

## 비구면 광학부품의 초정밀 가공에 관한 연구

이주상\*, 庄司克雄\*\*

### A Study on Ultra Precision Machining for Aspherical Surface of Optical Parts

Joo Sang Lee\*, Katsuo Syoji\*\*

#### ABSTRACT

This paper deals with the precision grinding for aspherical surface of optical parts. A parallel grinding method using the spherical wheel was suggested as a new grinding method. In this method, the wheel axis is positioned at a  $\pi/4$  from the Z-axis in the direction of the X-axis. An advantage of this grinding method is that the wheel used in grinding achieves its maximum area, reducing wheel wear and improving the accuracy of the ground mirror surface. In addition, a truing by the CG (curve generating) method was proposed. After truing, the shape of spherical wheel transcribed on the carbon is measured by the Form-Talysurf-120L. The error of the form in the spherical wheel which is the value  $\Delta x$  and  $R_y^2$  inferred from the measured profile data is compensated by the re-truing. Finally, in the aspherical grinding experiment, the WC of the molding die was examined by the parallel grinding method using the resin bonded diamond wheel with a grain size of #3000. A form accuracy of  $0.16\mu\text{m}$  P-V and a surface roughness of  $0.0067\mu\text{m}$  Ra have been resulted.

**Key Words** : Mirror surface (경면), Aspherical surface (비구면), Curve generating method (CG, 구면생성법), Spherical wheel (구면숫돌), Form accuracy (형상정밀도), Surface roughness (표면거칠기)

#### 기호설명

$Z(X)$  = form profile for aspherical surface with an axis of symmetry

$P(X_R, Y_R, Z_R)$  = grinding point

$R(X_R, Y_R, Z_R)$  = a circular arc center of wheel

$C_v, C_i$  = aspherical coefficient

$\kappa$  = a cone constant

$X$  = position of radius direction

$d$  = radius of cup-type truer

$\theta$  = tilt angle between truer and wheel

$r$  = distance from grinding point to the center of wheel

$R_L$  = radius of spherical wheel

$\Delta x, \Delta y$  = position error between truer and wheel at truing and dressing

2002년 3월 7일 접수  
\* 남부대학교 자동차기계공학부  
\*\* 日本 東北大學 大學院 工學研究科

### 1. 서론

최근 기계가공 분야의 주요 관심은 세라믹스와 반도체 등의 경질재료를 중심으로 가공정밀도 향상에 대하여 어떻게 유효하게 대처하는가 하는 문제이다. 지금까지의 관점으로는 가공정밀도를 우선적으로 고려하면 가공능률은 저하되는 사실이 일반적이었으나 최근의 기계가공에서는 이러한 반비례적인 조건을 동시에 만족시킬 것을 요구하고 있다. 또한 가공정밀도에 관한 요구 사항도 가공면의 표면거칠기의 향상 이외에 형상정밀도의 향상까지 포함되는 등 더욱 엄격하게 변하고 있다. 따라서 가공면의 표면거칠기와 높은 형상정밀도를 동시에 만족시키는 기계가공법이 개발되었으며 이것을 초정밀 경면가공이라고 한다. 이와 같은 경면가공법의 개발은 광학부품 등을 포함한 초정밀 부품을 기계가공을 통하여 생산 가능하게 하는 기계가공 분야의 획기적인 발전이라고 할 수 있다.<sup>(1)</sup>

현재, 멀티미디어 및 광통신 등의 새로운 산업이 주목되고 발전됨에 따라 이에 관련된 생산품들이 실생활에 급속히 보급되고 있다. 카메라, 디지털 캠코더, 현미경 등에 사용되는 렌즈는 그 제품의 성능을 결정하는 중요한 구성 요소 중 하나이며 그 성형기술은 매우 엄격하고 중요하다. 이제까지 광학부품의 렌즈에는 구(球) 또는 구면 형상의 렌즈가 이용되었으나 현재는 성능향상과 고정밀도를 높이기 위하여 렌즈의 비구면화가 진행되고 있으며 이것은 초정밀 경면가공 기술에 의하여 실현되고 있다.<sup>(2),(3),(4)</sup>

