

초정밀 비구면 렌즈 금형가공시스템 개발

백승엽[†] · 이하성 · 강동명

유한대학 금형설계과

(2007. 11. 28. 접수 / 2008. 1. 30. 채택)

Development of machining system for ultra-precision aspheric lens mold

Seung-Yub Baek[†] · Ha-Sung Lee · Dong-Myeong Kang

Department of Tool & Mold Design, Yuhan College

(Received November 28, 2007 / Accepted January 30, 2008)

Abstract : As consumer in optics, electronics, aerospace and electronics industry grow, the demand for ultra precision aspherical surface lens increases higher. Precision turning with single-diamond tools has a long history of development for fabrication of optical quality surfaces since the advent of aerostatic rotary spindles and precise linear motion guide ways. To enhance the precision and productivity of ultra precision aspherical surface micro lens, the following specification of ultra precision grinding system is required: the highest rotational speed of the grinder is 100,000rpm and its turning accuracy is $0.1\mu\text{m}$, positioning accuracy is $0.1\mu\text{m}$.

The development process of the grinding system for the ultra precision aspherical surface micro lens for optoelectronics industry is introduced. In the work reported in this paper, an intelligent grinding system for ultra precision aspherical surface machining was designed by considering the factors affecting the surface roughness and profiles accuracy.

An aerostatic form was adopted to build the spindle of the workpiece and the spindle of grinder and ultra precision LM guide way was adopted in this system.

And this paper deals with mirror grinding of an aspheric surface micro lens by resin bonded diamond wheel and spherical lens of BK7. It results was that a form accuracy of $0.6\mu\text{m}$ P-V and a surface roughness of $0.006\mu\text{m}$ Rmax.

Key Words : Aspheric lens, Surface roughness, Profile accuracy, Turing accuracy, Positioning accuracy

1. 서 론

비구면의 반사경이나 렌즈는 광학적인 수차를 보정 할 수 있기 때문에 최근 그 사용이 비약적으로 늘어나고 있다. 또한 렌즈의 매수를 줄여 경박 단순한 제품 제작이 가능하기 때문에 광학, 정보 기기 디바이스에 탑재되고 있는 여러 종류의 광학렌즈에는 비구면 형상화 및 고정도화가 행해지고 있다.^(1,2) 구면 렌즈는 원리적으로 수차를 포함하고 있으며 이것을 제거하기 위하여 렌즈의 조합수를 늘리고 다층막 코팅 등을 통하여 성능 향상을 실현시켜 왔다. 그러나 비구면 렌즈 광학계는 초점 집광 성능을 향상시켜 구면 수차를 제거하고 복잡한 렌즈조합을 필요로 하지 않으며 높은 투과율이 얻어지는 등 많은 장점이 있다. 현재 비구면 렌즈를 양산하는 방법

은 여러 가지로 개발이 되어있으나, 초경, 고정도강, 무전해 니켈강 등을 재료로 하여 금형을 제작하고 렌즈를 성형하는 사출성형법과 내열성을 갖는 세라믹스 또는 초경 금형에 렌즈 소재를 연화 온도까지 가열한 후 프레스 성형하는 방법 그리고 플라스틱, 유리 렌즈 등을 절삭과 연삭을 통하여 직접 가공하는 방법 등이 알려져 있다. 저가인 플라스틱렌즈의 경우 렌즈 성형부 코어를 초정밀하게 가공하여 사출성형 금형에 조립 후 정밀 사출기에서 사출하는 방법이 있다. 그러나 플라스틱 재질 특성상 고온이 발생하는 고정밀 렌즈나 고신뢰도를 요구하는 제품에는 적용에 제약이 따른다. 이러한 문제점을 해결 할 수 있는 유리렌즈의 경우 고가의 성형 금형을 제작하여야 하며 또한 고가의 고온 성형기를 이용하여 렌즈를 성형해야한다. 대표적인 유리성형기인

