

휴대폰 카메라용 비구면 마이크로 렌즈 최적 연삭가공 평가

백승엽*, 이은상⁺

(논문접수일 2005. 8. 1, 심사완료일 2006. 2. 13)

Evaluation on the Optimum Grinding of Aspheric Surface Micro Lens for Camera Phone

Seung Yub Baek*, Eun Sang Lee⁺

Abstract

As consumers in optics, electronics, aerospace and electronics industry grow, the demand for ultra-precision aspheric surface lens increases higher. To enhance the precision and productivity of ultra precision aspheric surface micro lens, the development of ultra-precision grinding system and process for the aspheric surface micro lens are described. In the work reported in this paper, an ultra-precision grinding system for manufacturing the aspheric surface micro lens was developed by considering the factors affecting the ground surface roughness and profile accuracy. This paper deals with mirror grinding of an aspheric surface micro lens by resin bonded diamond wheel and spherical lens of BK7. The optimization of grinding conditions on ground surface roughness and profiles accuracy is investigated using the design of experiments.

Key Words : Aspheric surface(비구면), Ultra-precision grinding system(초정밀 연삭기), Profile accuracy(형상정밀도), Design of experiments(실험계획법), Ground surface roughness(연삭 표면 거칠기), Profile error(형상 오차)

1. 서론

비구면의 반사경이나 렌즈는 광학적인 수차를 보정할 수 있기 때문에 최근 그 사용이 늘어나고 있다. 또한 렌즈의 배수를 줄여 경박 단순한 제품 제작이 가능하기 때문에 광학, 정보 기기 디바이스에 탑재되고 있는 여러 종류의 광학렌즈

에는 비구면 형상화 및 고정도화가 행해지고 있다⁽¹⁾.

구면 렌즈는 원리적으로 수차를 포함하고 있으며 이것을 제거하기 위하여 렌즈의 조합수를 늘리고 다층막 코팅 등을 통하여 성능 향상을 실현시켜왔다. 그러나 비구면 렌즈 광학계는 초점집광 성능을 향상시켜 구면 수차를 제거하고 복잡한 렌즈 조합을 필요로 하지 않는 많은 장점이 있다. 지금까지

* 인하대학교 기계공학과 대학원

⁺ 교신저자, 인하대학교 기계공학부 (leees@inha.ac.kr)

주소: 402-751 인천광역시 남구 용현동 253번지

지 비구면 광학부품에 대한 연구는 비교적 직경이 큰 렌즈를 대상으로 진행되어 왔으나 광학계의 마이크로화에 따른 마이크로 비구면 광학 부품의 연구 및 개발의 중요성이 대두되고 있다^(2,3). 현재 비구면 렌즈를 생산하는 방법은 여러 가지로 개발이 되어 있다. 저가인 플라스틱렌즈의 정밀 사출기에서 사출하는 방법과 고신뢰도를 요구하는 제품에 적용되는 유리렌즈를 성형하는 방법이 있다. 유리성형기는 고온에서 금형에 의해 유리렌즈를 성형하기 때문에 금형의 수명이 문제가 되며 성형용 유리재질이 몇 가지로 한정되어 광학계 설계에 제약이 따르는 단점이 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해서 경쟁력 있는 비구면 유리 렌즈 가공 시스템 개발이 매우 높게 요구 되어 왔다. 비구면 렌즈가공은 진동, 이송 정밀도, 공구의 형상 오차와 공구 경로는 비구면 렌즈 금형에서 잔류 공구마크가 남게 된다. 또한 렌즈의 소형화에 따라 연삭 공구가 급속하게 마멸되어 정밀 비구면 형상을 만들기 어려운 경우도 있다. 따라서 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⁽⁴⁻⁶⁾. 비구면 마이크로 렌즈의 경우, 렌즈 기본 곡률반경이 작고, 비구면 경사도가 크기 때문에 공구의 크기와 형상, 공구의 운동을 제약하는 요건이 되고 있다⁽⁷⁾. 그리고 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⁽⁸⁾.

국내에서 비구면 렌즈 가공기술에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있지만, 비구면 렌즈를 가공하기 위한 장비가 대부분 외국에서 수입해오는 실정이고 외국 장비를 이용한 가공기술들이 많이 소개되어져 왔다. 비구면 렌즈는 대부분 금형에 의한 성형에 의해서 대량 생산되고 있지만 비구면 코어 제작에 많은 비용이 들어가며 일정기간 사용 후 코어의 마모로 인해서 비구면 렌즈의 성능이 떨어지며 재가공하기 위한 유지보수 비용이 많이 들기 때문에 이를 보완하기 위해서 상대적으로 유지보수 비용이 적게 드는 연삭 시스템을 개발하여 생산성을 높이는 동시에 고정밀도의 비구면 렌즈를 개발하기 위한 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 카메라 폰에 사용되는 초정밀 비구면 마이크로렌즈를 연기 위해 초정밀 비구면 가공기를 개발하였고, 이 시스템을 이용하여 카메라 폰용 초정밀 비구면 마이크로 렌즈 개발을 위한 가공 특성을 평가하였으며 요구 표면 거칠기 Ra 10nm, 형상정밀도 P-V 0.8 μ m이하의 휴대

폰용 비구면 렌즈를 가공하였다.

