

소형 비구면 렌즈 금형의 경면 연삭 가공에 관한 연구

이주상*, 佐伯優**, 厨川常元***, 庄司克雄***

A Study on the Mirror Grinding for Mold of a Small Aspherical Lens

Joo-Sang Lee*, Masaru Saeki**, Tsunemoto Kuriyagawa***, Katsuo Syoji ***

ABSTRACT

This paper deals with mirror grinding of a small-sized aspherical lens by the resin bonded diamond spherical wheel. Up to now, a spherical lens has been used for the lens of the optical communication optical part. However, recently, the aspherical optical parts are mainly used in order to attempt the improvement in image quality and miniaturization of the optical device. It is possible to manufacture the aspherical lens which is presently being used in optical instrument through ultra-precision machinery technology. Also, to realize compactability, efforts are being made to produce a micro aspherical lens, for which the development of a high-precision, micro molding die is inevitable. Therefore, extensive research is being done on methods of producing an micro aspherical surface by high-precision grinding. In this paper, the spherical wheel was trued by cup-type truer and tool path was calculated by the radius of curvature of wheel after truing and dressing. And then in the aspherical grinding experiment, WC material which is used as a molding die for the small-sized aspherical lens was ground. It results was that a form accuracy of $0.1918\mu\text{m}$ P-V and a surface roughness of $0.064\mu\text{m}$ Rmax.

Key Words : Mirror grinding (경면 연삭), Aspherical lens (비구면 렌즈), Spherical wheel (구면 스톨), Cup-type truer (컵형 트루어), Truing (트루잉), Dressing (드레싱), Form accuracy (형상정밀도)

기호설명

D_s = Diameter of cup-type wheel
 θ_s = Tilt angle between spherical lens and cup-type wheel
 R_s = Generated radius of spherical lens
 R = Generated radius of spherical wheel
 D = Diameter of cup-type truer
 θ = Tilt angle between truer and spherical wheel

$Z_2(i)$ = Corrected aspherical form coordinate
 $Z_1(i)$ = Ground aspherical form coordinate
 $EC(i)$ = Aspherical form error

1. 서론

현재, 산업 발달에 따라 비디오 캠코더, 디지털 카메라 등이 생활에 급속하게 보급되고 있으며 이러한 기기의 성능 향상에 소비자들의 관심이 높아지고 있다. 따라서 광학 부품의 고정밀도화, 소형

2001년 4월 23일 접수
 * 남부대학교 자동차기계공학부
 ** 日本 olympus 光學
 *** 日本 東北大學 大學院 工學研究科

경량화 그리고 고기능화가 필수적으로 요구되고 있다. 렌즈의 성능 향상은 이러한 요구를 만족시키는 가장 중요한 요소 중의 하나이다. 오늘날의 광학계는 구면 렌즈 광학계로부터 비구면 렌즈 광학계로 변하고 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 렌즈 조합을 필요로 하지 않으며 높은 투과율이 얻어지는 등 많은 장점이 있다. 따라서 비구면 렌즈의 채용은 광학 디바이스의 소형화, 경량화 그리고 고성능화를 위하여 필수적이다. 이와 같이 비구면 렌즈를 사용하는 것이 많은 장점이 있는 것은 이전부터 알려져 있는 사실이지만 설계 및 제조상의 어려움 때문에 오랜 기간의 경험에 따른 근사해를 갖는 구면 렌즈를 사용하여 왔다. 그러나 이제는 절삭, 연삭에 의한 비구면 가공법과 초정밀 비구면 가공기의 개발에 따라 기계 가공에 의하여 비구면 렌즈의 제조가 가능하게 되었다.⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾

