

# 형상수정 폴리싱에 관한 연구

김의중\*(고등기술연구원), 신근하(아주대)

## A study on Corrective Polishing

E. J. KIM(Manufacturing Technology Center, IAE), K. H. Shin(Ajou Univ.)

### ABSTRACT

For the development of an ultra-precision CNC polishing system including on-machine measurement system, we study a corrective polishing algorithm. We analyze and test the unit removal profiles for a ball type polishing tool. Using these results we calculate dwell time distributions and residual errors for a target removal shape. We use the polishing simulation method and feed rate calculation method for the dwell time calculation. We test corrective polishing algorithm with an optical glass. The target removal shape is a sine wave that has amplitude 0.3 micro meters. We find this polishing process has a machining resolution of nanometer order and is effective for sub-micrometer order machining. This result will be used for the software development of the CNC polishing system.

**Key Words** · Local area polishing (부분연마), Dwell time (체제시간), Corrective polishing (형상수정연마), Unit removal function (단위제거함수), Ball type polisher(구형상공구)

### 1. 서론

컴퓨터제어를 이용한 형상창성 폴리싱 기술개발은 1970년대 미국을 중심으로 컴퓨터의 발전과 더불어 이루어졌다. 이 방식 폴리싱 기술은 평면이나 구면가공에 있어 경쟁력을 가지는 전통적인 폴리싱 기법에 비하여 고비용인 비구면 가공을 위해 자주 사용되고 있다.<sup>[1]</sup>

최근 광전자기술의 발달과 더불어 제품의 소형화와 고성능화의 요구로 여기에 사용되는 광학렌즈에는 비구면 형상화 및 고정도화가 진행되고 있다. 향후에도 이런 경향은 더욱 심화되는 동시에 양산화, 저가격화의 요구도 점점 심해질 것이 예상된다. 또 사용되는 광의 파장이 짧아짐에 따라서 형상정밀도에 있어서도 현재의 초정밀 가공기술에서 도달 가능한 거칠기 수준이 요구되어지고 있다.<sup>[2]</sup>

비구면 광학제품을 폴리싱하는 방법으로 균등폴리싱법이 있으나 보다 높은 형상정도와 표면의 품질을 얻기 위해서는 가공이 필요한 부분만을 폴리싱하여 원하는 형상을 얻는 형상 수정폴리싱이 유효한 폴리싱법이 된다

본 논문은 미소한 구 형상의 회전공구를 임의의

축 대칭인 곡면형상을 가지는 가공물의 표면위를 CNC 제어하면서 이동시키는 것에 의해 목표형상으로 가공하는 폴리싱 방법에 대한 것이다. 최종적으로 On-Machine 측정시스템을 포함한 초정밀 CNC 폴리싱 시스템의 가공제어 프로그램을 개발하기 위한 기초연구로서 형상수정 폴리싱에 대하여 해석적인 검토와 실험을 통하여 형상수정 폴리싱의 성능을 검토하였다. 먼저 구 형상 공구에 대한 단위가공형상과 공작물 위치에 따른 단위가공형상을 시뮬레이션에 의해 구하였다. 기초실험을 통하여 폴리싱 상수를 구하고 이를 이용하여 목표제거형상을 가공하기 위한 공구의 이송속도를 계산하고 가공실험을 하였다 또한 공작물 위치에 따른 단위제거형상을 이용하여 목표제거형상을 가공하기 위한 공구의 체제시간 분포를 계산하고 이를 사용하여 가공실험을 수행한 결과를 나타내었다.

### 2. 본론

#### 2.1 형상수정 폴리싱

최종적으로 개발하게 될 초정밀 CNC 폴리싱 시스템에 대한 개념도를 Fig. 1에 나타냈다. 공작물에 비

하여 상대적으로 작은 공구를 사용하여 전 가공공정인 연삭이나 절삭에서 발생된 형상오차를 수정가공하는 동시에 목표 표면거칠기로 다듬질가공하는 것으로 수정가공 회수의 증가에 따라서 목표로 하는 가공정밀도를 얻을 수 있다.