2. 초정밀 비구면 연삭 시스템

2.1 초정밀 연삭 가공 시스템 구성

본 연구에서는 ϕ 4mm 비구면 마이크로 렌즈를 가공하기 위한 연삭 시스템 개발을 하였다.

Fig. 1은 초정밀 비구면 연삭 시스템을 보여주고 있다. 구면 렌즈를 공작물 지그에 본딩을 한 후 지그를 공작물 주축에 진공으로 고정한다. 공작물 주축과 공구대 이송축을 동시에 제어하여 비구면 형상을 가공할 수 있게 된다. 비구면 형상 가공을 위해서 NC 컨트롤러를 통해서 비구면 NC 데이터를 입력하게 되고 가공을 하게 된다. Table 1은 시스템의 사양을 보여주고 있다.

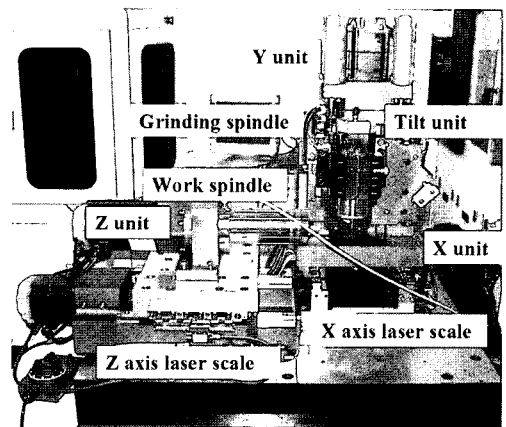


Fig. 1 Ultra-precision grinding system

Table 1 Specification of grinding system

Unit		Spec
Workpiece	Size	ϕ 4mm Convex
	Material	BK7
Travel	Position Accuracy	0.1 μ m
	Straightness	0.1 μ m/40mm
	Stiffness(H/V)	200/400N/ μ m
Workpiece Spindle	Rotational Error	0.1 μ m
	Rotational Speed	~ 3,000rpm
	Stiffness(R/Axial)	30/100N/ μ m
Grinding Spindle	Rotational Speed	100,000rpm

2.2 비구면 렌즈 설계

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

$$Z(X) = \frac{C \cdot X^2}{1 + \sqrt{1 - (K+1)C^2 \cdot X^2}} + \sum_{i=1}^{20} A_i X^i \quad (1)$$

여기서, $R = -4.2538213941255$, $K = -3.3588844633186$
 $4^{th} = -0.00001970543$, $6^{th} = -0.000054604715$,
 $8^{th} = 0.0000209510886$, $10^{th} = 0.0000112526574$

Z축은 회전의 중심축으로서 비구면 축방향의 위치이고 X는 비구면 축으로부터의 수평 방향거리이다. 첫 번째 항은 구면 항이고, 두 번째 항은 구면 항에 대한 수정량 즉, 비구면 항에 해당된다. 여기서 k는 원추상수로서 원추면에 따라서 달라지고, C는 비구면의 곡률 기준 반경을 나타내는 계수이다. A, B, C, D는 구면을 포함한 단순 원추면을 비구면으로 수정하는 비구면 계수이다.

3. 비구면 렌즈 가공

3.1 가공 프로세스

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 스톱의 곡률 반경에 따른 공구 경로를 구한다. 구해진 공구 경로를 NC데이터로 변환을 해서 CNC 컨트롤러에 전송을 한다. 비구면 렌즈 가공기는 CNC 제어로 연속 가공을 수행하고 가공된 비구면 렌즈는 형상 측정을 통해서 데이터를 보정하여 몇 차례 가공을 한 후 형상 정밀도 및 표면 거칠기를 측정한다. 비구면 렌즈를 가공하기 위해서 황삭, 정삭, 폴리싱 공정으로 이루어진다. 가공 시간 및 공구의 마모를 줄이기 위해서 황삭에서 비구면 형상을 생성하고, 정삭에서 비구면 정밀도를 높이는 단계를 거치면서 연속 가공 후 렌즈의 표면 거칠기 및 투명도가 떨어지기 때문에 최종적으로 폴리싱을 하여 실제로 사용가능한 비구면 렌즈를 얻을 수 있다. Fig. 2는 비구면 렌즈의 가공 프로세스를 보여주고 있다.

