

초정밀 금형가공기를 이용한 비구면 렌즈 가공특성 연구

백승엽[†] · 이하성 · 강동명^{††}

유한대학 금형설계학과

(2007. 6. 21. 접수 / 2007. 10. 31. 채택)

Characteristics of aspheric lens processing using ultra-precision moulds processing system

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

Department of Tool & Mold Engineering, Yuhan College

(Received June 21, 2007 / Accepted October 31, 2007)

Abstract : The fabrication of precision optical components by deterministic CNC grinding is an area of great current interest. Replacement of the traditional, craftsman driven, optical fabrication process is essential to reduce costs and increase process flexibility and reliability. Moreover, CNC grinding is well suited to the fabrication of complex shapes such as aspheres, making it possible to design optical systems with fewer components and reduced weight.

Current technology is capable of producing surfaces with less than 2 microns peak to valley error, 50 nm rms surface roughness, and less than 1 micron subsurface damage. Bound abrasive tools, in which the abrasive particles are fixed in a second (matrix) material, play an important part in achieving this performance. In this paper, the factors affecting the ultra-fine surface roughness and profile accuracy of machined surfaces of aspheric parts has been analyzed experimentally and theoretically and on ultra-precision aspheric grinding system and precise adjusting mechanism have been designed and manufactured. In the paper we report the results of experiments and modeling performed to examine the effects of machinability, occurring during grinding of optical surfaces, on the tool surface profile. Profiles of machined surface were measured by using SEM. In order to optimize grinding conditions of aspheric lens processing, we performed experiments by design of experiments.

Key Words : Design of experiments, Aspheric lens processing, Ultra precision grinding system, Abrasive diamond wheel

1. 서 론

고정밀도를 요구하는 기계가공 산업에 있어서 과거에는 비교측정에 사용되는 블록게이지를 가공하는 정도의 수준이었으나, 최근에는 정밀기계, 전기, 전자, 반도체, 광학 관련 기기를 비롯한 영상, 정보 및 항공 우주 산업 등의 급속한 발달로 인하여 그 구성 부품들의 초정밀 가공에 대한 필요성이 확대되고 있다. 따라서 초정밀 가공기술은 제품의 고부가가치 창출은 물론 기계가공 산업 전반에 막대한 파급효과를 나타내고 있다¹⁻²⁾.

다이아몬드공구에 의한 초정밀 경면 절삭기술이

급속히 발전하고 있는데 이는 고정도, 고강성, 무진동의 공작기계와 예리한 날 끝의 다이아몬드공구를 사용하여 공구의 날 끝 형상을 공작물상에 그대로 전사하는 방식의 가공법으로써, VTR 헤드 드럼, 복사기 드럼, 레이저 프린터용 다면체경, 컴퓨터용 메모리 디스크, 각종렌즈, 핵융합로, 레이저 반사경 등의 첨단 산업분야에 광범위하게 적용되고 있으며, 특히 비구면 광학소자의 생산기술과 측정기술은 현대의 첨단기술로 부각되어 그 수요는 더욱 확대 될 것으로 전망 된다³⁻⁸⁾. 이러한 제품들에 요구되는 정밀도는 표면 최대 거칠기가 20nm이하인 경우가 대부분이므로, 다이아몬드공구에 의한 초정밀 경면 가공기술이 아니면 도달하기 매우 어려운 정밀도이다. 이러한 초정밀 형상가공기술의 중요성에 따라 초정밀 가공 조건과 원리를 이해하고, 초정밀 연삭과정

[†] To whom correspondence should be addressed.

yub777@empal.com

^{**} kangdm@yuhan.ac.kr

에서 발생하는 각종 원인을 규명하여 광학적 표면 정밀도(P-V 0.1 μ m)를 달성하기 위한 초정밀 형상가공 공정기술의 개발이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 BK7 광학 소재의 비구면 렌즈를 가공하기 위하여 초정밀 금형가공시스템을 이용하여 초정밀 비구면 렌즈를 가공하였으며, 실험계획법을 적용하여 최적 조건을 추정하고, 시스템에 어떤 인자가 영향을 크게 미치는가를 파악하고 가공인자의 특성을 파악하였다.

2. 초정밀 비구면 렌즈 설계

2.1. 광학렌즈 설계 사양

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.