현재 비구면 렌즈의 제작 방법에는 여러 가지 방법이 개발되어 있으나 초경, 고경도강, 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 일반적인 방법으로 알려져 있다. Table 1에 일반적인 비구면 광학부품의 동향과 가공 방법에 대하여 나타내었다. 현재까지의 비구면 광학부품에 대한 연구는 지름 10mm 이상의 비교적 큰 렌즈를 대상으로 진행되어 왔으나 점차 광학계의 마이크로화에 따른 마이크로 비구면 광학부품의 연구 및 개발의 중요성이 높아지고 있다.⁽⁶⁾ 그러나 아직 마이크로 비구면 연삭 가공에 적합한 숫돌의 개발, 트루잉과 드레싱 기술 확보, 연삭 가공에 의한 비구면의 높은 형상정밀도와 표면거칠기의 실현 등의 문제들에 대한 명확한 해석은 충분히 보고되고 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 마이크로 비구면 연삭 가공 기술을 확보하기 위한 예비 단계로 컵형 트루어를 이용하여 소형 다이아몬드 구면 숫돌을 구면 창성법에 의하여 트루잉하였다. 그리고 얻어진 구면 숫돌의 곡률 반경에 기초하여 공구 운동 체적을 구하고 소형 비구면 렌즈 금형에 대한 초정밀 경면 연삭 가공을 실시하여 실험 결과로 얻어진 형상 정밀도와 표면거칠기를 평가하고 보고한다.

2. 비구면 렌즈 가공 시스템

2.1 비구면 렌즈의 일반식

비구면 렌즈의 설계 원리는 렌즈의 각 반경 위치에 따라서 렌즈의 굴절율과 입사각을 고려하여 광로 추적을 실시하고 최적의 결상이 얻어지는 렌즈 표면의 좌표군 (X,Z)의 해를 구하고 최소자승법에 의하여 비구면 다항식으로 근사하는 것이다. 일반적으로 사용되고 있는 축대칭의 비구면 렌즈 형상은 다음과 같은 식으로 표시된다.

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

X는 비구면 축으로부터의 수평 방향 거리이며 Z는 비구면 축 방향의 위치이다. 제1항은 구면 항이고 제2항은 구면 항에 대한 수정량 즉, 비구면 항에 해당한다. 여기서 k는 원추(圓錐)정수이며 C_v는 비구면의 곡률 기준 반경을 나타내는 계수이다. C_i(i=1~m)는 최적의 결상을 맺기 위해 광로 추적을 통하여 구해지는 비구면 항의 비구면 계수이다.

2.2 가공 시스템

Table 1 The general tendency of aspherical parts

Optical Component	Material	Form Accuracy (μm P-V)	Surface Accuracy (nm Rmax)	Machining Method
CD, Camera Lens	Plastic	0.1~1	10~30	Injection molding
Laser Mirror	Cu, Al	1~5	30~100	Cutting
Infrared Lens	Si, Ge, ZnS	0.3~1	20~30	Cutting, Grinding
CD, Camera Lens	Glass	0.1~1	10~30	Grass pressing
Telescope Mirror	Glass	5~50	10~30	Grinding → Polishing
Lithography Lens	Glass	0.1~0.2	5~10	Grinding → Polishing

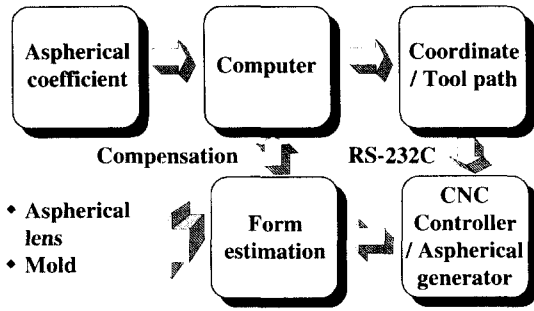


Fig. 1 Mirror grinding process of aspherical lens

비구면 렌즈의 가공 프로세스는 크게 공구 좌표 생성, 비구면 가공, 보정 가공의 3가지 영역으로 구성되어 있다. 먼저 비구면 렌즈 형상의 (X, Z) 좌표를 식(1)에 의하여 구하고 스톨의 곡률 반경에 따른 공구 경로를 구한다. 구해진 공구 경로를 NC 코드화하고 NC 데이터를 RS-232C 송신으로 CNC 콘트롤러에 전송한다. 비구면 가공기는 CNC 제어로 연삭 가공을 실시하고 가공된 비구면 렌즈는 형상 측정기에 의하여 형상 정밀도 및 표면거칠기로 평가된다. 가공된 비구면 렌즈는 목표로 하는 형상 정밀도를 얻기 위하여 몇 차례 보정 가공을 실시한다. Fig. 1은 비구면 렌즈의 초정밀 연삭 가공 시스템의 개략도이다.