3.2 비구면 형상가공

윤곽 가공은 주로 구면과 비구면 형상을 생성할 때 사용된

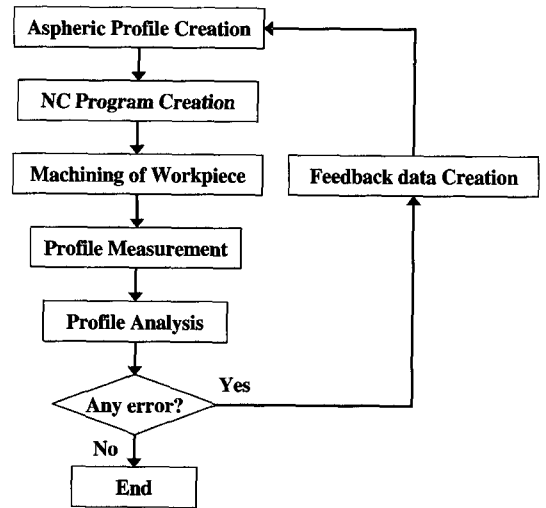


Fig. 2 Manufacturing process of aspheric surface lens

다. 본 연구에 이용된 시스템의 구성은 두 개의 LM가이드 안내면과 공작물과 공구를 고정시키는 공기정압 베어링 스펀들로 구성되어 있다. 두 안내면은 각각 X축과 Z축으로 직교 형태를 이루고 있다. 공구가 Y축에 고정되어 있고, 렌즈는 Z축에 고정되어 있으며 Y축은 X축 테이블 위에 고정되어 있다. 공작물과 휠은 시계방향으로 회전을 하고, Z축과 X축을 동시에 제어하면서 가공을 수행하였다. Fig. 3은 본 연구에서 사용된 비구면 가공용 초정밀 연속 시스템의 구동 메커니즘을 보여주고 있다.

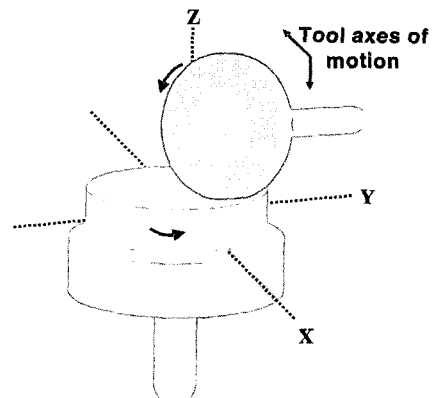


Fig. 3 Contour grinding geometry for aspheric surface lens

3.3 비구면 형상 경로 생성

회전 대칭의 비구면에 대해서 연삭 공구는 Fig. 4와 같이 회전하는 공작물의 직경 축에 대해서 왕복운동을 한다. 각 반경 위치에 따라 공구의 접촉점과 공구의 중심 위치가 다르다. 따라서 공구와 공작물의 접선을 계산하면 공구의 중심위치 추적이 가능하다. 접선의 기울기는 그 점에서의 함수의 미분으로 나타낼 수 있다. X는 비구면 축으로부터의 수평방향 거리이며, Z는 비구면 축 방향의 위치이다. 식 (2)은 비구면 형상 가공 시 구면 스톨의 운동과 공구 경로의 계산을 보여주고 있다.

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

비구면 가공 경로는 다소 복잡한 과정을 거쳐 비구면 공식을 미분하여 얻을 수 있다. Fig. 4와 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 X에 관한 함수로 전개하면, 다소 복잡한 연산과정을 통해 식 (3)을 통해 얻을 수 있다.

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

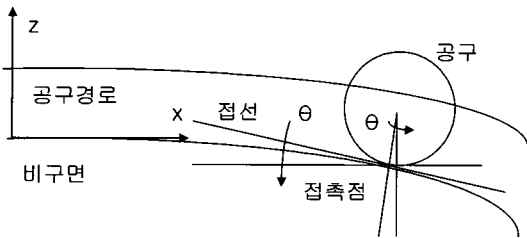


Fig. 4 Concept of tool contact point and angle

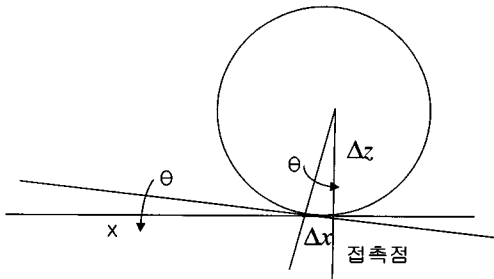


Fig. 5 Contact between a tool and aspheric surface lens

여기서, G는 연산을 간편하게 하기 위해서 식 (4)와 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. 5와 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)와 (6)에 의해 계산해 낼 수 있다. 그리고 구면 스톨의 공구 궤적을 스톨의 중심좌표와 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 개시점에서 가공 종료점까지 계산된 가공 경로를 따라 실제 위치인 X_t, Z_t 의 2축 NC 동시 제어로 가공이 된다.