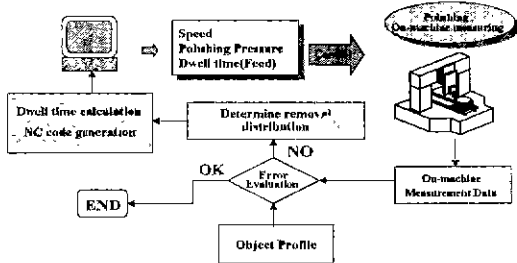


Fig. 1 Schematic diagram of CNC polishing system

위의 형상수정 폴리싱의 핵심인 체재시간 제어가 공법으로서 Preston의 가설로부터 유도된 식을 사용한 Convolution model이 제안되고 있다<sup>[3]</sup>.

Fig 2는 그 원리를 나타낸다. 여기서 단위제거형상은 공구와 가공조건에 따라서 결정된다.

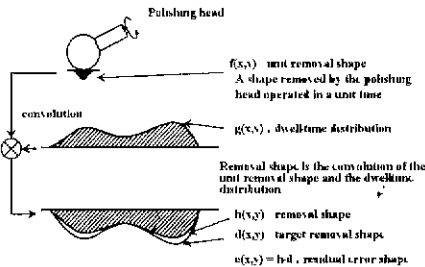


Fig. 2 Convolution model for corrective polishing based on dwell time control

## 2.2 구 형상 공구의 단위제거함수

구 형상의 공구에 대한 단위제거함수를 해석하기 위하여 Fig. 3에 나타낸 것과 같은 좌표계를 설정한다. 공구의 회전중심을 x축 선상에 둔다. 가공물의 형상은 축 대칭이기 때문에 그 대칭축을 중심으로 해서 일정한 회전속도  $\omega_2$  로 회전시키면서 가공점을 가공물의 반경방향으로 이동시켜 가면서 가공하는 것에 의해 형상이 생성된다. 폴리싱 가공량은 아래의 Preston 경험식을 사용하여 구한다.

$$dh(x, y)/dt = K \cdot P(x, y) \cdot v(x, y) \quad (1)$$

여기서 K는 폴리싱조건에 의해 결정되는 비례상수, P는 가공압력, v는 폴리셔와 가공물의 상대속도, t는 폴리싱시간이다. 한 점에서의 제거율(dh/dt)이 가공조건에 대하여 알려지면 다음의 방법으로 그 결과를 적용할 수 있다.

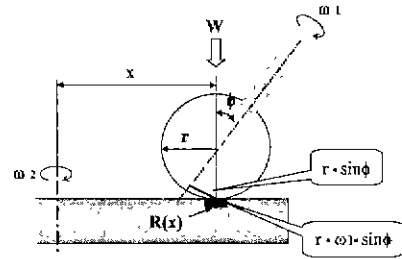


Fig. 3 Polishing region for spherical polishing tool

$$\Delta h = \int_0^{\Delta t} K(a \text{ brasive, tool material, work material})$$

$$\cdot P(x, y, t) \cdot v(x, y, t) \cdot dt \quad (2)$$

즉, 시간 간격을 압력과 속도가 거의 일정하게 남아있는 동안으로 설정하면 공작물 표면상의 한 점에서의 가공깊이는 단순한 시간적분이 된다.

또한 폴리싱헤드의 압력을 일정하게 제어하는 것에 의해 임의의 x점에서의 가공시간 t 동안 가공된 가공 깊이는

$$h(x, y) = K \cdot P \cdot \int_0^t v(x, y) \cdot dt \quad (3)$$

로 쓸 수 있다. Fig 3에서와 같은 축대칭 가공물을 가공시 공작물이 1회전하는 동안 걸리시는 시간 t는  $2\pi/\omega_2$  이기 때문에 이 시간 동안 가공된 가공 깊이를 R(x)라고 하면

$$R(x) = K \cdot P \cdot \int_0^{2\pi/\omega_2} v(x) \cdot dt \quad (4)$$

가공형상의 중심 X점에서의 공구와 공작물과의 상대속도를 알면 가공깊이를 계산할 수 있다

단일 가공형상이 매우 작다고 가정하면 공구와 공작물사이 접촉면적 내에서 가공압력이 일정하고 공구와 공작물간의 상대속도도 윗식과 같은 값으로 일정하다고 할 수 있다.