glass molding press는 유리렌즈를 가공하는데 소요되는 시간이 약 20분정도이다. 그리고 약 800℃의 고온에서 금형에 의해 유리렌즈를 성형하기 때문에 금형의 수명이 문제가 되며 성형용 유리재질이 몇 가지로 한정되어 광학계 설계에 제약이 따르는 단점이 있다. 고정밀급의 비구면 형상 렌즈를 가공하는 경우 구면렌즈와는 다르게 공구를 비구면 궤적에 따라 운동시켜 가공할 수 있는 CNC 비구면 연삭기가 필요하며, 요구되는 렌즈의 정밀도에 따라서 가공기가 초정밀화 되어야만 표면 형상 및 거칠기를 개선시킬 수 있다.^(3,4) 비구면 렌즈를 가공 한 후 폴리싱 공정을 통해서 높은 정밀도의 제품을 얻을 수 있고 가공물과 연마 공구의 동시 회전을 통해서 폴리싱 공정이 이루어지는 연구가 진행되고 있다.^(5,6,7) 따라서 본 연구에서는 초정밀 비구면 렌즈를 얻기 위해서 비구면 렌즈에 관한 전반적인 메커니즘을 언급하고 각각의 구성요소 기술을 고려하여 초정밀 비구면 렌즈 금형가공시스템을 개발하였다.

2. 초정밀 비구면 렌즈 금형가공

2.1 비구면 렌즈

비구면 렌즈의 설계는 렌즈의 각 반경 위치에 따라서 렌즈의 굴절율과 입사각을 고려하여 최소자승법에 의하여 비구면 다항식으로 근사하는 것이다. 일반적으로 사용되고 있는 회전 대칭의 비구면 렌즈의 표면 형상은 다음과 같다.

$$Z(X) = \frac{C \cdot X^2}{1 + \sqrt{1 - (k+1) C^2 \cdot X^2}} + \sum_{i=1}^m C_i \cdot X^i \quad (1)$$

Z축은 회전의 중심축으로서 비구면 축방향의 위치이고 X는 비구면 축으로부터의 수평방향 거리이다. 첫 번째 항은 구면 항이고 두 번째 항은 구면 항에 대한 수정량 즉, 비구면 항에 해당된다. 여기서 k는 원추상수(conic constant)로서 원추면에 따라서 달라지고, C는 비구면의 곡률 기준 반경을 나타내는 계수이다. C_i는 구면을 포함한 단순 원추면을 비구면으로 수정하는 비구면 계수이다.

2.2 비구면 렌즈 가공 메커니즘

비구면 렌즈의 가공 프로세스는 공구 좌표 생성, 비구면 가공, 보정 후 가공, 비구면 형상 측정 등으로 나뉠 수 있다. 먼저 비구면 렌즈 형상의 좌표를 식(1)에 의해서 구하고 스톨의 곡률 반경에 따른 공구 경로를 구한다. 구해진 공구 경로를 NC 데이터로 변환을 해서 CNC 컨트롤러에 전송을 한다. 비구면 렌즈 가공기는 CNC 제어로 연삭 가공을 수행하고 가공된 비구면 렌즈는 형상 측정을 통해서 데이터를 보정하여 수차례 가공을 한 후 형상 정밀도 및 표면 거칠기를 측정한다. Fig. 1은 비구면 렌즈의 초정밀 연삭 가공 공정 개략도이다.