적외선 집광용의 실리콘 렌즈, 게르마늄 렌즈, 플라스틱 렌즈, 사출 성형용의 무전해 니켈 금형 그리고 레이저 반사용 거울 등의 비구면 광학부품은 절삭날이 원호 형상인 단결정 다이아몬드 바이트를 이용하여 CNC 제어절삭을 통한 극미소 절삭에 의해 고정밀도의 경면가공이 가능하다. 그러나 경질재료의 연성모드 절삭에 따른 어려움과 바이트 절삭날의 마모와 손상 등에 의하여 렌즈의 형상정밀도 및 가공면의 표면거칠기 등이 저하되는 경향이 있기 때문에 절삭가공 후 연마가공을 통하여 경면을 생성하는 것이 불가피하다. 그러나 연마가공은 구면과 평면 등의 기하학적으로 비교적 간단한 형상에서는 고정밀도의 경면이 얻어지지만 원통면 또는 복잡한 비구면 형상에는 적합하지 않다. 그러므로 연마가공이 필요하지 않는 연삭가공 만으로의

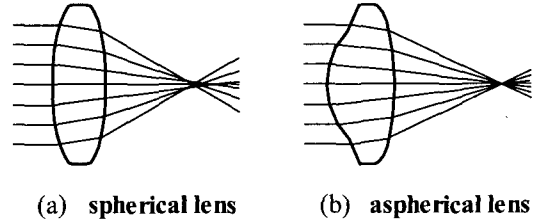


Fig. 1 Schematic diagram of spherical lens and aspherical lens

비구면 렌즈의 경면가공이 요구되고 있다.<sup>(5)</sup>

현재 비구면 렌즈의 가공에 다이아몬드 슛들을 이용한 초정밀 경면연삭이 주로 사용되고 있다. 이제까지의 가공법으로는 V 형상 다이아몬드 슛들을 이용하여 슛들 축이 공작물에 대하여 수직인 가공방식이 채용되어 왔으나 이 방법은 렌즈의 외경에 비하여 곡률 반경이 작은 오목형상의 비구면 렌즈를 가공할 때에는 슛들 축과 렌즈의 최외주부(最外周部) 사이에 간섭이 발생하는 문제가 있다. 따라서 새로운 연구개발이 요구되었고 슛들 축을 공작물에 대하여  $\pi/4$ 만큼 경사지게 하는 방법이 개발되었다. 이 방법은 구면형상의 다이아몬드 슛들을 이용하여 곡률 반경 800 $\mu$ m의 비구면 렌즈의 초정밀 경면가공을 가능하게 하였다.<sup>(6),(7),(8),(9)</sup>

본 연구에서는 새롭게 개발된 연삭방법에서 슛들의 트루잉 정밀도와 공작물 축과 슛들 축과의 축결합 정밀도가 비구면 형상 정밀도에 큰 영향을 미친다는 사실에 주목하여 비구면 렌즈가공에 사용되고 있는 CG(curve generating)법을 이용하여 구면 슛들의 트루잉과 드레싱법을 제안하고 트루잉시 슛들의 형상오차 보정에 대한 연구와 비구면 렌즈 금형에 사용되는 초경합금을 이용하여 비구면 연삭가공을 수행하였다.

### 2. 비구면 렌즈

렌즈가 역사상 최초로 등장한 것은 중세시대였으며 망원경에 적용되었다. 당시의 렌즈는 구면의 볼록 형상의 유리 렌즈였다. 그 후 1970년대까지 카메라, 현미경, 레이저 응용기구, 반도체 장치 등 거의 모든 광학기구에는 구면형상의 렌즈나 반사경이 사용되어 왔다. 그러나 구면 렌즈로는 구면수차 등의 에러가 발생하는 등 광학적으로 충분한 성능

이 얻어지기 어렵다. 구면수차의 에러 보정에 비구면 렌즈를 사용하는 것이 광학계의 설계에서 많은 장점이 있는 것은 이전부터 알려져 있는 사실이나 설계 및 제조상의 어려움 때문에 오랜 기간의 경험에 따른 근사해를 갖는 구면 형상을 사용하거나 여러 종류의 렌즈조합에 의하여 에러를 보정하여 왔다. 그러나 현재는 고성능, 고기능의 다양한 광학기구가 개발됨에 따라서 광학계의 복잡화에 따른 광학부품의 비대화, 고가화 그리고 투과율의 저하 등에 대한 해결 방안이 요구되었고 가공기술의 개발과 발전에 힘입어 비구면 광학부품을 이용한 새로운 광학계가 개발되고 있다. Fig. 1은 구면 렌즈와 비구면 렌즈의 집광점에서 초점 결상의 차이를 나타내고 있다.