2.3 구면 스톨의 트루잉과 공구 경로

본 연구에서는 구면 스톨의 공구 궤적을 스톨의 중심 좌표와 비구면 형상의 관계에서 결정하였다. 비구면 가공은 일정한 반경 R 을 갖는 구면 스톨의 궤적에 의하여 이루어지며 오목형 렌즈의 경우 스톨의 곡률 반경은 비구면 면의 최소 곡률 반경보다 작아야 한다. 따라서 스톨의 반경은 비구면 형상에 따라 결정되며 그 형상 정밀도는 중요한 요인이다. 본 실험에서는 스톨 반경을 컵형 트루어를 사용하여 CG(curve generator)가공의 원리를 이용한 CG 트루잉법을 이용하여 생성하였다. CG 가공법은 컵형 스톨을 사용하여 구면 렌즈를 생성하는 방법으로 Fig. 2(a)에 창성 원리를 나타내었다. 스톨의 지름과 공작물 경사각의 관계에서 구면 렌즈의 반지름을 정할 수 있다. D_s 는 컵형 스톨의 지름, θ_s 는 렌즈에 대한 스톨의 기울기이며 R_s 는 창성된 구면 렌즈의 반경이다. 이와 같은 원리를 이용하여 컵형 트루어로 구면 스톨을 트루잉 하였다. Fig. 2(b)는 CG

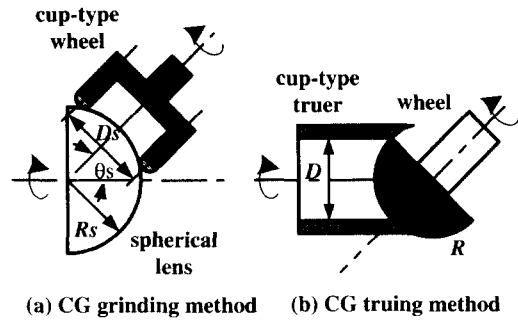


Fig. 2 A schematic diagram of CG grinding and CG truing method

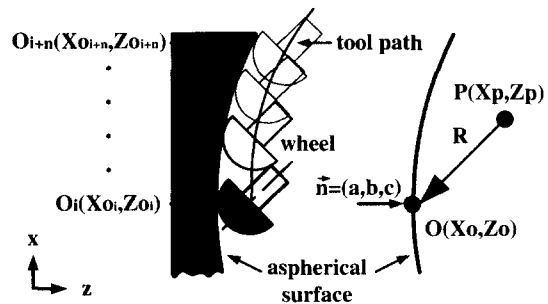


Fig. 3 A schematic diagram of wheel movement and tool path in the aspherical grinding

트루잉법의 개략도를 나타내고 있다. 컵형 트루어와 창성되는 구면 스톨의 반경의 관계는 식(2)와 같이 표시할 수 있다.

$$R = \frac{D}{2 \sin \theta} \quad (2)$$

여기서 R 은 창성되는 구면 스톨의 반경, D 는 컵형 트루어의 지름, θ 는 트루어와 스톨의 경사각이다.

Fig. 3은 비구면 형상 가공시 구면 스톨의 운동과 공구 경로의 계산을 나타내고 있다. 구면 스톨은 초기 가공 개시점 $O_i(X_{o_i}, Z_{o_i})$ 에서 가공 종료점 $O_{i+n}(X_{o_{i+n}}, Z_{o_{i+n}})$ 까지 계산된 가공 경로를 따라 X, Z 의 2축 NC 제어로 운동된다.

축대칭의 비구면 형상 함수는 $Z = f(X)$ 로 표시되고 가공점 $O(X_o, Z_o)$ 에서의 법선 벡터는 다음과 같이 표시된다.

$$\vec{n}(a, b, c) = \left(-\frac{\partial f}{\partial X}, -\frac{\partial f}{\partial Y}, 1 \right) \quad (3)$$

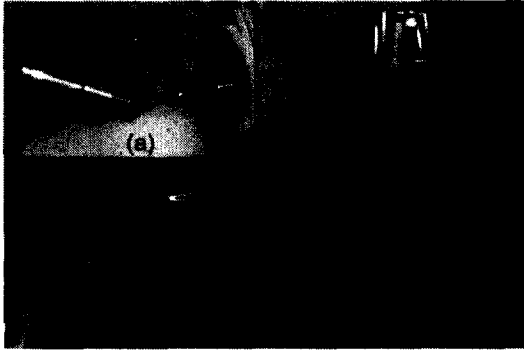


Fig. 4 Photograph of ultra-precision aspherical surface generator

따라서 가공점과 스톨 중심의 거리 즉, 구면 스톨의 반경이 R 로 주어지면 구면 스톨의 원호 중심 $P(X_p, Z_p)$ 의 좌표는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{cases} X_p = X_o + \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \cdot R \\ Z_p = Z_o + \frac{c}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \cdot R \end{cases} \quad (4)$$