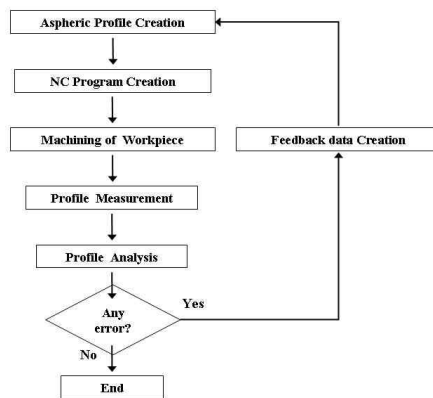


Fig. 1 Grinding process of aspheric lens

Table 1 Specification of grinding system

Unit		Specification
Workpiece	Size	φ5 m m Convex
	Material	Optical glass
Travel	Position Accuracy	0.1μm
	Straightness	0.1μm/40mm
	Stiffness(H/V)	200/400N/μm
Work Spindle	Rotational Error	0.1μm
	Rotational Speed	~ 1,500rpm
	Stiffness(R/Axial)	30/100N/μm
Wheel Spindle	Rotational Speed	100,000rpm

3. 초정밀 비구면 렌즈 금형가공시스템

3.1 초정밀가공시스템 요구 사양

구면렌즈는 총형 연삭으로 근사 형상을 만든 후 폴리싱 공정을 거쳐 가공하지만, 비구면 렌즈는 초정밀 비구면 연삭기로 비구면의 근사형상과 최종형상을 만들므로 매우 높은 수준의 주축정밀도와 안정성이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 광학 유리를 이용하여 ϕ 5mm인 마이크로 비구면 렌즈 금형 가공시스템을 개발하였다. 직진운동을 위한 안내면은 회전운동을 위한 주축과 함께 연삭 시스템의 운동정도를 좌우하는 중요한 기계요소로서 불연속한 작동이 없어야 하고 직진정도 및 진동이 없어야 정밀한 제어가 가능하다. Table 1은 본 연구에서 개발하기 위한 지능형 연삭 시스템의 설계 사양을 보여 주고 있다.

3.2 초정밀 비구면 가공시스템 layout

비구면 인라인 시스템 시스템은 크게 연삭 시스템, 연마 시스템으로 이루어져 있다.

각각의 시스템은 공기 정압 베어링 스피들로 구성되었고, 이송 안내면은 리니어 모터와 크로스 롤러 베어링을 채택하여 설계가 되었다. 시스템의 기본적인 메커니즘은 먼저 연삭 시스템에서 황삭 가공과 정삭 가공으로 나뉘어서 가공을 하게 된다. 황삭 가공에서 형상 정밀도를 약 2~3 μ m 이하로 가공을 한 후 정삭 가공으로 이동을 하여 형상가공을 수행하고 최종적으로 경면의 비구면 렌즈를 얻는다. 연삭 가공에서 원하는 비구면 형상 정밀도를 얻으면, 비구면 렌즈의 표면 거칠기를 향상시키기 위해서 비구면 연마 시스템으로 렌즈가 이동을 해서 연마 가공이 수행되어진다. Fig. 2는 비구면 렌즈 금형을 가공하기 위한 인라인시스템(in-line system)을 보여주고 있다.

3.3 초정밀 비구면 가공시스템에 대한 유한요소해석

비구면 렌즈 금형가공 시스템은 X-1 하부(1,2), X-1 상부(1,2), Y-1 하부(1,2), Y-1 상부(1,2), Y-table(1,2) 등으로 이루어져 있다. SOLID45 요소를 사용하여 Fig. 3(a)와 같이

유한요소 모델을 생성하였다. 79,657개의 절점과 64,872개의 요소로 구성되어 있고 유한요소 모델의 주요 파트에 대한 물성치는 Table 2와 같다. 경계 조건은 Fig. 3(b)과 같이 Bed와 지면이 만나는 지점에 있는 절점 10개의 자유도를 모두 고정시켰다.

비구면 렌즈 가공 연삭기 모델의 정해석 결과, 자중에 의한 변형 형상은 Fig. 3(c)과 같이 연삭기 Y-table 파트에서 최대 처짐이 발생했으며, 응력분포는 Fig. 3(d)과 같이 베드와 지면의 연결부에서 12.8MPa의 최대 응력이 발생하였다.