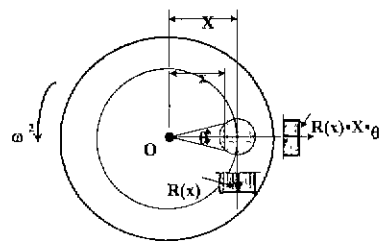


Fig. 4 Polishing depth at a point

이와 같은 조건하에서는 앞식의 R(x)는 단일 가공형상내에서 일정하다고 할 수 있다. 따라서 임의

의 점에서의 공작물 1회전시의 가공깊이를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$h(x) = \frac{1}{2\pi X} \cdot R(X) \cdot x \cdot \theta \quad (5)$$

즉, Fig 4에서와 같이 한 점에서의 공작물 1회전 하는 동안의 가공깊이  $R(x)$ 와 가공폭의 곱을 가공시의 동일 궤적상에 균등하게 분배함으로써 공작물이 1회전시의 가공깊이  $h(x)$ 를 구한다.

가공형상의 반경이 매우 작다는 가정으로부터 아래의 그림과 같이 가공형상을 원형으로 근사시키고 중심부에서의 가공깊이를 사용하여 정규화 하여 나타낼 수 있다.

$$h(x) = \frac{1}{2\pi X} \cdot R(X) \cdot \frac{d}{y} = K' \frac{d}{y} \quad (6)$$

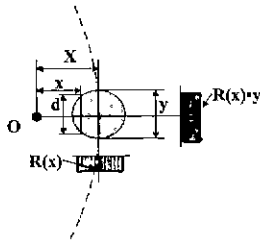


Fig. 5 Unit removal shape for spherical polishing tool

여기서 하나의 가공 형상내에서  $K'$ 값은 일정하다. 식(6)을 사용하여 Table 1과 같은 조건에 대하여 공구제거형상을 시뮬레이션한 결과를 Fig. 6에 나타냈다.  $K \cdot P$ 값은 편의상 1로 하였고 공작물을 정지시키고 가공했을 때의 단일 가공형상의 지름  $y$ 를 0.4 mm로 가정하였다. 실제 폴리싱 가공에서  $K$ 값이 매우 작기 때문에 결과 값의 실제크기는 수마이크로미터 오더가 된다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 공작물 1회전시의 가공형상은 대칭성이 좋은 가공형상을 갖는다

Table 1 Polishing simulation conditions for spherical polishing tool

Ball size in diameter, $2 \times r$	1 mm
Revolving speed of tool, $\omega_1$	1,000 rpm
Revolving speed of work, $\omega_2$	100 rpm
Angle of tool center line, $\phi$	$45^\circ$
Tool position in work radius, $x$	5 mm

Fig. 7에 직경 10 mm 공작물상의 공구위치에 따른 단위제거형상을 계산한 결과를 나타냈다. 조건은 Table 1과 같으며 앞의 계산에서와 같이  $K \cdot P$ 값은 편의상 1로 하였고 공작물을 정지시키고 가공했을

때의 단일 가공형상의 지름  $y$ 를 0.4 mm로 가정하였다. 이때 공구위치간격은 1 mm이다. 각각의 공구위치에서의 단위제거형상은 가공경로와 상대속도 차이에 의하여 다르게 된다. 공작물의 회전중심부에서 제거형상이 급격하게 커지는 것은 가공경로가 짧은 것에 기인하는 것이다.

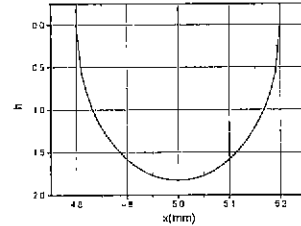


Fig. 6 Calculated unit removal profile for spherical polishing tool

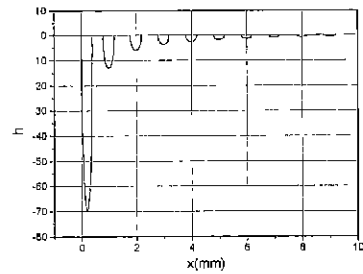


Fig. 7 Calculated unit removal profiles for various polishing tool positions

### 2.3 형상가공을 위한 공구의 이송속도계산법

해석을 위하여 Fig. 8에 나타낸 것과 같은 좌표계를 설정한다. 공작물회전중심 O를 원점으로 하고 공구의 회전중심을 X축 선상에 둔다. 가공물의 형상은 축 대칭이기 때문에 그 대칭축을 중심으로 해서 일정한 회전속도  $\omega_2$ 로 회전시키면서 가공점을 가공물의 반경방향으로 이동시켜 형상을 생성한다. 그때 가공물의 반경방향 위치에 대한 공구의 주사속도  $F(x)$ 를 제어하는 것에 의해 체제시간이 제어된다.