3. 실험 및 결과

3.1 실험 장치 및 방법

Fig. 4는 본 실험에서 사용된 초정밀 비구면 가공기(ULG-100A(T), Toshiba Co.,Ltd)의 사진이다. 비구면 가공기는 스톨 축(X)과 공작물 축(Z)의 동시 2축 제어로 공기 정압 베어링 구동방식이며 위치결정 정밀도는 $0.01\mu\text{m}$ 이다. 계산된 공구 궤적을 NC 코드로 변환되고 RS-232C를 통하여 CNC 컨트롤러에 입력하고 비구면 가공을 수행하였다. Fig. 4의 (a)는 가공부의 확대 사진으로 왼쪽이 진공척에 장착된 공작물이며 오른쪽은 스톨이다.

가공된 비구면 형상은 선단 축침 반경 $2\mu\text{m}$ 인 레이저 간섭식 형상측정기(Form-Talysurf 402L, TaylorHobson Co.,Ltd)와 측정 분해능 $0.005\mu\text{m}$ 인 비접촉식 3차원 측정기(NH-3T, Mitaka Co.,Ltd)에서 측정하였다.

본 연구에 이용한 비구면 연삭 가공법은 구면 스톨의 곡률 반경 및 형상 정밀도가 가공된 비구면의 형상 정밀도에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 구면 스톨의 트루잉과 드레싱은 매우 중요하다. 본 실험에서는 2.3절에서 제시한 컵형 트루어에 의한

Table 2 Truing and dressing conditions

truing	truer	SD325B
	truer diameter	2 mm
	truer rotational rate	500 rpm
	wheel rotational rate	5000 rpm
dressing	feed rate	0.001 mm/min
	method	GC #2000 slurry
	time	7 min
	rotational rate	500 rpm

Table 3 Grinding conditions

wheel	SD3000P150BM1
size	5(D)× 16(T)× 2.5(W)
wheel rotational rate	30000 rpm
feed rate	1 mm/min
depth of cut	0.001 mm/pass
work rotational rate	500 rpm
coolant	soluble type

Table 4 Coefficient of aspherical lens and coordinate

	coefficient of aspherical lens	x-axis coordinate (mm)	z-axis coordinate (mm)	normal angle (Deg.)
R	1.99418	0.000	0.000000	0
k	-2.5	0.200	0.010033	5.731
C ₂	0.00000E-00	0.400	0.040178	11.376
C ₄	2.59920E-02	0.600	0.090580	16.858
C ₆	-4.08240E-03	0.800	0.161489	22.115
C ₈	7.52520E-04	1.000	0.253248	27.092
C ₁₀	-1.25120E-04	1.200	0.366213	31.726

GC 트루잉법을 이용하여 구면 스톨의 트루잉을 실시하였다. 공작물 축에 컵형 트루어를 장착하고 스톨 축에 구면 스톨을 장착하고 X, Z축 이동에 의하여 트루잉 개시점까지 이동한 후 트루잉 하였다. 트루잉된 구면 스톨은 트루잉 종료 좌표에서 이송량의 변화없이 트루어와 구면 스톨 사이에 입도 #2000의 GC 슬러리를 주입하여 래핑 효과에 의한 드레싱을 실시하였다. 이때 스톨은 GC 슬러리와

간섭에 의하여 무동력 회전을 한다. Table 2에 트루잉과 드레싱 조건을 나타내었다. 트루잉과 드레싱을 실시한 구면 스톨을 카본판에 전사하고 형상 측정기에서 반경과 형상 정밀도를 측정하였다. 본 실험에서는 반경 1.41mm와 형상 정밀도 3.4136μm를 갖는 구면 스톨을 창성하고 공구 궤적 계산에 이용하였다.

