

# 유리소재의 형상수정 가공을 위한 연마특성

권기찬\*, 오창진(충북대 대학원), 김옥현, 김성청(충북대 기계공학부)

## A Study on the Polishing Characteristics for Corrective Polishing of Optical Glass

G.C.Kwon\*, C.J.Oh(Graduate School, CBNU), O.H.Kim, S.C.Kim(Mech. Eng Dept., CBNU)

### ABSTRACT

This paper presents the result of basic study about corrective polishing for arbitrary surface figure. In this study, we researched polishing characteristics on the working condition of optical glass. The abrasive size, relative velocity and working pressure were selected major factors that affect polishing process. The Preston's equation which is the representative model of polishing process was used to model the unit removal shape. The Preston's coefficient and unit removal function were calculated from the polished surface.

Applying these results, we have shown that the systematic corrective polishing of arbitrary figure is feasible through experiments and analysis.

**Key Words** : Corrective polishing (평상수정연마), Arbitrary surface figure (비구면), Unit removal function (단위 제거함수),

### 1. 서 론

폴리싱 가공은 선삭 또는 연삭등의 기계가공에 비하여 극도로 느린 가공방법이고 형상차성에는 적합하지 않은 가공법으로 알려져 있다. 그러나 최근 광학기기, OA기기, AV기기 등의 소형 경량화, 저가격화, 고기능화에 관심이 높아지면서 비구면 광학부품(aspheric optics)에 대한 수요가 증가하고 있다. 폴리싱 가공은 평균거칠기 0.01  $\mu\text{m}$ 이하의 고품위의 광학면을 얻기 위한 가공방법으로 적합한 것으로 알려져 있다. 그러나 최근의 비구면 가공기술은 기계가공기술 이상의 공차가 요구되고 있고, 형상정밀도(from accuracy) 0.1 nm RMS와 표면거칠기 0.1 nm RMS정도의 가공품질을 요구하는 제품도 있다[1]. 특히 일부 비구면 광학부품은 기계가공으로 달성된 비구면 보다도 높은 형상 정밀도를 요구하고 있다.

비구면 광학면을 가공하는 방법으로는 NC제어 가공기에서 절삭이나 혹은 연삭공구를 사용하여 비구면 형상을 가공한 후 점 탄성체 폴리셔를 공작물과 접촉시켜 균등한 압력으로 폴리싱하여 가공 변질층(subsurface damage layer) 및 공구 흔적(tool mark)을 다듬질하여 표면 품질만 향상시키는 방법이 있다. 그러나 이러한 폴리싱 방법으로는 형상정도의 향상이 어려워 원하는 형상정도를 얻기 위해서는 형상수정가공이 요구된다.

본 연구에서는 형상수정 연마를 위한 기초 연구 단계로 광학유리 소재의 가공조건에 따른 연마특성

을 실험적 및 해석적 방법으로 규명하였다. 연마특성을 지배하는 인자인 가공압력, 상대속도, 가공입자의 크기를 변수로 선정하였으며 대표적인 연마특성 모델인 프레스턴식을 적용하여 연마면의 가공된 형상 및 연마량으로부터 프레스턴 상수와 단위제거함수를 유도하였다. 이 결과를 이용하여 체계적인 형상수정 연마가공이 가능함을 보였다.

### 2. 수정연마가공 및 단위제거함수

형상수정 연마가공에는 일반적으로 공작물의 크기보다 상대적으로 매우 작은 공구를 사용함으로써 측정된 잔여오차를 부분연마에 의해 제거한다[2]. 작은 톨을 사용하여 정밀하게 제어하기 위해서는 소재와 가공조건에 따른 단위제거 형상의 정확한 모델이 필요하다[3][4].

일반적으로 형상수정 가공방법에서 많이 사용하는 체제시간 제어방식은 Fig. 1과 같이 단위제거함수와 잔여오차를 중첩함으로써 형상오차를 제거하기 위한 공구의 체제시간을 재산해 내는 방법을 적용하고 있다[5].