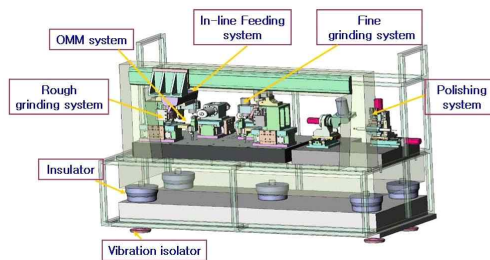


Fig. 2 Layout of in-line system for aspheric lens

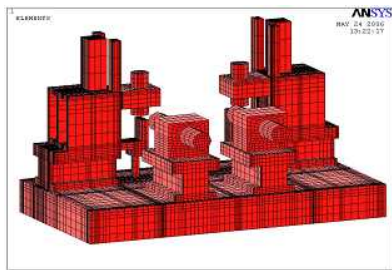
Table 2 Material properties of system

Material	E (GPa)	Poisson's Ratio	Density (kg/m ³)
FC20 FC25	186	0.18	7,420
S45C	207	0.3	7,870
A6061	70	0.34	2,700

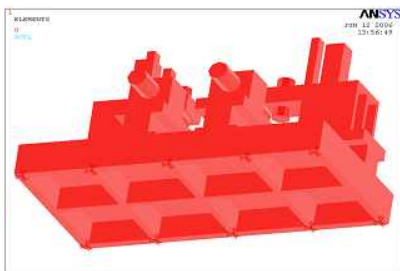
3.4 초정밀 비구면 가공시스템 제작

본 연구에서 개발한 비구면 렌즈 금형가공용 마이크로 시스템을 Fig. 4에서 보여주고 있다. 비구면 연삭 시스템과 비구면 연마 시스템을 하나의 베드 위에서 모두 구성되어 있으며, 연삭 시스템 부분에는 황삭 시스템과 정삭 시스템으로 나뉘어져 있다. 또한 황삭 시스템에서 공작물을 가공을 하고 자동 이송

시스템을 이용하여 정삭 시스템으로 지그를 이동하고 난 후 정삭 가공을 거친 후 최종적으로 폴리싱 공정 후 비구면 렌즈 가공이 마무리가 된다. 황삭 시스템과 정삭 시스템은 리니어모터와 크로스롤러베어링을 채택하였고, 주축과 공작물 축은 각각 에어스핀들을 사용하였으며, 공작물 척킹(chucking)을 위해서 콜렛(collet)을 사용하여 in-line 시스템 구동 시 공작물을 자동적으로 이송시킬 수 있게 한 것이다. 각각의 X, Z축에는 5nm급의 레이저스케일을 사용하여 미세한 이송 정밀도를 얻을 수 있도록 제작하였다. 또한 절삭유는 순환할 수 있도록 냉각 시스템과 마이크로 필터링을 사용하여 온도 조절과 이물질을 제거 할 수 있는 시스템으로 구성을 하였다. 또한 높은 형상 정밀도와 표면 거칠기를 얻기 위해서 진동에 대한 영향을 배제할 수가 없다. 따라서 진동의 영향을 줄이기 위해서 베드와 바닥부분에 방진 패드를 사용하여 진동의 영향을 줄였다.



