Polishing Technique for Micro 3-Dimensional Structures using ER Fluids", Journal of Korean Society of Precision Engineering, Vol. 19, No. 12, pp. 134-141.

(6) Jesus Atencia and Manuel Quintanilla, 2001, "Ray tracing for holographic optical element recording with non-spherical waves", Journal of Optics A-pure and Applied Optics 2, pp. 387-397.

(7) H.S. Kim, K.Y. Park, W.K. Lee, J.U. Jeon, 2003, "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.