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

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

4. 실험 결과 및 고찰

초정밀 비구면 마이크로 렌즈 가공을 위한 연삭 가공 특성을 파악하기 위해서 황삭용 연삭스톨은 $20\mu\text{m}$ 입자크기를 가지는 비트리파이드 본드 다이아몬드 스톨을 사용하였고, 정삭용 연삭스톨은 $10\mu\text{m}$ 입자크기를 가지는 레진본드 다이아몬드 스톨을 사용하였다. 연삭스톨의 결합도는 중간정도인 N이고, 집중도는 $125\text{mg}/\text{cm}^3$ 이다. 연삭스톨의 드레싱은 단석 드레서를 공작물 축에 고정하고 CCD카메라를 이용하여 50~150배 확대시키고 난 후 모니터링하면서 공구 형상에 따라 공작물 주축을 틸팅시키면서 연삭스톨을 드레싱 한다. 비구면 렌즈 가공 후 표면 거칠기 및 형상 정밀도를 3차원 측정기(Mitutoyo CS-5000)로 측정을 하였으며, 기준길이(cut off length)는 0.25mm 이고, 실제 측정 길이는 공작물의 중심으로부터 좌우로 0.8875mm 까지 Ra값만을 측정하였다. 비구면 렌즈를 가공하기 위한 연삭 조건은 연삭 주축의 회전속도, 공작물 회전속도, 이송속도 등으로 나누어서 실험을 수행하였고

Table 2 Typical ranges of process parameter

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)

이러한 인자들이 초정밀 연삭의 표면 거칠기와 형상정밀도에 미치는 영향을 알아보았다. 본 연구에서 수행된 실험 조건은 Table 2에 나타내었다.

4.1 연삭 주축 속도에 따른 가공 특성

본 연구에서 사용된 비구면 연삭 시스템은 최대 주축 회전수가 100,000rpm이다. 주축 스피들의 런 아웃은 0.5 μ m 이하이고, 연삭숫돌 원주 속도를 5.23~16.75m/sec까지 변화를 주었다. Fig. 6은 연삭숫돌 회전속도가 증가할수록 Ra값이 작아지는 경향을 보여주고 있는데 이는 연삭숫돌의 회전속도가 증가하면 공작물의 회전방향으로 미치는 입자의 영향이 작아지므로 표면 거칠기가 향상되었다.

4.2 공작물 주축 속도에 따른 가공 특성

공작물 주축 회전속도는 최대 3,000rpm이고 본 실험에서는 41.87~209.33mm/s 범위까지 변화를 주어 가공을 수행하였다. Fig. 7은 공작물 회전속도에 따른 표면 거칠기를 측정된 결과를 보여주고 있다. 이송속도는 3mm/min, 연삭속

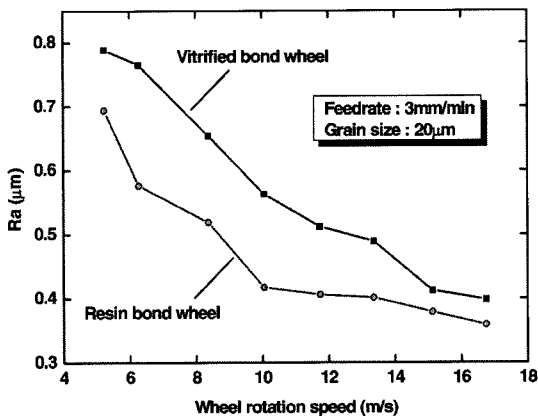


Fig. 6 Wheel rotation speed vs ground surface roughness

돌 원주 속도는 16.75m/sec으로 고정을 하였다. 공작물의 회전수가 증가함에 따라서 표면 거칠기가 좋아지는 것을 볼 수 있다. 하지만 본 실험에서 일정 속도 이상이 되면 표면 거칠기가 나빠지는 결과를 얻었다. 따라서 공작물의 회전속도와 이송속도의 적절한 조절이 필요하다.

4.3 이송 속도에 따른 가공 특성

연삭 주축의 회전속도와 공작물의 회전속도를 고정하고 이송속도를 변화시키면서 가공 한 후 표면 거칠기를 측정된 값을 Fig. 8에 나타내었다. 이송속도가 증가할수록 표면 거칠기 값도 커지는 것을 알 수 있다.

