

## 비구면렌즈 가공 및 검증에 관한 연구

한민식\*, 김세민, 박재덕(동아대학교 대학원 기계공학과),  
김순경(동의과학대학 자동차과), 전연찬(동아대학교 기계공학부)

### A Study on the Manufacturing and Verification for the Aspherical Lens

M. S. Han, S. M. Kim, J. D. Park(Mech. Eng. Dept., DAU), S. K. Kim(Automobile Eng., DIT),  
E. C. Jeon(Mech. Eng., DAU)

#### ABSTRACT

In this paper, we designed the aspheric lens by mathematical methods which are solved by refractive index. Based on these mathematical method, we manufactured the aspheric lens. Because of the usefulness of manufacturing, we used the acryl as the material. And we used a high speed machine to manufacture the aspheric lens. Also it sits in judgment the aberration of spherical distribution by using the grid fringe. A source of laser produced by laser sheet generator passed the optical system of the aspheric lens. Though a character is to verify that the accuracy of the aspheric lens by experiment of the straight character.

**Key Words** : Aspheric Lens(비구면 렌즈), Manufacturing(가공), verification(검증)

#### Nomenclature

Y axis	: One side surface of the aspherical lens
F(O)	: The equation for curvature surface of the aspherical lens
F'(x <sub>1</sub> )	: The gradient of tangent line at B point (= d.y/ d.x)
$\theta_0$	: The maximum spread angle of laser seat
$\theta_1$	: The angle of refraction at A point
$\theta_2$	: The angle of incidence for tangent line at B point
$\theta_3$	: 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
l	: The maximum width of the aspherical lens
n <sub>1</sub>	: The index of refraction at A point
n <sub>2</sub>	: The index of refraction at B point

#### 1. 서론

광학산업은 정밀기계산업 및 디지털 전자산업과 결합된 부가가치가 매우 높은 첨단 기술 산업이다. 광학부품중 하나인 비구면 렌즈는 광학 장비의

성능에 중요한 영향을 미치는 핵심 기술이며, 디지털 광학기기 및 복합 OA기기 등과 같이 주변에서 흔히 볼 수 있는 제품에서부터 광 의료기기, 인공위성 카메라 및 반도체 노광기와 같은 첨단 기기에 이르기까지 다양하게 사용되어진다.

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 알려져 있으며, 수차를 감소시키기 위한 방법으로 첫째, 수학적 수식에서 가능한 높은 차수의 수식을 적용함으로써 수차를 감소시키는 방법<sup>1)</sup>, 둘째, 하나의 렌즈에 다양한 굴절률을 가지도록 새로운 재료를 사용하는 방법<sup>2)3)</sup>, 셋째, 수차보정용 렌즈를 수차를 가지고 있는 렌즈와 동시에 사용함으로써 광학계의 수차를 보정하는 방법<sup>3)</sup> 등이 사용되고 있다.

그러나 이러한 문제점들은 근본적으로 수차를 제거하는 것이 아니며, 보정의 어려움으로 인해 최근에는 초점 집광 성능을 향상시키 구면 수차를 제거



△또한,  $\theta_3$ 는 동위각으로  $\angle BDC$ 와 같고  $\triangle ABD$ 에 삼각함수의 덧셈공식을 이용하여 정리하면 다음과 같다:

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

식 3)을 식 5)에 대입하면

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

이고, 식 9)에서  $\theta_2$ 에 대해 정리하면 다음과 같다:

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

여기서  $\theta_3$ 는 식 2)와 식 7)을 이용하여

$$\theta_3 = \theta_1 + \theta_2 \quad (8)$$

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

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

그리고 점 A와 B를 지나는 직선의 방정식을 구하면 다음과 같다. 이때, 직선의 기울기가  $\tan\theta_1$ 이고, y절편이  $m_0$ 이므로

$$y = \tan\theta_1 \cdot x + m_0 \quad (10)$$

이다. 위의 결과에서 비구면의 좌표점은 B점을 지나는 접선(식 9)과 직선  $\overline{AB}$ 를 지나는 직선(식 10)과의 교점이다.