일반적으로 폴리싱 제거량은 식(1)과 같으며 회전공구를 가공물에 단위시간 가압했을 때 폴리싱입자의 작용으로 생기는 가공형상, 즉 단일 가공형상의 면적을  $A$ , 이때 가하는 하중을  $W$ 로 하면 평균폴리싱압력  $P = W/A$ 이다.

그림에 나타낸 것 같이  $A$ 가 미소하고 가공물대칭축을 중심으로 가공물을 등속 회전시키면서 공구를 가공물의 회전축 중심으로부터 반경방향으로 속도  $F(x)$ 로 주사시키는 경우,  $F/\omega_2$  즉, 회전당 공구의

이송량이 단일 가공형상의 외경보다 충분히 작다고 가정한다면, 가공물 상의 단위 면적당 폴리싱시간  $t$  는 다음의 식으로 표현된다.

$$t = \frac{A}{2\pi \cdot x \cdot F(x)} \quad (7)$$

이때  $\Delta S$ 를 단일 가공형상의 면적  $A$ 로 놓는다.

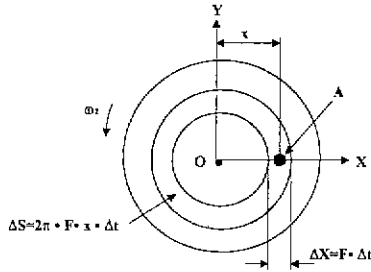


Fig. 8 Coordinate system for feed rate calculation

식(1), (7)에 의해 각 반경방향의 위치  $x$ 에 있어서 가공깊이  $h(x)$ 를 가공하기 위한 공구의 주사속도  $F(x)$ 는 다음과 같이 주어진다.<sup>[1]</sup>

$$F(x) = \frac{K \cdot W \cdot V}{2\pi \cdot x \cdot h(x)} \quad (9)$$

여기서  $h(x)$ 를 반경방향위치  $x$ 에 있어서 가공물의 전 가공형상  $Z_1(x)$ 부터 목표형상  $Z_2(x)$ 를 뺀 필요 제거량 분포를 사용할 경우 잔류가공오차를 줄이는 오차보정가공이 된다.

### 3. 폴리싱 실험

#### 3.1 실험장치

Fig. 9에 실험에 사용된 폴리싱 실험장치를 나타내었다.

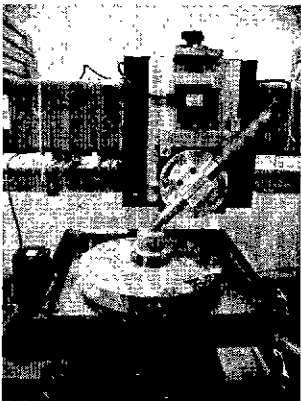


Fig. 9 Polishing test apparatus

직각으로 설치된 리니어모터 이송시스템 위에 공

작물을 회전시킬 수 있는 주축을 장착하여 이송축을 구성하였다. 폴리싱 가압력은 폴리싱 공구의 위치를 수동으로 조정하는 것에 의해 이루어지며 로드셀에 의해 측정된다.

#### 3.2 단위제거형상 실험

Table 2에 폴리싱 실험조건을 나타내었다 또한 Fig. 10에 가공하중을 72 g으로 주고 180 초 동안 가공한 형상에 대한 50배 확대사진과 단면형상을 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 양호한 단일 가공형상이 얻어지고 있다. 그러나 214 g 정도의 가공력이나 가공력 100 g으로 480 s 가공했을 때는 단일가공형상이 비대칭적이고 일그러지게 나타났다. 가공형상내에서의 압력이 일정하다고 가정하고 시뮬레이션을 통해 구한 단일가공형상과 비교하면 실험값이 보다 예리하게 가공되었다.