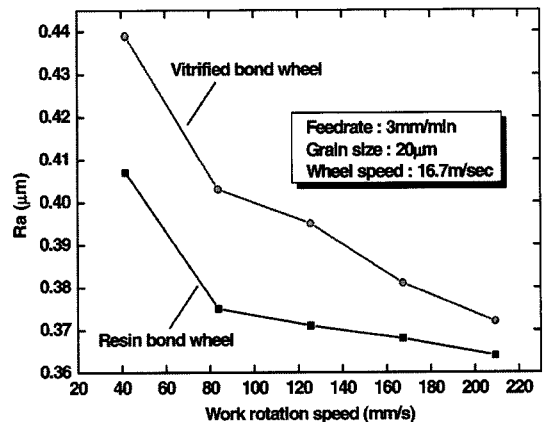


Fig. 7 Work rotation speed and ground surface roughness

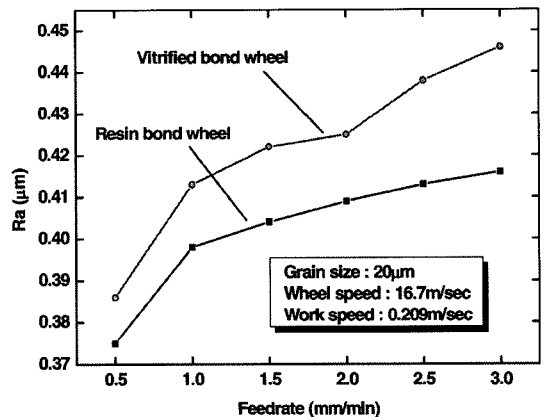
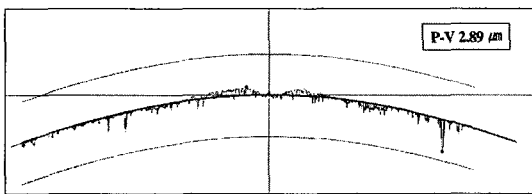


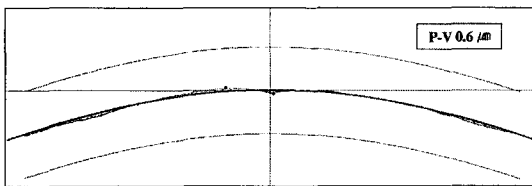
Fig. 8 Feedrate vs ground surface roughness

4.4 형상 정밀도에 관한 특성 평가

연삭 가공된 비구면 렌즈의 형상정밀도를 측정된 결과 표면 거칠기가 형상정밀도에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 연삭 가공 후 표면 거칠기가 좋지 않은 비구면 렌즈에 대해서 형상 정밀도를 측정하면 그 데이터 값에 표면 거칠기 값이 반영이 된다. 즉 표면 거칠기가 좋으면 서브 마이크론의 형상정밀도를 얻을 수 있다. 따라서 보다 더 소프트한 연삭 스톨을 사용하여 형상정밀도를 향상시키기 위한 실험을 수행하였다. 연삭스톨의 입자크기는 $6\mu\text{m}$ 이고 결합도는 중간 정도인 N이며, 집중도는 $130\text{mg}/\text{cm}^3$ 이며, 결합제는 레진본드를 사용하였다. Fig. 9는 비구면 연삭 가공을 하고 난 후의 형상정밀도를 보여주고 있다. Fig. 9 (a)는 $10\mu\text{m}$ 입자 크기를 가지는 레진본드 다이아몬드 스톨로 가공을 한 형상을 보여주고 있는데 형상정밀도 P-V $2.89\mu\text{m}$ 의 결과를 얻었다. Fig. 9 (a)를 보게 되면 비구면 형상은 생성이 되었지만 취성이 강한 유리렌즈의 특성상 유리렌즈가 깨어져나가면서 표면 거칠기가 나빠졌다. 이러한 표면 거칠기의 영향을 받아서 형상정밀도가 나쁘게 나타났다. Fig. 9 (b)는 $6\mu\text{m}$ 입자 크기를 가지는 레진본드 다이아몬드 스톨로 가공을 한 형상을 보여주고 있으며 형상정밀도 P-V $0.6\mu\text{m}$ 의 결과를 얻었다. Fig. 9 (a)에서 보였던 거친 표면 형상이 없어지면서 매끄러운 가공형상 표면이 된 것을 볼 수 있고 이로 인해 형상정밀도도 좋아진 것을 알 수 있었다.