비구면 렌즈의 설계원리는 광학부품의 각 반경 위치에 따라서 렌즈의 굴절율과 입사각을 고려하여 광로추적을 실시하고 최적의 결상이 얻어지는 광학부품 표면의 좌표군  $(X, Z)$ 의 해를 구하고 최소사승법에 의하여 비구면 다항식으로 근사하는 것으로 현재 일반적으로 사용되고 있는 축대칭의 비구면 형상은 다음과 같은 식으로 표시된다.

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

$X$ 는 공작물의 반경 방향의 위치이며  $Z$ 는 회전축 방향의 위치이다. 제1항은 구면 항이고 제2항은 구면 항에 대한 수정량으로써 비구면 항에 해당한다. 식(1)에서  $k$ 는 원추(圓錐)정수이고  $C_v$ 는  $1/R$ 로 표시할 수 있으며  $R$ 은 비구면의 곡률 기준반경이다.  $C_i (i=1 \sim m)$ 는 최적의 결상을 맺기 위한 광로추적을 통하여 구해지는 비구면 항의 비구면 계수이다.

### 3. 관련이론

#### 3.1 구면숫돌 궤적의 계산

Fig. 2에 초정밀 경면 연삭가공시 구면 숫돌의 중심  $R$ 과 비구면 가공점  $P$ 와의 관계를 보인다.

축대칭의 비구면 형상함수는  $Z = f(\sqrt{X^2 + Y^2})$ 로 표시되고 가공점  $P(X_p, Y_p, Z_p)$ 에서의 법선벡터는 다음과 같이 표시된다.

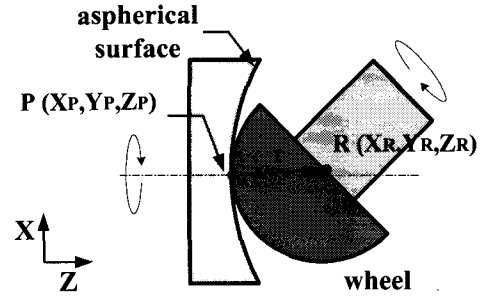


Fig. 2 Schematic diagram of wheel trace calculation

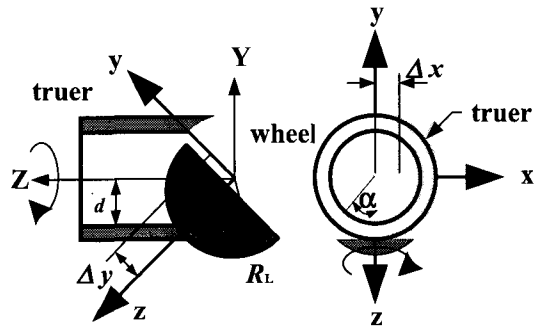


Fig. 3 Schematic diagram of a spherical surface creation with setting error in the CG method

$$\vec{n}(a, b, c) = \left( -\frac{\partial f}{\partial X}, -\frac{\partial f}{\partial Y}, 1 \right) \quad (2)$$

따라서 가공점과 숫돌 중심의 거리를  $r$  이라고 하면 구면 숫돌의 원호 중심  $R(X_R, Y_R, Z_R)$ 의 좌표는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{cases} X_R = X_P + \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \cdot r \\ Y_R = Y_P + \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \cdot r \\ Z_R = Z_P + \frac{c}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \cdot r \end{cases} \quad (3)$$

본 실험에서 사용한 비구면 가공기는  $X$ 축,  $Z$ 축의 동시 2축 구동제어 방식이기 때문에  $Y$ 축은 구동되지 않는다. 따라서  $Y$ 축이 항상 일정하게  $Y_R = 0$ 을 만족하는  $(X_R, Z_R)$ 를 구하고, 비구면 렌즈의