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

$$+ aX^4 + bX^6 + cX^8 + dX^{10}$$

여기서 원추상수 $K=-3.3588844633186$ 이고 a, b, c, d 는 구면을 포함한 원추면을 비구면으로 수정하는 계수로서 $a=-0.00001970543, b=-0.000054604715, c=0.0000209510886, d=0.0000112526574$ 이고 Z 축은 회전의 중심축으로서 비구면 축방향의 위치이고 X 는 비구면 축으로부터의 수평 방향 거리이다. c 는 렌즈면의 정점에서의 기본 곡률이고 $c=1/R$ 로 나타낼 수 있다. 비구면의 곡률 기준 반경을 나타내는 계수 $R=4.2538213941255$ 이다.

2.2. 비구면 형상 경로 생성

회전 대칭의 비구면에 대해서 연삭 공구는 Fig. 1과 같이 회전하는 공작물의 직경 축에 대해서 왕복 운동을 한다. 각 반경 위치에 따라 공구의 접촉점과 공구의 중심 위치가 다르기 때문에 공구와 공작물의 접선을 계산하면 공구의 중심위치 추적이 가능하다. 접선의 기울기는 그 점에서의 함수의 미분으로 나타낼 수 있다. X 는 비구면 축으로부터의 수평 방향 거리이며, Z 는 비구면 축 방향의 위치이다. 식 (2)은 비구면 형상 가공 시 구면 숫돌의 운동과 공

구 경로의 계산을 보여주고 있다.

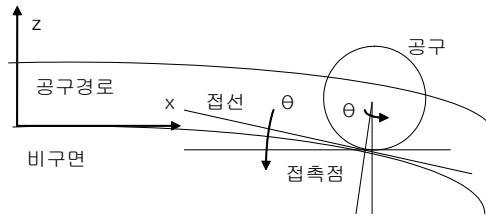


Fig. 1 Concept of tool contact point and angle

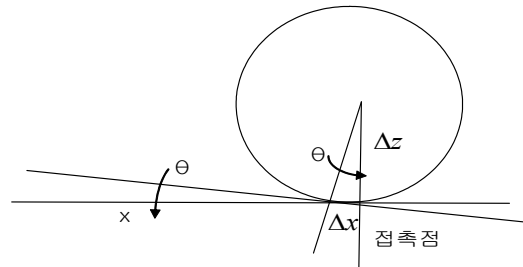


Fig. 2 Contact between tool and aspheric lens

$$\tan\theta = Z = f'(X) \quad (2)$$

비구면 가공 경로는 다소 복잡한 과정을 거쳐 비구면 공식을 미분하여 얻을 수 있다. Fig. 1과 같이 $Z=f(X)$ 상에서 원형의 공구가 접촉한다면, 접촉각 θ 는 식(2)과 같이 나타낼 수 있다.

이 수식을 식(1)에 적용하여 Z' 을 X 에 관한 함수로 전개하면, 다소 복잡한 연산과정을 통해 식(3)을 통해 얻을 수 있다.

$$\tan\theta = Z' = \frac{2XC(1+G) - (k+1)X^3C^3}{G(1+G)^2} + \sum_{i=1}^{20} \text{sgn}(X) i A_i |X|^{i-1} \quad (3)$$

여기서, G 는 연산을 간편하게 하기 위해서 식(4)과 같이 정의하였다.

$$G = \sqrt{1 - (K+1)X^2C^2} \quad (4)$$

이와 같이 비구면의 미분치는 비구면 표면의 접촉 각도를 계산해 줄 수 있게 만든다.

그리고 비구면 가공 공구는 원형의 형상을 가지고 있으므로, 비구면 표면의 접촉각을 알면, Fig. 2

와 같이 접선을 가지고 중심까지의 거리를 계산해 낼 수 있다. 접촉각과 접촉점의 정보를 이용하면 비구면 공구의 위치, 즉 공구 중심의 위치는 삼각함수에 의한 연산으로 식(5)과 (6)에 의해 계산해 낼 수 있다. 그리고 구면 스톨의 공구 궤적을 스톨의 중심 좌표와 비구면 형상의 관계에서 결정하였다.