(a) grain size: $10\mu\text{m}$



(b) grain size: $6\mu\text{m}$

Fig. 9 Profile accuracy after aspheric surface grinding (feedrate : $2\text{mm}/\text{min}$, wheel rotation speed : 8000rpm)

Fig. 10은 비구면 렌즈의 가공 재현성 평가를 위한 반복 정밀도를 보여주고 있다. 반복 정밀도 실험을 위해서 4개의 렌즈를 똑같은 조건에서 반복 실험을 수행하였다. $6\mu\text{m}$ 의 입자크기를 가지는 연삭스톨을 사용하였고, 연삭스톨 원주 속도는 $16.747\text{m}/\text{s}$ 이고, 공작물 회전속도는 $63\text{mm}/\text{s}$ 이다. 4개의 렌즈를 가공한 결과 비슷한 경향을 보였으며 형상정밀도 P-V $0.6\mu\text{m}\sim 0.93\mu\text{m}$ 의 범위로 나타났다. Fig. 11은 비구면 가공면의 표면 거칠기를 나타내고 있으며 $Ra\ 0.006\mu\text{m}$ 의 경면을 얻었다.

4.5 실험계획법 및 최적가공조건선정

본 연구에서는 비구면 렌즈를 가공하기 위한 최적 연삭 조건을 얻기 위해 가공 조건 변화에 따른 비구면 렌즈의 표면 거칠기와 형상정밀도 살펴보았다. 가공조건은 연삭스톨 회전속도, 공작물 회전속도, 이송속도를 변화시켰고 가공 정밀도로는 비구면 렌즈 가공 현장에서 가장 일반적으로 사용

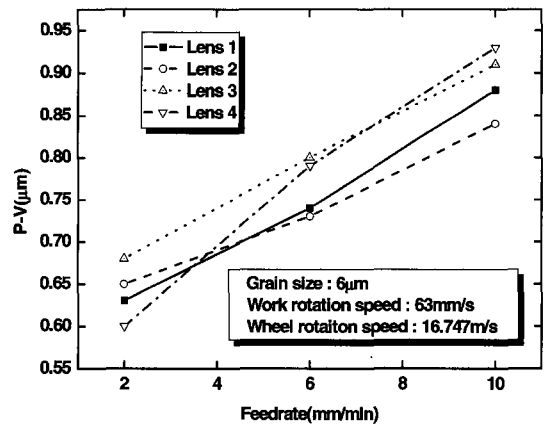


Fig. 10 Feedrate vs profile accuracy

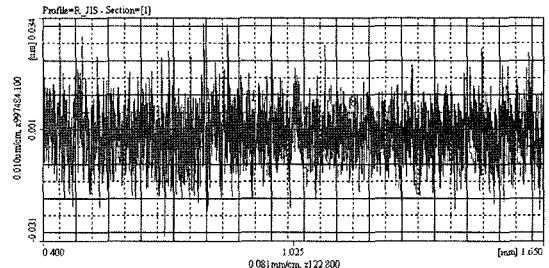


Fig. 11 Measured surface profile of aspheric surface lens

하고 있는 P-V값을 살펴보았다. 실험은 연삭숫돌 회전속도, 공작물 회전속도, 이송속도의 3가지 인자에 대한 2수준으로 완전요인배치(Full Factorial)로 실험을 수행하였다. 총 실험 회수는 8회이나 2회 반복실험을 수행하였다. 실험순서는 Table 3과 같이 직교 배열표에 따라 실험을 수행하였고 각각의 인자에 대한 수준의 값은 Table 4와 같다.

요인분석은 먼저 적당한 모델을 찾아야 한다. 그리고 요인 그림(factorial plots)을 사용하여 주효과(main effect)와 교호작용 효과(interaction effect)를 보고, 최적 인자의 조건을 찾는다.

Table 3 Orthogonal array table

Run order	Wheel speed	Work speed	Feedrate
1	1	1	1
2	1	-1	1
3	-1	1	1
4	1	1	-1
5	-1	1	-1
6	-1	-1	-1
7	1	-1	-1
8	-1	-1	1

Table 4 Factors and levels used in experiment

Sign	Factor	Low level(-1)	High level(1)
A	Wheel speed	50,000rpm	80,000rpm
B	Work speed	90rpm	300rpm
C	Feedrate	3mm/min	10mm/min

Pareto Chart of the Standardized Effects

(response is Ra, Alpha = .10)