Table 2 Polishing simulation conditions for spherical polishing tool

Workpiece	BK7( $\phi 50 \times 40$ t)
Polisher	Polyurethane sphere( $\phi 6$ )
Abrasive	CeO <sub>2</sub>
Particle size	0.9 $\mu$ m
Concentration	20 wt%
pH	7
Rotational rate	$\omega_1 = 1000$ rpm
Tool Workpiece	$\omega_2 = 47$ rpm

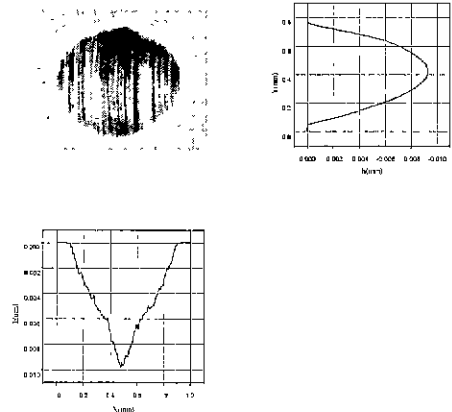


Fig. 10 Unit removal shape ( $\omega_2 = 0$ )

공작물의 반경방향에 대한 가공형상의 단면형상을 아래의 Fig. 11에 나타내었다. 가공형상의 단면은 시뮬레이션결과와 같이 가공물의 중심부에 가장 가

까운 형상이 가공깊이가 가장 크며 이 가공 조건의 가공 분해능이 수 나노미터가 되는 것을 알 수 있다. (0.42 $\mu\text{m}$  / 235회전=1.7 nm/회전)

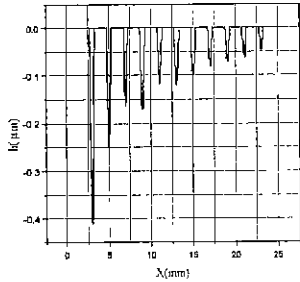


Fig. 11 Unit removal shapes ( $\omega_2 = 47$  rpm)

### 3.4 이송속도제에 의한 형상가공

목표가공형상과 목표가공형상으로 가공하기 위한 이송속도 계산 결과를 아래의 Fig 12에 나타내었다. 구형상의 공구의 단일 가공형상이 포물선형태로 이송속도계산식을 사용하기 위한 평면형태의 단일가공형상과는 차이가 있다. 따라서 이송속도 계산시 보정이 필요하다. 단일가공형상을 적분하여 평균값을 사용함으로써 이송속도 계산값을 보정하였다

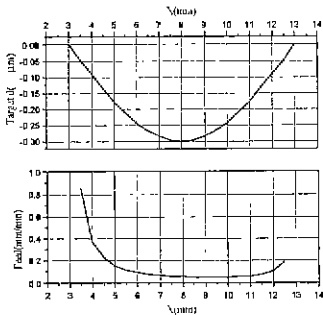


Fig. 12 Feed rate for a target removal shape

가공물의 중앙부에서는 공작물 1회전당의 단위 제거합수가 크기 때문에 이송속도가 빠르게 되어야 하며 가공의 끝점에서는 목표 제거합수값이 작기 때문에 이송속도가 약간 빠르게 된다.

앞에서 구한 이송속도로 가공프로그램을 작성하여 폴리싱하고 가공형상을 공작물의 반경방향으로 측정하여 아래의 Fig. 12에 나타내었다. 실험시 측정 가공력은 64 ~ 65 g으로 1 g 정도의 산포가 있었고 공작물의 회전속도는 47 rpm이었다. 가공형상은 전

체적으로 목표제거형상을 따라 가공되었으나 가공형상의 잔류오차를 보면 최대 0.1  $\mu\text{m}$ 에 가깝다. 그러나 잔류오차의 RMS 값은 0.0275  $\mu\text{m}$ 로 비교적 목표형상대로 비교적 잘 가공되었음을 알 수 있다. 가공된면의 거칠기측정 결과 4.5 nm Ra로 가공전의 표면과 같은 수준의 거칠기였다.

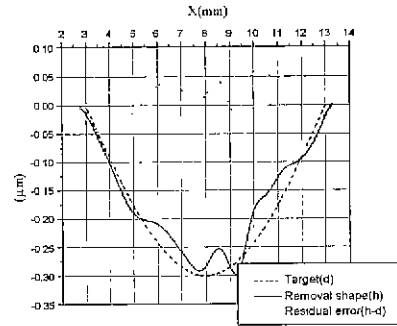


Fig. 13 Polished shape using feed rate control method

### 3.4 체제시간제에 의한 형상가공

목표가공형상과 목표가공형상으로 가공하기 위한 체제시간을 가공 시물레이션법<sup>[1]</sup>에 의해 구한 결과를 시물레이션상의 잔류오차와 함께 아래의 Fig. 13에 나타내었다.