그런데, 식 9)의 상수계수를 구할 필요가 있다. 즉, 연속성을 고려하여  $\theta_0$ 를 분할하고 우선  $(t, 0)$ 의 초기조건을 사용하여 좌표값을 구할 수 순차적으로 그 결과로부터 비구면 좌표점을 구한다.

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

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

여기서  $(x_{abd}, y_{abd})$ 는 순차적인 계산에 있어서 기직값이고, 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:

$$x = \frac{\frac{1}{\tan\theta_3}x_{abd} + y_{abd} - m_0}{\tan\theta_1 + \frac{1}{\tan\theta_3}} \quad (12)$$

$$y = \tan\theta_1 \cdot x + m_0 \quad (13)$$

### 2.3 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.

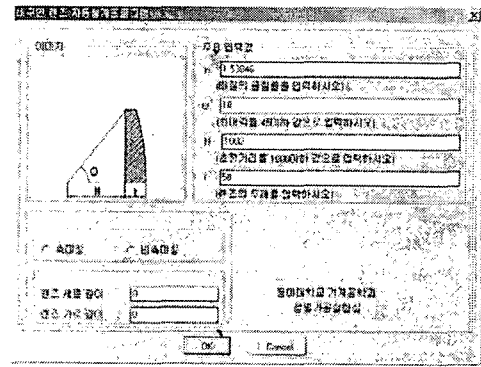
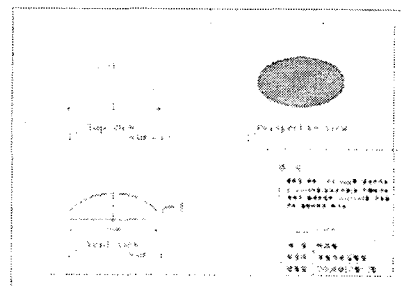
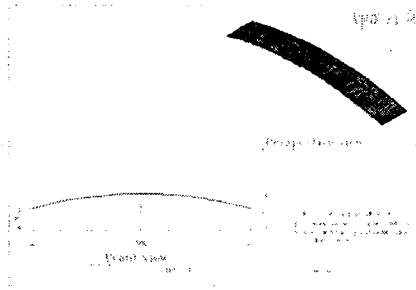


Fig. 2 Automatic design program for the aspherical Lens

Fig. 2에 나타난 비구면 렌즈 자동설계프로그램은 렌즈재료의 굴절률 n과 최대 입사각  $\theta$ , 초점거리 H, 렌즈의 최대두께를 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 데이터를 이용한 비구면 렌즈를 검증하기 위하여 본 연구에서는 강화아크릴을 사용하여 비구면 렌즈를 직접 제작하였다.

직접 제작에 앞서 가공상의 문제점 및 가공 경로 등을 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 모의가공을 나타내었다.

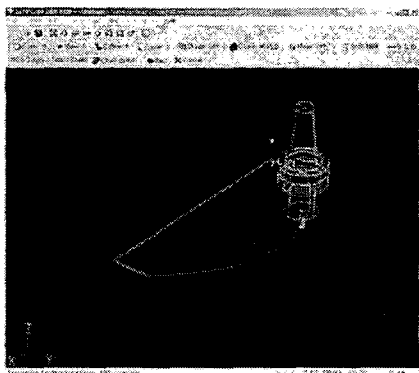


Fig. 4 Process of machining using a CAM software

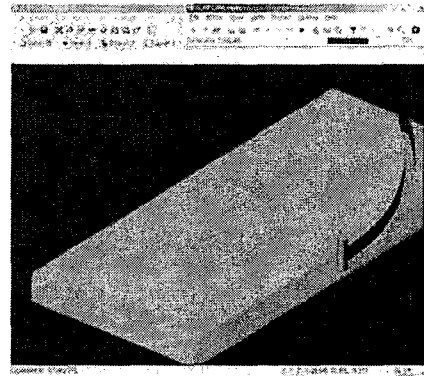


Fig. 5 Test machining using a CAM software

#### 3.2 가공 장비 및 조건

Fig. 6에 비구면 렌즈 가공에 사용된 고속가공기를 나타내었다. 이 장비는 독일산(DECKEL MAHO)으로 30,000 rpm까지 가능하다. 그리고 공구의 탈부착시 열박음함으로써 진동을 최소화시킨다.