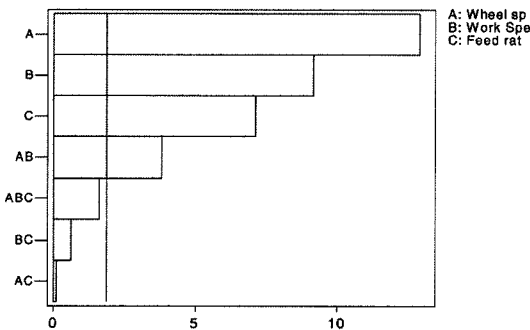


Fig. 12 Pareto chart of effects on Ra

Fig. 12는 표면 거칠기에 대한 파레토 그림 분석을 보여주고 있다. 파레토 그림을 보면 중간에 수직선이 유의수준 0.1로 그린 유의선이다. 즉 수직선 보다 큰 인자는 유의수준 0.1에서 유의함을 뜻한다. 따라서 A(휠 속도), B(공작물 속도), C(이송속도), AB가 유의한 것으로 나타났고, 나머지는 유의하지 않은 것으로 나타났다. 여기서 C(이송속도) 인자와 관련된 교호작용은 모두 유의하지 않다. 이를 정규 확률 그림으로 분석한 결과를 Fig. 13에서 보여주고 있다. 여기서 보여주는 수치는 각 인자별로 높은 수준에서 낮은 수준을 뺀 값이다. 즉, 이 그림에서 유의하지 않은 효과는 직선 근처에 모인다. 이는 수준이 변해도 별로 변하지 않는다는 의미이다. 중앙의 직선과 멀리 떨어질수록 크게 유의한다는 의미이다.

Fig. 14로부터 알 수 있듯이 본 연구의 실험 조건 범위에서 표면 거칠기를 최소화 할 수 있는 요인 및 수준의 조합은 A(1)B(1)C(-1)로 나타났다. 주축 회전속도와 공작물 회전속도가 낮아지면 연삭력이 커지기 때문에 표면 거칠기에 나쁜 영향을 미치는 것으로 보여 진다.

Fig. 15와 Fig. 16에서 보듯이 형상 정밀도에 영향을 미치

Normal Probability Plot of the Standardized Effects

(response is Ra, Alpha = .10)

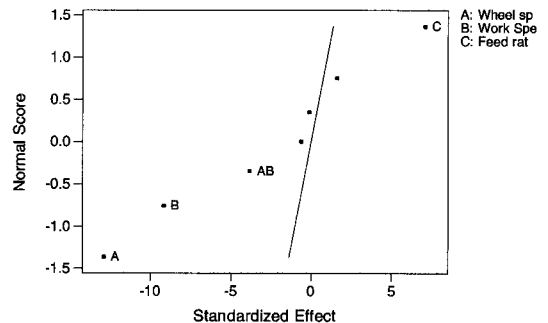


Fig. 13 Normal probability plot of effect on Ra

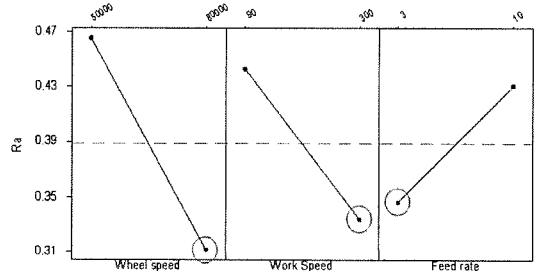


Fig. 14 Main effect plot for Ra

는 요인들도 표면 거칠기와 마찬가지로 파레토 그림 분석과 정규 확률 그림 분석을 통하여 분석하였다. 여기서, 형상 정밀도에 유의하지 않은 인자로는 B, BC로 나타났다. Fig. 17은 형상정밀도에 영향을 주는 주효과(main effect)를 나타내는 그래프이다. 분석 결과 연삭 주축 회전속도가 형상 정밀도에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났고, 공작물 회전

속도와 이송속도는 상대적으로 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 본 실험 범위 내에서 주축 회전 속도와 공작물 회전속도가 가장 빠르고 이송 속도가 가장 느릴 때 최적의 가공 조건을 찾을 수 있었다. 이러한 결과는 주축과 공작물 회전속도가 높아지면서 연삭력이 작아지고, 이송속도가 너무 빠르면 연삭력이 커지고, 주축의 탄성변형으로 인해 형상 정밀도가 나쁘게 나타났다고 보여 진다.

Pareto Chart of the Standardized Effects
(response is P-V, Alpha = .10)

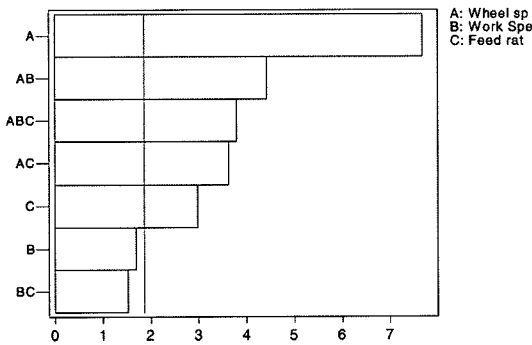


Fig. 15 Pareto chart of effects on P-V

Normal Probability Plot of the Standardized Effects
(response is P-V, Alpha = .10)