따라서 비구면 가공은 일정한 반경을 갖는 구면 스톨의 궤적에 의하여 이루어지며 비구면 형상의 변곡점에서의 간섭을 최소화하기 위해서 스톨의 곡률반경은 비구면의 최소 곡률반경보다 작아야 한다. 구면스톨은 초기 가공 시작점에서 가공 종료점까지 계산된 가공 경로를 따라 실제 위치인 X_t, Z_t 의 2축 NC 동시 제어로 가공이 된다.

$$X_t = X + \Delta X = X + R \sin\theta \quad (5)$$

$$Z_t = Z - \Delta Z = Z - R \cos\theta \quad (6)$$

3. 실험장치 및 방법

3.1. 실험장치

본 연구에서 사용된 초정밀 금형가공시스템은 크게 연삭 시스템, 연마 시스템으로 이루어져있다. 각각의 시스템은 공기 정압 베어링 스피들들로 구성되었고, 이송 안내면은 리니어 모터와 크로스 롤러 베어링을 채택하여 제작되었다. 위치정밀도는 $0.1\mu\text{m}$ 이하이며 사용 공구는 레진다이아몬드 휠과 메탈다이아몬드 휠을 사용하였다. 측정 시스템은 Mitutoyo CS-5000 3차원 측정기를 사용하였다. Fig. 3과 Fig. 4는 비구면 렌즈를 가공하기 위한 시스템과 비구면 렌즈 형상을 보여주고 있다.

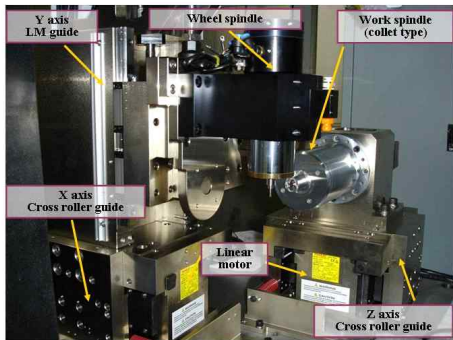


Fig. 3 Ultra-precision processing system

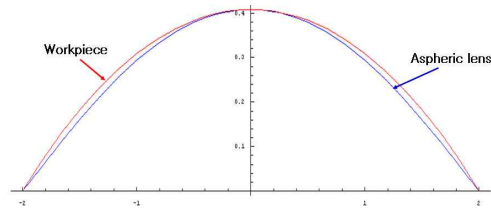


Fig. 4 The shape of aspheric lens

3.2. 실험방법

초정밀 비구면 렌즈의 최적가공조건을 찾기 위하여 이송속도, 공작물 회전속도, 공구의 회전속도와 절입깊이에 대한 표면 거칠기를 측정하여 최적의 초정밀 가공조건을 찾아내었으며, 그 가공조건을 이용하여 초정밀 비구면 렌즈를 제작하였다. 비구면 렌즈의 초정밀가공을 위하여 유리렌즈를 최적 곡률반경으로 가공하여 3차원측정기로 측정을 한 후 정확한 공구위치를 설정하였다. 그리고 비구면 공구경로를 생성하기 위해서 비구면 프로그램을 이용하여 비구면 렌즈를 가공하였으며, 최종적으로 SEM을 이용하여 표면 거칠기를 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1. 실험계획법

비구면 가공을 위한 가공 변수를 3수준으로 나누어 실험을 수행하였다. 비구면 초정밀 연삭의 중요한 변수라고 생각되는 공작물의 주축 회전 속도 (Work Spindle Speed), 휠의 주축 회전 속도(Wheel Spindle Speed), 절입량(Depth of Cut), 이송속도(Feed rate)로 설정을 하였다. 이에 사용된 실험 변수와 수준에 따른 값은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Three-level design of experimental

Grinding Parameter	Symbol	Level		
		0	1	2
Work Speed(mm/s)	A	62.8	125.6	188.4
Work Speed(m/s)	B	6.28	10.466	16.746
Depth of Cut(μm)	C	0.5	1.5	2.5
Feed rate(mm/min)	D	1	5.5	10

각 가공 조건이 시스템 특성치에 미치는 영향을 알아보기 위하여 주효과(Main Effect)를 분석하여 보았다. 분석은 특성치를 가공 결과 중에 하나인 표면 거칠기로 설정을 하여 분석을 하였다. 주 효과(Main

Effect) 분석 그래프를 반응치 원래 데이터를 이용하여 분석을 행하였고 분석 결과를 나타낸 그래프는 Fig. 5에 나타내었다. 주 효과 분석 그래프에서 특성치에 대응해 각 가공 조건에 따른 영향을 판단할 수가 있다.