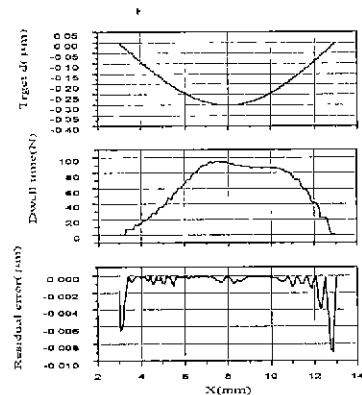


Fig. 14 Dwell time for a target removal shape

가공시물레이션에 의해 구한 체제시간으로 가공 프로그램을 작성하여 공작물을 폴리싱하고 가공형상을 공작물의 반경방향으로 측정하여 Fig. 14에 나타내었다. 실험시 측정 가공력은 64 ~ 66 g을 2 g 정도의 산포가 있었고 공작물의 회전속도는 47 rpm이었다.

가공형상 측정결과 전체적으로 목표제거형상을

따라 가공되었으나 가공형상의 잔류오차를 보면 최대 0.1  $\mu\text{m}$ 로 나타났다. 그러나 잔류오차의 RMS 값은 0.0239  $\mu\text{m}$ 로 비교적 목표형상대로 비교적 잘 가공되었음을 알 수 있다.

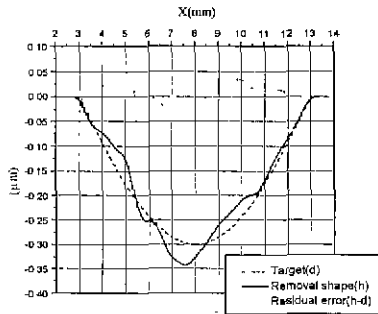


Fig. 15 Polished shape using feed rate control method

가공실험결과 잔류오차의 값이 시뮬레이션 결과에 비하여 매우 크게 나타났다 이것은 가공시 공구와 공작물 사이로 폴리싱액의 균일한 유입이 어렵고 공구의 진원도에 의한 오차와 폴리셔의 회전정밀도가 수 마이크로미터로 이러한 공구의 회전 운동오차 때문에 가공중에 균일한 폴리싱 가압력을 유지하기 어렵기 때문으로 생각된다. 가공된면의 거칠기측정결과 3.4 nm Ra로 가공전의 표면과 같은 수준의 양호한 거칠기였다.

#### 4. 결론

본 논문은 초정밀 CNC 폴리싱시스템을 개발하기 위한 기초적 연구로서 구 형상의 공구를 사용하여 단위가공형상을 구하고 이를 사용하여 형상수정 폴리싱을 실험한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 구 형상의 폴리싱 공구의 가공분해능은 수 나노미터로 형상수정 폴리싱을 위한 공구로서 성능이 우수하다.
- 2) 목표제거형상을 가공하기 위해 이송속도를 계산할 경우 단위제거함수의 형태에 따라서 보정이 필요하며 이 방법은 단위제거형상이 정방형일 때 오차가 작다.
- 3) 이송속도 제어와 가공시뮬레이션법을 사용한 체제시간 제어법 모두 서브마이크로미터 오더의 형상가공에 유용한 수단이다

#### 후기

본 논문은 선도기술 개발사업 중 첨단생산시스템

개발의 연구비에 의하여 지원되어졌으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. R. Komanduri, D.A. Lucca and Y. Tani, "Technological advances in fine abrasive processes," Annals of the CIRP, Vol. 46, No. 2., pp. 545-596, 1997.
2. I. Kataoka, "Super smooth polishing technology for aspheric mirrors", JSPE. Vol. 64 No. 7 pp983-986, 1998.
3. R. Apsden, R. McDonough and F. R. Nitchie, Jr., "Computer assisted optical surfacing," Appl. Opt., 11, 12, pp2739, 1972.
4. H. Susuki, S. Hara and H. Matsunaga, "Study on aspherical surface polishing using small rotating tool," JSPE, Vol. 59, No. 10, pp131-136, 1993.
5. M. Negishi, M. Ando, M. Takimoto, A. Deguchi and N. Nakamura, "Studies on super-smooth polishing(2nd report)," JSPE. Vol. 62, No. 3. pp408-412, 1996.