반경에 해당하는  $X, Z$  좌표값을 계산하고 NC 프로그램에 이용하였다.<sup>(10)</sup>

### 3.2 트루어 설정오차 보정

본 연구에서 이용한 CG(curve generating)법의 원리는 컵형 숫돌을 이용한 연삭에 의해 구면을 생성하는 것으로 공작물의 반경을 숫돌지름과 숫돌과 공작물사이의 경사각의 관계에서 구할 수 있다. 이와 같은 원리로 컵형 트루어를 이용하면 구면 숫돌을 트루잉 할 수 있다. CG법에 의해 생성되는 구면 숫돌의 반경  $R_L$ 은 다음과 같다.

$$R_L = \frac{d}{\sin \theta} \quad (4)$$

여기에서  $d$ 는 트루어의 반경,  $\theta$ 는 트루어와 숫돌의 경사각이다.

Fig. 3은 트루어와 생성되는 구면 숫돌의 위치 관계를 보이고 있다. 트루어와 숫돌의 기하학적 오차는  $\Delta x, \Delta y$ 라고 생각할 수 있다. 실제 트루잉을 할 때에는 이러한 설정오차를 추정하여 보정할 필요가 있다. 따라서 이러한 설정오차가 혼재하고 숫돌과 트루어의 경사각  $\theta$ 가  $\pi/4$ 일 때 생성된 구면 숫돌의 반경오차  $\Delta R$ 은 다음과 같다.

$$\Delta R = R_L - \sqrt{R_L^2 + 2\Delta y R_L + 2\Delta y^2 + \Delta x^2 + 2\Delta x d \sin \alpha} \quad (5)$$

그리고 구면의 곡률반경  $R_y$ 는

$$R_y = \sqrt{\left(R_L + \frac{\Delta y}{\tan \theta}\right)^2 + \Delta y^2} = \sqrt{R_L^2 + 2\Delta y R_L + 2\Delta y^2} \quad (6)$$

이므로

$$\Delta R = R_L - \sqrt{R_y^2 + \Delta x^2 + 2\Delta x d \sin \alpha} \quad (7)$$

가 된다.

형상측정점  $(\alpha_i, R_i)_{i=1 \sim n}$ 의 수가  $n$ 개 있다고 하면 식 (7)은

$$\Delta R_i = R_L - \sqrt{R_y^2 + \Delta x^2 + 2\Delta x d \sin \alpha_i} \quad (8)$$

가 된다. 여기에서  $\Delta x = a, R_y^2 = b, (R_L - \Delta R_i)^2 = E_i, 2d \sin \alpha_i = C_i$ 로 놓으면

$$E_i = b + a^2 + aC_i \quad (9)$$

$$S = \sum (E_i - b - a^2 - aC_i)^2 \quad (10)$$

가 되고  $S$ 를  $a, b$ 의 함수라고 할 때  $S$ 가 최소가 되기 위하여 미분하여 정리하면

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial a} = \sum 2 \cdot (E_i - b - a^2 - aC_i) \cdot (-2a - C_i) = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial b} = \sum 2 \cdot (E_i - b - a^2 - aC_i) \cdot (-1) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

이고 최종적으로 다음 식이 얻어진다.

$$\begin{cases} a = \frac{\sum C_i^2 \sum E_i - \sum C_i \sum E_i C_i}{N \sum C_i^2 - (\sum C_i)^2} \\ b = \frac{N \sum E_i C_i - \sum C_i \sum E_i}{N \sum C_i^2 - (\sum C_i)^2} \end{cases} \quad (12)$$

$N$ 은 변수  $C_i, E_i$ 의 관찰개수이다.<sup>(11)</sup>

초기 트루잉 후의 구면 숫돌형상을 탄소판에 전사시키고 Fig. 4의 레이저 간섭식 형상측정기(Form Talysurf-120L)에서 측정된 구면 숫돌의 형상오차 곡선으로부터 얻어진 데이터  $(\alpha_i, R_i)_{i=1 \sim n}$ 를  $C_i$ 와  $E_i$ 의 관계식으로 표현하고 이것을 식 (12)에 대입하여 구해진 오차  $\Delta x (= a), R_y^2 (= b)$ 를 트루어와 숫돌의 초기 설정시에 보정한 후 설정오차를 최소화 하고 재트루잉을 실시한다.