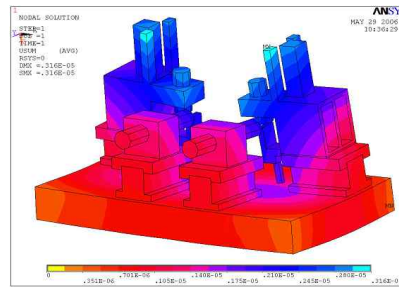
(a) FE modeling



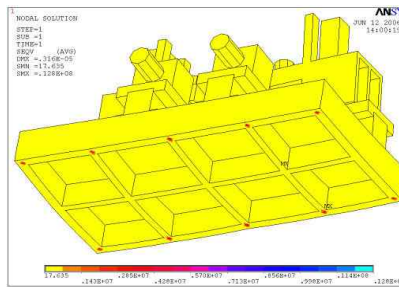
(b) Boundary condition

4. 초정밀 비구면 렌즈 가공시스템 특성평가

Fig. 5는 비구면 마이크로 시스템의 이송



(c) Deformation of system



(d) Stress distribution of system

Fig. 3 FE analysis results of in-line system

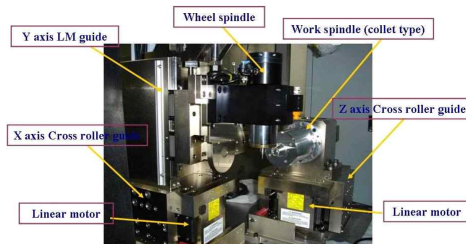


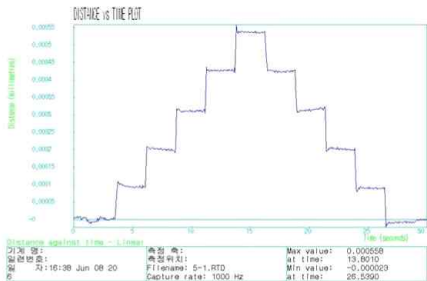
Fig. 4 Ultra-precision system for aspheric lens

정밀도를 측정하는 사진을 보여주고 있다. 측정 장비는 레닌쇼우사의 laser interferometer

를 사용하였고, 실제로 비구면 경로를 생성시키는 X축과 Z축의 위치정밀도를 측정하였다. 비구면 렌즈 가공시스템 이송계의 최소 단위 응답 특성을 알아보기 위해서 0.1 μm step 이송을 실시하여 장비의 최소 단위응답특성을 측정하였다. 측정 결과 비구면 렌즈 가공 시스템의 스텝 응답 값이 0.05 μm 로 나타났으며 서브 마이크로의 비구면 형상 정밀도를 얻기 위해서는 시스템의 이송정밀도가 서브 나노급의 값을 가져야 원하는 형상정밀도를 얻을 수 있다.



(a) Laser interferometer



(b) 0.1 μm step(response:0.05 μm)

5. 초정밀 비구면 렌즈 가공특성 평가

초정밀 비구면 마이크로 렌즈 가공을 위한 연삭 가공 특성을 파악하기 위해서 황삭용 연삭숫돌은 20 μm 입자크기를 가지는 비트리 파이드 본드 다이아몬드 숫돌을 사용하였고, 정삭용 연삭숫돌은 10 μm 입자크기를 가지는 레진본드 다이아몬드 숫돌을 사용하였다. 연삭숫돌의 결합도는 중간정도인 N이고, 집중도는 125mg/cm³이다. 연삭숫돌의 드레싱은 단

석 드레서를 공작물 축에 고정하고 CCD카메라를 이용하여 50~150배 확대시키고 난 후 모니터링하면서 공구 형상에 따라 공작물 주축을 틸팅시키면서 연삭숫돌을 드레싱 한다.

비구면 렌즈 가공 후 표면 거칠기 및 형상정밀도를 3차원 측정기(Mitutoyo CS-5000)로 측정을 하였으며, 기준길이(cut off length)는 0.25mm이고, 실제 측정 길이는 공작물의 중심으로부터 좌우로 0.8875mm까지 Ra값만을 측정하였다. 비구면 렌즈를 가공하기 위한 연삭 조건은 연삭 주축의 회전속도, 공작물 회전속도, 이송속도 등으로 나누어서 실험을 수행하였고 이러한 인자들이 초정밀 연삭의 표면 거칠기와 형상정밀도에 미치는 영향을 알아보았다. 본 연구에서 수행된 실험 조건은 Table 3에 나타내었다. Fig.6은 비구면 렌즈를 가공한 결과를 보여주고 있으며 형상정밀도 P-V 0.6 μm 의 값을 얻었다.