따라서 본 연구에서는 폴리싱 공구에 의해 단위시간당 제거되는 가공량을 예측하기 위해서 단위제거함수를 모델링 하였다. 단위제거함수를 모델링하기 위하여 공구와 공작물간의 상호작용을 Fig. 2에 나타내었다. 공작물 회전중심  $O_1$ 과 공구 회전중심  $O_2$ 는 거리  $D$ 만큼 떨어져 있고, 공구는 공작물의 회전에 의한 A점과 B점의 속도차에 의해 회전한

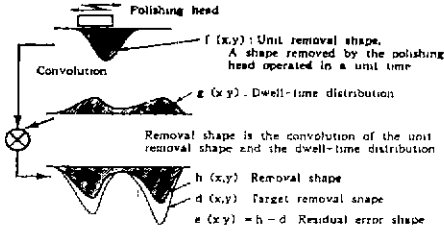


Fig. 1 Convolution model for corrective polishing[5]

다. 따라서 공작물의 각속도  $\Omega$ 와 공구 자전속도  $\omega$ 는 중심간의 거리  $D$ 와 관계없이 항상 동일하다. 폴리싱 가공영역은 공작물의 회전 중심  $O_1$ 을 기준으로 공구가 쓸고 지나간 형상이 된다

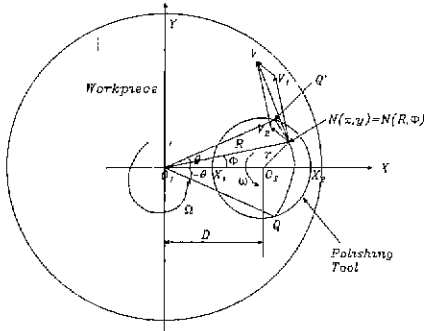


Fig. 2 Schematic of small tool for unit removal shape modeling

연마 제거율은 단위시간당 연마깊이 분포로서 프레스톤의 경험식을 사용하였다.

$$dh(x, y)/dt = K_w \cdot P(x, y) \cdot V(x, y) \quad (1)$$

여기서  $K_w$ 는 연마특성 및 재료에 관계되는 프레스톤 상수이고  $P$ 는 가공압력,  $V$ 는 폴리셔와 가공물의 상대속도,  $t$ 는 가공시간이다. 따라서 연마 제거량은 가공된 공작물위의 상대속도분포를 시간에 대해 적분함으로써 계산할 수 있다. 공작물위의 임의의  $N$ 점에 대한 상대속도는 공작물의 회전에 의한 속도  $V_1$ 과 공구의 회전에 의한 속도  $V_2$ 의 벡터 합이 된다.

$$V_1 = R \cdot \Omega$$

$$V_2 = r \cdot \omega$$

$$V(x, y) = |\vec{V}_1 + \vec{V}_2| \quad (2)$$

따라서 폴리싱 공구의 압력이 일정한 경우에 대해  $N$ 점에서의 가공시간  $t$ 동안에 가공된 깊이는

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

로 표현할 수 있다.

따라서 식(3)을 극좌표 형태의  $N(R, \Phi)$ 로 좌표변환하고 Fig. 2와 같이  $\Phi$ 를  $-\theta$ 에서  $+\theta$ 까지 적분함으로써 동일반경  $R$ 상에 있는 점  $N(R, \Phi)$ 는  $\Phi$ 에 관계없이 동일한 가공량을 가진다. 따라서 동일반경내의 총 제거 깊이는 식(4)와 같이 반경  $R$ 이 만드는 원호를 따라서 유효 연마거리  $Q$ 의  $Q'$ 를 적분함으로써 얻어질 수 있다[3].

$$h(R, \phi) = \frac{K_w \cdot P \cdot t}{2\pi} \int_{-\theta}^{\theta} V(R, \phi) \cdot d\phi \quad (4)$$

Fig. 3은 공구와 공작물사이의 압력분포가 일정하다고 가정할 때, 연마 모델의 타당성을 검증하기 위해 공구 직경 25 mm, 압력 9 lb, 속도 100 rpm, 시간 180 mm의 조건으로 시뮬레이션 한 결과로서 Fig 4에서 보인 동일한 조건으로 실험한 결과와 비교했을 때 가공된 형상이 거의 동일하며 이것으로부터 앞에서 제시한 모델이 타당함을 알 수 있다