## 4. 비구면 가공

### 4.1 구면숫돌의 트루잉과 드레싱

초입자 숫돌의 연삭에서는 트루잉과 드레싱의 결과에 따라서 숫돌의 연삭성능이 좌우되기 때문에 이것이 매우 중요하다. 따라서 다이아몬드 숫돌의

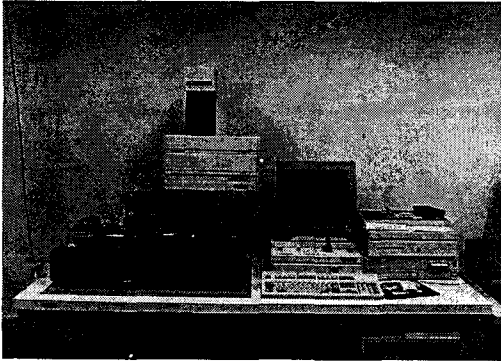


Fig. 4 Photography of form measurement tester (Form Talysurf-120L, Taylor Hobson precision)

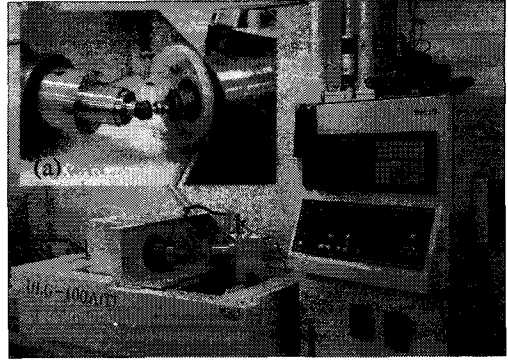


Fig. 5 Photography of aspherical surface generator (ULG-100A(T), Toshiba Co.,Ltd)

트루잉, 드레싱법을 선택할 때 고려해야 할 중요한 요소는 유효 입자절삭날과 입자들출량을 충분하게 생성시키는 것이다.

Fig. 5는 실험에 사용된 초정밀 비구면 가공기 (ULG-100A, TOSHIBA Co.,Ltd)의 사진이며 Fig. 5의 (a)는 가공부의 확대부분이다. 이 가공기는 숫돌 축(X)과 공작물 축(Z)의 동시 2축 제어로 공기 정압 베어링 구동방식이며 위치결정 정밀도는 0.01 $\mu$ m이다. X축 안내 테이블 위에 숫돌 축이 공작물 축 방향에 대하여  $\pi/4$  만큼 경사지게 설치되어 있다. 트루잉은 Fig. 6와 같이 진공 척에 부착된 트루어에 의해 숫돌을 가공하는 방법으로 실시하였다. Table 1에 트루잉 및 드레싱 조건을 나타내었다.

본 실험에서는 입도 #325의 거친 입자를 갖는 컵형 레진본드 다이아몬드 숫돌을 트루어로 이용하였고 구면 생성원리인 CG법에 의하여 극미립 다이아몬드 구면 숫돌을 절삭하여 트루잉을 실시하였다. 비구면 가공기의 진공 척에 트루어를 진원도 오차 1 $\mu$ m 이하가 되도록 장착하고 최초에 숫돌 장착시에 발생하는 오차를 제거하기 위하여 Z축 방향에 절삭깊이를 주어 거친 트루잉을 실시하였다. X, Z축을 구동하여 구면 숫돌과 트루어를 트루잉 위치로 이동시킨 후 숫돌 축은 정지시키고 트루어를 이송 속도 0.001mm/min로 이동시키며 트루잉을 실시하였다. 이때 트루어의 속도는 25m/min이며 구면 숫돌 속도는 1382m/min이다.