비구면 가공에 사용한 재료는 광픽업 렌즈성형용 초경 합금으로 공작물 축에 장착하고 구면 스톨과 접촉시킨다. 접촉점은 가공 기준점이 되고 Table 3의 가공조건에 의하여 가공하였다. 스톨은 일본 Noritake사의 입도 #3000의 미소 레진분트 다이아몬드 구면 스톨을 사용하였다. Table 4는 본 실험에 이용된 광픽업 렌즈의 비구면 계수, 비구면의 X, Z 좌표와 각 가공점에서의 법선각을 나타내고 있다.

3.2 실험 결과

비구면 가공후 형상 정밀도 및 표면거칠기는 레이저 간섭식의 형상 측정기(Form Talysurf-120L)와 3차원 비접촉식 측정기에서 측정하였다.

Fig. 5는 비구면의 형상 정밀도 P-V 0.2477μm의 가공 결과를 나타낸 것이다. 렌즈의 중심 부분에 가공 오차가 발생하고 있다. 이러한 원인은 가공전의 스톨과 공작물의 위치 결정 오차와 가공후의 구면 스톨의 마모에 따른 스톨 반경의 오차에 의하여 발생된다고 할 수 있다. 따라서 형상 측정기에서 측정된 가공 형상 데이터를 최초의 비구면 형상 데이터와 비교하여 보정 계산하고 산출된 보정 데이터에 의한 보정 가공을 실시할 필요가 있다. 보정 방법은 Z축 방향의 형상 오차를 비구면 형상 좌표에서 제거하는 것으로 식(5)와 같이 표현할 수 있다.⁽⁷⁾

$$Z_2(i) = Z_1(i) - EC(i) \quad (5)$$

여기서 $Z_2(i)$ 는 보정된 형상 좌표이며 $Z_1(i)$ 은 가공된 형상 좌표이다. 또한 $EC(i)$ 는 형상 오차이다.

Fig. 6은 1차 비구면 가공 후 얻어진 형상 데이터(Fig. 5)의 오차를 계산하고 보정 가공을 실시하여 최종적으로 얻어진 비구면 렌즈 금형의 형상 정밀도로서 P-V 0.1918μm를 나타내고 있다. Fig. 7은 가공된 비구면 렌즈 금형의 표면거칠기를 나타낸 것으로 Rmax 0.064μm의 경면 가공이 이루어진 것을 확인 할 수 있었다. Fig. 8은 3차원 비접촉식 측정기에서 측정된 소형 비구면 렌즈 금형의 3차원