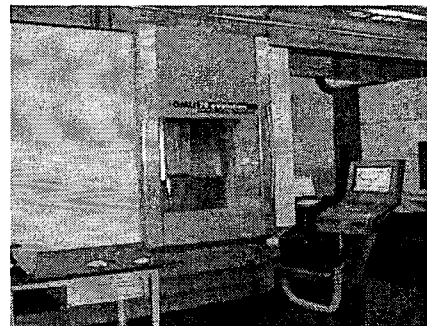


Fig. 6 Photography of a high speed machine

본 연구에서는 비구면 렌즈 가공시 공구 회전 속도를 20,000 rpm으로 가공하였으며, 폴리싱 여유를 0.025 mm로 하였다. 황삭시 HSS  $\phi 3$  End-mill을 사용하였고, 정삭시  $\phi 1$  End-mill을 사용하였다. 또한 비구면 렌즈의 두께를 맞추기 위해 밀링 커터를 이용하여 평면 절삭을 행하였다. 그리고 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 점 데이터의 입력에 의한 스텝가공으로 인해 비구면 표면에 미세한 각짐이 발견되었다. 이러한 각짐을 없

예기 위하여 폴리싱 과정을 거쳐 스텝 가공에 의한 미세한 각질 현상이 없는 깨끗한 표면을 얻을 수 있었다.

가공 후 폴리싱한 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

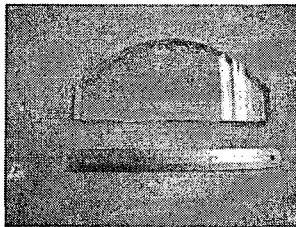
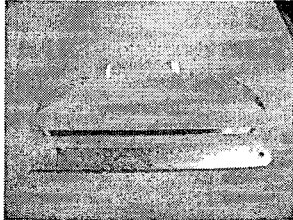


Fig. 7 Photography of the aspherical lens

#### 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 인무 발생기를 사용하였다.

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

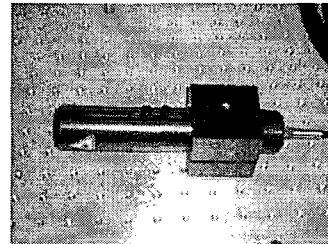
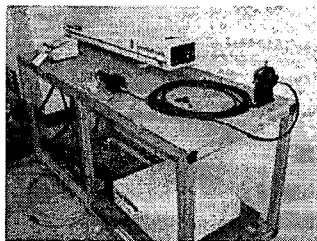


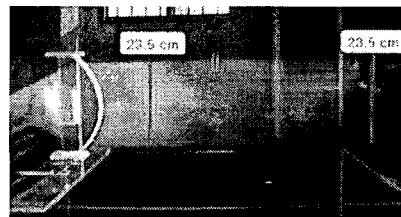
Fig. 8 Photography of an experiment apparatus

##### 4.2 실험결과

비구면 렌즈 모델링의 정확성 실험 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 인무를 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 비

구면 렌즈는 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 직진했다고 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
Ninth time	23.51	23.50
Tenth time	23.52	23.51
The mean distance	23.508	23.506

## 5. 결론

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

1. 광선추적방식에 굴절률을 적용함으로써 수치 해석적 방법과 달리 비구면 좌표에 대한 일일 해를 구하였으며, 이로써 설계과정을 표준화할 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.

## 후기

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(진소형 제가공정정공정개발연구센터) 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Beamonte, J. L., "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 öller, K. D., *Optics*, University Science Books, pp. 1-73, 434-464, 2000.
3. K. Park, C. Y. Han, "Flow Simulation and Deformation Analysis for Injection Molded Plastic Lenses using Solid Elements", *Proceeding of Korean Society of Precision Engineering*, pp. 784-787, 2003.
4. W. B. Kim, S. J. Lee, Y. J. Kim, E. S. Lee, "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, 2002.
5. Jesus Atencia and Manuel Quintanilla, "Ray tracing for holographic optical element recording with non-spherical waves", *Journal of Optics A-pure and Applied Optics* 2, pp. 387-397, 2001.
6. H.S. Kim, K.Y. Park, W.K. Lee, J.U. Jeon, "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.