또한 드레싱은 트루어와 구면 숫돌 사이에 입도 #4000의 GC 슬러리를 주입하여 래핑 효과에 의한 드레싱법을 실시하였다. 트루어의 절삭깊이는 초기

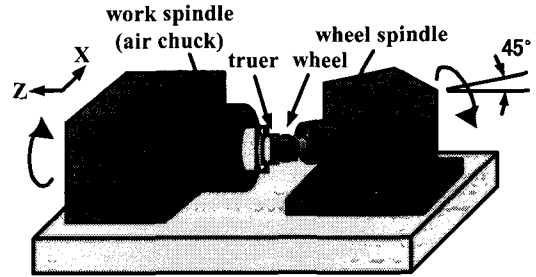


Fig. 6 Schematic diagram of experimental apparatus

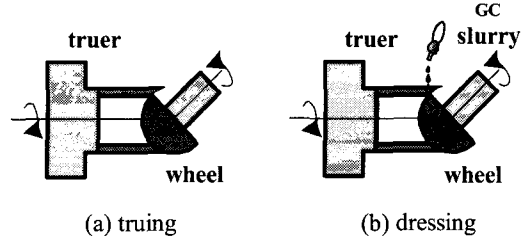


Fig. 7 Schematic diagram of truing method and dressing method

트루잉의 종료점에서 정지시켜 새로운 절삭깊이의 변화는 주지 않았다. 트루어의 회전수는 5m/min이며 구면숫돌은 트루어와 GC 슬러리의 간섭에 의한 무동력 회전을 실시하였다. Fig. 7은 트루잉과 드레싱 작업의 개략도이다. 트루잉과 드레싱 종료후 탄소판에 숫돌 단면형상을 전사시켜 Taylor-Hobson사의 레이저 간섭식 형상측정기(Form Talysurf-120L)에서 드레싱 정밀도를 측정하였다.

Table 1 Truing and dressing conditions

truing	truier	SD325B
	size	in-diameter : 14 mm out-diameter : 18 mm
	truier speed	25 m/min
	feed rate	0.001 mm/min
dressing	method	GC #4000 slurry
	speed	5 m/min
	time	7 min

Table 2 Grinding conditions

wheel	SD3000K100B
size	22(D)×13(T)×11(R)
wheel speed	1382 m/min
feed rate	1 mm/min
work speed	25 m/min
coolant	soluble type

#### 4.2 비구면 가공 실험

트루잉과 드레싱을 실시한 후 parallel 연삭 방식을 이용하여 비구면 가공을 실시하였다. 이 방법은 슷돌 축이 공작물 축 방향으로  $\pi/4$ 만큼 경사진 가공법이다. 이 연삭 방법의 특징은 가공시 사용하는 슷돌 면적을 극대화하여 슷돌 마모를 줄이고 가공면 정밀도를 향상시키는 장점이 있다. 재료는 유리 렌즈 성형용 금형으로 사용되는 초경합금을 사용하였고 슷돌은 Noritake사의 입도 #3000의 미소 레진 본드 다이아몬드 구면형상 슷돌을 사용하였다. 가공조건으로 슷돌 속도는 1382m/min, 공작물 속도는 25m/min, 이송 속도는 1mm/min이다. Table 2에 연삭 조건을 나타내었다.

가공 데이터는 비구면 계수, 렌즈 반경, 슷돌 반경, 가공 피치, 가공 형상을 변수로 하여 구면스틀 제작에 따라서 컴퓨터에서 비구면 (X,Z)의 가공좌표와 NC 코드로 작성되며 RS-232C 케이블에 의하여 CNC 콘트롤러에 전송된다. 렌즈의 비구면 계수는  $C_v=0.0399$ ,  $K=1.6$ ,  $C_2=1.4E-5$ ,  $C_4=-8E-5$ ,  $C_6=-8E-7$ ,  $C_8=3E-8$ ,  $C_{10}=-6E-10$ ,  $C_{12}=4E-12$  이다. 가공후 형상정밀도 및 표면거칠기 데이터는 레이저 간섭식의 형상측정기(Form Talysurf-120L)에서 측정하였다.

Fig. 8은 가공면의 표면거칠기를 나타내고 있으며 Ra 0.0067 $\mu$ m의 경면이 얻어졌다. Fig. 9는 비구면 형상정밀도 P-V 0.16 $\mu$ m의 가공결과를 나타낸 것이다. Fig. 10은 가공된 직경 12mm의 비구면 오목 렌즈 금형의 사진이다.