표면 거칠기의 경우에는 낮을수록 좋은 특성치이기 때문에 각각 가공 조건에 대해 낮은 특성치 값을 가질 때의 가공 조건이 시스템에 좀 더 나은 영향을 준다는 것을 의미한다. 표면 거칠기를 특성치로 설정한 그래프를 보았을 때 동그라미를 쳐진 Level에서 가장 적은 값을 보이고 있으므로 공작물의 주축 회전속도 62.8mm/s, 휠의 주축 회전속도는 16.746m/s, 절입량은 0.5 μ m, 이송 속도는 1mm/min에서 가장 좋은 영향을 미친다고 판단할 수가 있다.

그리고 각 수준에서의 그래프의 기울기를 가지고 도 분석을 행할 수도 있다. 각 수준에서의 그래프의 기울기가 크면 클수록, 즉 각 level에서의 값의 차이가 크게 나면 날수록 그 수준이 특성치에 영향을 미치는 영향이 크다는 것을 의미한다.

표면 거칠기의 경우에는 이송속도 그래프 기울기의 편차가 가장 크므로 이송 속도가 표면 거칠기에 가장 크게 영향을 미치는 가공 조건이라 할 수가 있다. 그 다음으로 휠의 주축 회전 속도, 공작물 주축 회전속도, 절입량 순으로 표면 거칠기에 영향을 미치는 것으로 도출되었다. 주 효과 그래프를 이용하여 특성치에 가장 큰 영향을 미치는 가공 인자를 알 수가 있었다. 하지만 그래프를 가지고는 정량적인 판단이 불가능하기 때문에 가공 결과를 가지고 분산분석(ANOVA)을 시행하여 정량적으로 가공인자가 특성치에 미치는 정도를 알아보려고 한다. 각 특성치에 따른 분석분석 결과표는 Table 2에 나타내었다.

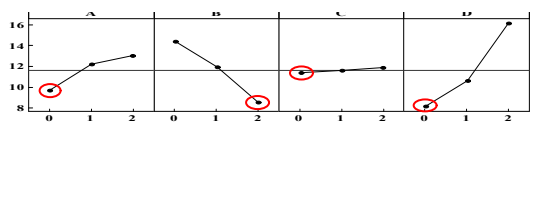
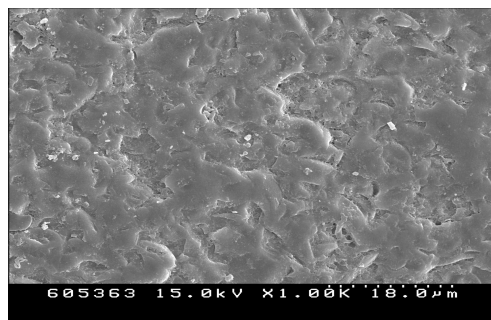


Fig. 5 Main effect of surface roughness

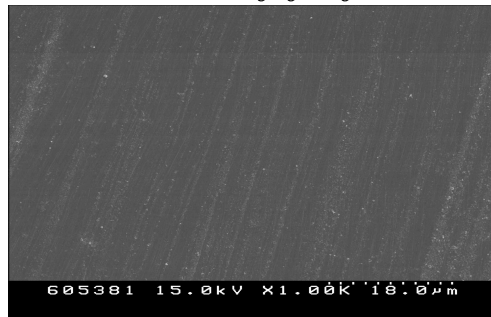
분산분석 테이블에서는 F 검정을 통하여 각 인자가 영향을 미치는 정도를 정량적으로 파악이 가능하다.

Table 2 ANOVA table of surface roughness

Source	Degree of Freedom	Sum of Square	Mean Square	F-value	P
A	2	163.062	81.531	50.95**	0.000
B	2	460.321	230.160	143.82* *	0.000
C	2	3.654	1.827	1.14	0.328
D	2	898.543	449.272	280.74* *	0.000
A×B	4	160.198	40.049	25.03**	0.000
A×C	4	9.086	2.272	1.42	0.242
A×D	4	65.531	16.383	10.24**	0.000
B×C	4	10.938	2.735	1.71	0.164
B×D	4	56.272	14.068	8.79**	0.000
C×D	4	2.716	0.679	0.42	0.790
Error	48	76.815	1.600		
Total	80	2.52978			