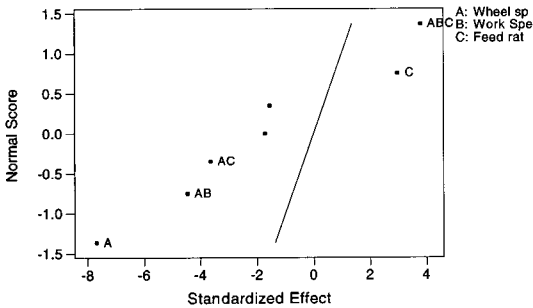


Fig. 16 Normal probability plot of effect on P-V

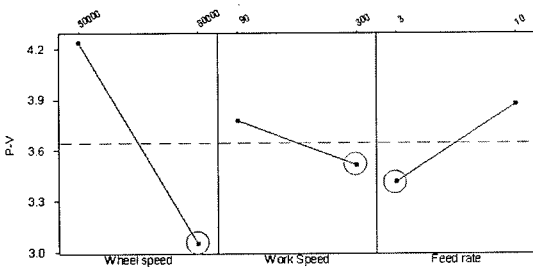


Fig. 17 Main effect plot for P-V

5. 결론

본 연구에서는 카메라 폰에 사용되는 초정밀 비구면 마이크로 렌즈 가공기를 개발하였고, 초정밀 비구면 마이크로 렌즈 개발을 위한 가공 특성을 평가 및 최적의 가공조건을 선정하는 것으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 공구와 공작물의 접선을 계산하면 공구의 중심위치를 알 수 있고 비구면 표면의 접촉각을 알면 접선을 가지고 중심까지의 거리를 계산해서 가공 경로를 생성하였다.
- (2) 20 μ m의 입자크기를 가지는 연삭숫돌을 이용하여 이송 속도를 0.5mm/min~3.0mm/min로 증가시켜 가며 연삭 가공을 한 결과, 표면 거칠기가 나빠짐을 알 수 있었고, 반면에 연삭숫돌 회전속도와 공작물 회전속도가 증가할 수록 좋아지는데 연삭 회전속도가 약 17m/s일 때 표면 거칠기가 약 0.35 μ m를 얻었고 공작물 회전 속도가 약 210mm/s일 때 약 0.36 μ m 값을 얻었다.
- (3) 같은 연삭 가공 조건에서 비트리파이드 본드 다이아몬드 휠과 레진 본드 다이아몬드 휠을 사용한 결과 레진 본드 다이아몬드 휠이 표면 거칠기에 더 좋은 효과를 나타내었다.
- (4) 연삭 가공면의 표면 거칠기에 영향을 미치는 인자는 A (주축회전속도), B(공작물회전속도), C(이송속도), AB 순으로 나타났으며, 최적의 가공조건은 연삭 주축회전 수 80,000rpm, 공작물 회전수 300rpm, 이송속도 3mm/min로 나타났다.
- (5) 6 μ m의 입자크기를 가지는 레진본드 다이아몬드 연삭숫돌로 연삭 가공한 결과 이송속도 2mm/min, 공작물 회전 속도 63mm/s, 연삭숫돌 원주 속도 16.747m/s 일 때 형상정밀도 P-V 0.6 μ m, 표면 거칠기 Ra 0.006 μ m을 달성하였다.

후기

이 논문은 인하대학교의 지원에 의해 연구되었음.

참 고 문 헌

- (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., Sakura, E., Tanaka, T., Takeda, H., Kuriyagawa, T. and Shoji, k., 1998, "Study on Precision Grinding of Micro Aspherical Surface," *JSPE*, Vol. 64, No. 4, pp. 619~623.
- (3) Hyun, D. H. and Lee, S. J., 2003, "A Study on Grinding Characteristics of Aspherical Glass Lens Core of High-pixel Digital Camera in Diamond Grinding Process," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 12, No. 2, pp. 31~36.
- (4) Yang, M. Y. and Lee, T. M., 1997, "New Biarc Interpolation for Ultra-precision Aspheric Surface Machining," *Proc. ASPE Annual Meeting*, pp. 195~198.
- (5) Arnold, J. B., Sterger, P. J. and Saito, T. T., 1975, "Tool Feed Influence on the Machinability of CO₂ Laser Optics," *Applied Optics*, Vol. 25, pp. 1777~1782.
- (6) Baek, S. Y., Lee, E. S. and Lee, H. D., 2005, "A Study on the Characteristic of Ultraprecision Grinding Machining Considering Ultra-fine Surface and 3D Contour Accuracy of Aspherical Surface Micro Lens," *Proc of 5th EUSPEN International Conference*, Vol. 1, pp. 33~36.
- (7) Foreman, J. W. and Jr., 1986, "Simple Numerical Measure of the Manufacturability of Aspheric Optical Surfaces," *Applied Optics*, Vol. 25, pp. 826~827.
- (8) Doughty, G. and Smith, J., 1987, "Microcomputer-controlled polishing machine for very smooth and deep aspherical surfaces," *Applied Optics*, Vol. 26, No. 26, pp. 2421~2426.