Table 3 Typical ranges of machining condition

Conditions	Rough cut	Fine cut
Wheel speed(m/sec)	5.233-13.361	5.233-16.747
Work speed(mm/sec)	41.87-209.33	41.87-209.33
Feed speed(mm/min)	5-10	1-8
Grinding wheel	Vitrified(V)	Resin(B)

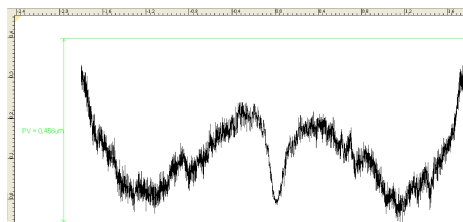
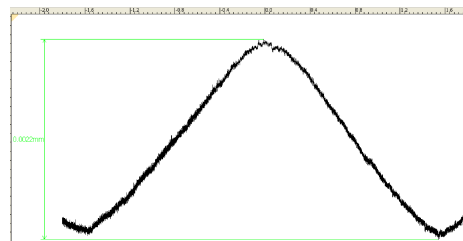


Fig. 6 Profile accuracy of aspheric lens after grinding

6. 결론

본 연구에서는 초정밀 금형 가공을 위한 초정밀 비구면 렌즈 금형가공시스템을 설계를 하였고, 구조해석을 통해서 설계를 평가하였다. 시스템 구조해석을 한 결과 최대 처짐량은 Y-table에서 3.16 μm 의 값을 나타냈으며 최대응력은 베드와 지면 연결부에서 12.8MPa을 나타내었다. 비구면 렌즈 가공시스템 구조 해석 결과 양호한 결과를 얻었다.

또한 초정밀 가공 시스템의 위치정밀도를 측정 한 결과 0.1 μm 의 위치정밀도와 0.1 μm 의 step 이송결과 0.05 μm 의 응답특성을 얻었다. 초정밀 비구면 마이크로 렌즈 개발을 위한 가공 특성을 평가한 결과 6 μm 의 입자크기를 가지는 레진본드 다이아몬드 연삭숫돌로 연삭 가공한 결과 이송속도 2mm/min, 공작물 회전속도 63mm/s, 연삭숫돌 원주 속도 16.747m/s 일 때 형상정밀도 P-V 0.6 μm , 표면 거칠기 Ra 0.006 μm 을 달성하였다.

참고문헌

- (1) Shida, H., 1998, "Development of Machining Technology on High Precision Plastic Opto-Element," *Rich Technical Rept*, No. 24, pp. 99~105.
- (2) Suzuki, H., Kodera, S., Maekawa, S., Morita, N., Sakurai, E., Tanaka, T., Takeda, H., Kuriyagawa, T., and Shoji, K., 1998, "Study on precision Grinding of Micro Aspherical Surface," *Journal of the Japan society for precision engineering*, Vol. 64, No. 4, pp. 619~623.
- (3) Yang, M. Y. and Lee, T. M., 1997, "Nwe biarc interpolation for ultra-precision aspheric surface machining," *Proc. ASPE Annual Meeting*, pp. 195~198.
- (4) Arnold, J. B., Steger, P. J., and Saito, T. T., 1975, "Tool feed influence on the machinability of CO₂ laser optics," *Applied Optics*, Vol. 14, pp. 1777~1782.
- (5) Foreman, J. W and Jr., 1986, "Simple numerical measure of the manufacturability

of aspheric optical surfaces," *Applied Optics*, Vol. 25, pp. 826~827.

- (6) Doughty, G. and Smith, J., 1987, "Microcomputer-controlled polishing machine for very smooth and deep aspherical surfaces," *Applied Optics*, Vol. 26, pp. 2421~2426.
- (7) Suzuki, H., Kodera, S., Nakasuji, M., and et al., 1997, "Study on the aspherical surface polishing of single crystal silicon lens," *JSPE*, Vol. 63, pp. 1280~1284.