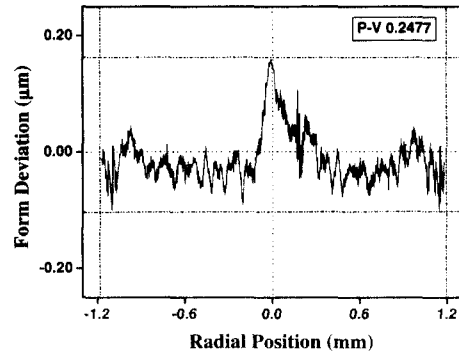


Fig. 5 Form deviation profile of aspherical surface after primary grinding

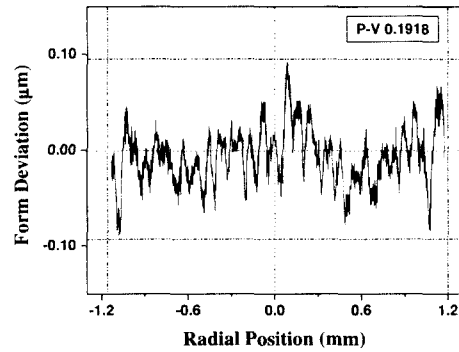


Fig. 6 Form deviation profile of aspherical surface after compensation grinding

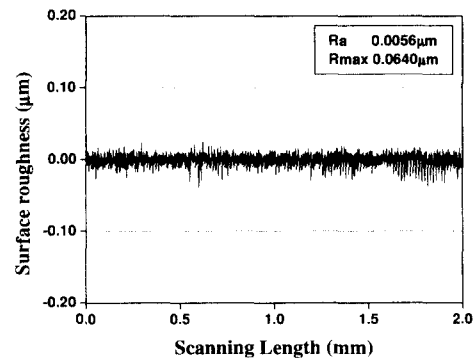


Fig. 7 Surface roughness profile of aspherical surface after mirror grinding

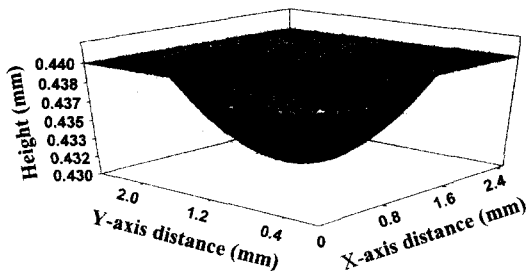


Fig. 8 3-dimensional form of mold for small-sized aspherical lens by noncontact 3-D measuring apparatus (NH-3T)

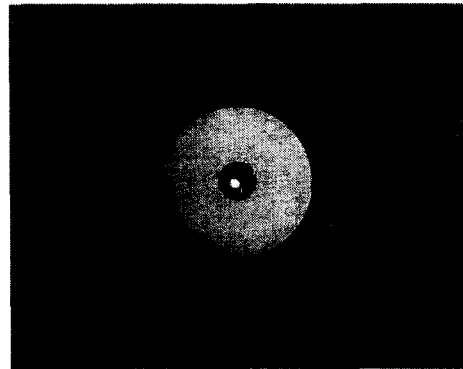


Fig. 9 Photograph of mold for small-sized aspherical lens

형상이며 Fig. 9는 가공된 직경 2.4mm의 소형 비구면 오목 렌즈의 금형 사진이다.

4. 결론

본 논문에서는 소형 구면 스톱들을 이용하여 광 픽업용 소형 비구면 렌즈의 금형 가공에 대한 연구를 실시하였다.

1. 기계 시스템과 광학 기기의 정밀도 향상과 소형화에 따른 비구면 렌즈의 마이크로화에 대한 연구 단계로 지름 2.4mm의 소형 비구면 렌즈 금형의 연삭 가공을 실시하였다.

2. 컵형 트루어를 이용한 GC 트루잉법에 의하여 소형 구면 스톱들을 트루잉하고 창성된 구면 스톱들의 곡률 반경과 비구면 형상 좌표에 의하여 스톱들 레적을 계산하고 초정밀 연삭 가공을 실시하였다.

3. 비구면 연삭 가공과 오차 보정 가공을 통하여 형상 정밀도 P-V 0.1918 μ m과 표면거칠기 Rmax 0.064 μ m의 경면 가공을 달성하였다.

후기

본 논문은 한국과학재단의 "1999년도 후반기 해외 post-doc. 연수지원사업"의 연구결과로 관계자에게 감사드립니다.

참고문헌

1. Suzuki, H., Hara, S., and Matsunaga, H., "Study on Aspherical Surface Polishing Using a Small

Rotating Tool," Journal of the japan society for precision engineering, Vol. 59, No. 10, pp. 1713~1718, 1993.

2. Itoh, S., "Study on Measurement of Axi Symmetrical Form Generated by Ultra-Precision Machining(3rd Report)," Journal of the japan society for precision engineering, Vol. 61, No. 3, pp. 391~395, 1995.

3. Suzuki, H., Kodera, S., Nakasuji, T., Ohta, T., and Syoji, K., "Study on Aspherical Surface Polishing of Single Crystal Silicon Lens," Journal of the japan society for precision engineering, Vol. 63, No. 9, pp. 128~1284, 1997.

4. Suzuki, H., Kitajima, T., and Okuyama, S., "Study on Precision cutting of Axi-Symmetric Aspherical Surface," Journal of the japan society for precision engineering, Vol. 65, No. 3, pp. 401~405, 1999.

5. 김부태, "Aspheric Lens 금형개발," 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, PP. 43~47, 1992.

6. Suzuki, H., Kodera, S., Maekawa, S., Morita, N., Sakurai, E., Tanaka, T., Takeda, H., Kuriyagawa, T., and Syoji, K., "Study on Precision Grinding of Micro Aspherical Surface," Journal of the japan society for precision engineering, Vol. 64, No. 4, pp. 619~623, 1998.

7. Suzuki, H., Kodera, S., Sugimoto, K., and Ohta, T., "Development of an On-machine Aspherical Form Measurement System," Journal of the japan society for precision engineering, Vol. 61, No. 11, pp. 1594~1598, 1995.