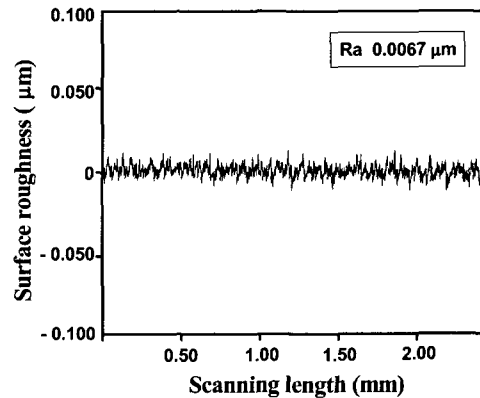


Fig. 8 Surface roughness after aspherical surface grinding

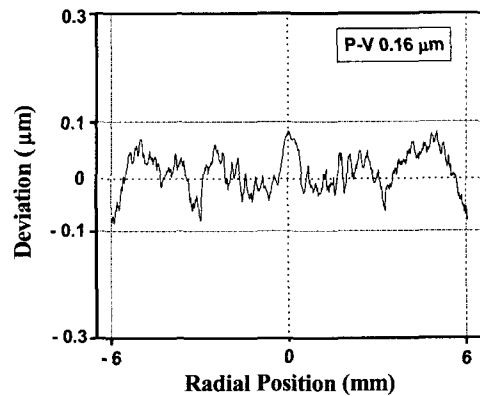


Fig. 9 Form deviation profile after aspherical surface grinding



Fig. 10 Photography of the ground aspherical lens

### 5. 결론

본 연구는 종래의 V형상 슷돌에 의한 cross 연삭법을 개선하여 구면 슷돌에 위한 parallel 연삭법을 실시하였다. 컵형 트루어를 이용한 CG 트루잉법에 의하여 구면 슷돌을 트루잉하였고 초기 트루잉시 발생하는 구면 슷돌 형상 오차를 제거하는 보정 방법을 제시하였다. 트루잉 후에 입도 #4000의 GC 슬러리를 이용하여 드레싱을 하였고 높은 정밀도의 구면 슷돌 형상을 얻었다. 또한 비구면 렌즈 성형용 금형재료를 사용하여 비구면 연삭가공을 실시하고 표면거칠기 Ra 0.0067 $\mu$ m의 경면과 비구면 형상정밀도 P-V 0.16 $\mu$ m의 가공결과를 얻었다.

### 참고문헌

1. 極微粒ダイヤモンドホイールを用いた超精密鏡面研削に関する研究協力分科会 報告書, 超精密鏡面研削に関する研究, 日本精密工学会 産学協同研究協議会, 日本, pp. 1-9, 1995.
2. H.Suzuki, S.Hara and H.Matsunaga, "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.
3. S.Itoh, "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.
4. 김부태, "Aspheric Lens 금형개발," 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp. 43-47, 1992.
5. H.Suzuki, S.Kodera, T.Nakasuji, T.Ohta and K.Syoji, "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.
6. H.Suzuki, S.Kodera, S.Mackawa, N.Morita, E.Sakurai, K.Tanaka, H.Takeda, T.Kuriyagawa and K.Syoji, "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. H.Suzuki, T.Kitajima and S.Okuyama, "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.
8. H.Suzuki, O.Horiuchi, M.Nishioka, H.Takeda, K.Tanaka, T.Kitajima, S.Okuyama and K.Takeuchi, "Precision Grinding of Micro Aspherical Surface," Advances in Abrasive TechnologyIII, The Society of Grinding Engineering, Japan, pp. 573-578, 2000.
9. T.Kuriyagawa, J.S.Lee, M.Saeki and K.Syoji, "Micro Truing/Dressing for Small-Sized Aspherical Mirror Grinding," Advances in Abrasive TechnologyIV, The Korean Association of Machining Engineering, Korea, pp. 111-114, 2001.
10. 이주상, 佐伯優, 廚川常元, 庄司克雄, "소형 비구면 렌즈 금형의 경면 연삭가공에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제18권, 제12호, pp. 82-87, 2001.
11. 酒井英行, 実験精度と誤差, 丸善出版社, 日本, pp. 71-79, 2000.