a) After rough grinding



b) After fine grinding

Fig. 6 SEM photograph of machined aspheric surface

우선 주 효과만을 보았을 경우에는 주 효과 분석 그래프와 마찬가지로 각각 이송 속도가 가장 큰 값을 가진다는 것을 알 수가 있다. 이것은 주 효과 그래프를 이용하여 분석한 결과와 같은 결과를 보여 준다. Fig. 6은 황삭가공과 정삭가공 후의 비구면 렌즈의 표면을 측정된 사진이다. 황삭가공 후 거친 표면을 얻었지만 정삭가공 후 매끈한 표면을 얻을 수

있었다. 비구면 렌즈에서는 표면 거칠기가 해상도에 많은 영향을 미치기 때문에 연삭공구의 마크가 비구면 렌즈 표면에서 완전히 제거되어야 한다.

5. 결론

비구면 렌즈 가공 프로그램에서, 비구면 설계 데이터를 입력하고 비구면 경로를 생성하여 비구면 렌즈 가공 실험을 수행하였다.

비구면 가공을 위한 공구 경로를 비구면 수식으로부터 유도하였고, 비구면 경로는 공구와 비구면의 접촉점에서 공구의 형상과 비구면의 형상을 이용하여 생성하였다. 접촉점에서 접촉 각도를 계산함으로써 공구의 중심 좌표를 계산할 수 있었고, 이것을 가공 좌표로 표현하여 공구보정을 프로그램에 적용하였다. 실험계획법을 통해서 표면 거칠기에 영향을 미치는 인자들을 고려하여 형상 정밀도 분석을 위한 비구면 렌즈 가공을 수행하였고, 비구면 렌즈의 형상정밀도를 분석을 위해서 가공 결과를 형상 표면측정기로 측정 및 분석을 하였으며, 황삭 가공 후 형상정밀도 P-V $2\mu\text{m}$, 표면 거칠기 Ra $0.2\mu\text{m}$ 값을 얻었고, 정삭 가공 한 후 형상정밀도 P-V $0.4\mu\text{m}$, 표면 거칠기 Ra $0.006\mu\text{m}$ 값을 얻었다. 일반적으로 비구면 렌즈 성형 후 형상 정밀도 P-V $0.5\mu\text{m}$, 표면 거칠기 Ra $0.01\mu\text{m}$ 값보다 더 좋은 결과를 얻었다.

황삭 가공 후 형상정밀도를 분석한 결과 형상오차는 이상적인 비구면 곡선을 보이고 있지만, 거친 입도를 가진 공구 때문에 렌즈의 표면이 깨져서 표면 거칠기가 좋지 않았고 이러한 영향이 형상정밀도를 측정했을 때 그대로 전사되어 형상정밀도가 나쁘게 나타나는 요인이 되었다.

참고문헌

- 1) Donaldson, D. D. Thompson, "Design and performance of small precision CNC turning machine", Ann. CIRP, Vol. 35, pp. 373-376, 1986.
- 2) N. Ikawa, S. Shimada, "Recent trends in diamond tool technology", Proceedings of the International congress for ultra precision technology, Aachen, Frg., pp. 126-142, 1988.
- 3) M. Masuda et al, "A Study on Diamond Turning of Al-Mg Alloy-Generation Mechanism of surface Machined with Worn Tool", Annals of the CIRP, Vol. 38, No. 1, pp. 111, 1989.
- 4) T. Moriwaki and K. Okuda, "Machinability of Copper in Ultra-Precision Micro Diamond Cutting", ibid.10, pp. 115, 1989.
- 5) T. Nakasuji et al, "Diamond Turning of Brittle Material for Optical Components", Annals of the CIRP, Vol. 39, No. 1, pp. 89, 1990.
- 6) H. Philip Stahl, "Aspheric Surface Testing Techniques", SPIE, Vol. 1332, pp. 66~76, 1993.
- 7) Suzuki, H., Kodera, S., Nakasuji, M., and et al, "Study on the aspherical surface polishing of single crystal silicon lens", JSPE, Vol. 63, pp. 1280-1284, 1997.
- 8) D. J. Whitehouse, "Comparison between Stylus and Optical Methods for Measuring Surfaces", CIRP, Vol. 37, pp. 649-653, 1988.