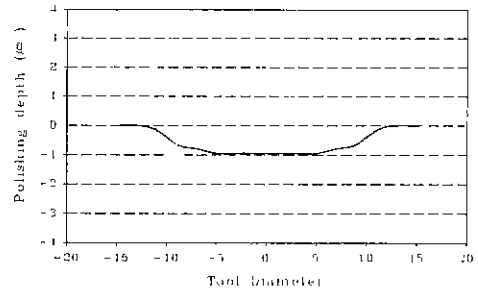


Fig. 3 Simulation result of removal shape

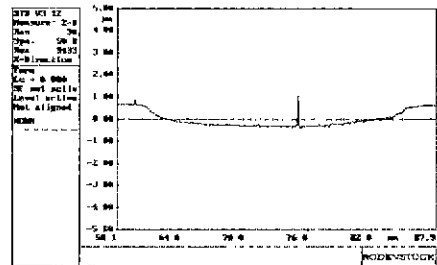


Fig. 4 Experimental result of removal shape

### 3. 가공조건에 따른 연마특성

본 연구에 사용된 연마실험장치는 압력 및 속도 제어가 가능한 BUEHLER사의 AUTOMAT2™를 사용하였다. 가공정도향상을 위해 공구의 회전축은 가공면상의 가공점에 대하여 항상 법선과 일치하도록 하였고, 단위제거합수 및 연마면 형상을 고려하여 공작물의 회전에 대해 공구가 자전하도록 장치를 구성하였다. 실험에 사용한 공구는 직경25mm의 BUEHLER사 Microcloth™패드를 붙여 사용하였다.

일반적으로 광학렌즈 소재의 폴리싱에 사용하는 입자는 산화세륨( $CeO_2$ , 모스경도 6), 산화철( $Fe_2O_3$ ,

모스경도 5.5-6.5), 산화지르코늄( $ZrO_2$ , 모스경도 5.5-6.5), 산화알루미나( $Al_2O_3$ , 모스경도 9-9.3) 등이 많이 사용되며 본 실험에서는 입자크기  $0.3 \mu m$ 와  $1 \mu m$  두 종류의 산화 알루미나 입자를 사용하였다. 연마 유량은 연마입자의 유량에 의한 영향을 최소화 하고 폴리싱 가공시 공작물과 공구사이에 입자가 원활하게 들어갈 수 있도록 하기 위해 폴리싱 공구가 잠길 정도로 충분히 공급하여 주었다.

연마 가공에 의한 제거량은 모델링된 단위제거 함수를 통하여 예측할 수 있다. 단위제거함수의 주요인인 프레스턴 상수를 알면 주요 가공 조건인 압력 및 상대속도, 혹은 입자에 대해서도 정확한 가공량을 예측할 수 있게된다. 따라서 이렇게 예측한 결과를 이용하여 형상수정가공에 적용 할 수 있다.

본 논문에서는 시뮬레이션 된 결과와 Fig. 4와 같이 실제연마 과정과의 비교검증을 위해 연마가공특성을 실험적으로 연구하였다. 폴리싱 가공에 주요한 영향을 미치는 가공압력(P), 상대속도(V), 입자의 크기를 변화시켜 가며 그에 따른 프레스턴 상수를 구하였다. 시편으로는 광학유리를 사용하였으며 폴리싱 후 가공된 형상측정은 Rodenstock사 RM600<sup>TM</sup> 표면저칠기 측정기를 사용하였다.

### 3.1 속도변화에 대한 연마특성

속도변화에 대한 연마특성 실험결과 Fig. 5와 같이 속도의 증가에 따른 제거율도 선형적으로 증가하고 있으며 프레스턴 상수값은 Fig 6과 같이 비교적 유사한 값으로 분포되었다. 따라서 속도변화에 대한 실험 결과 앞에서 제시한 연마특성 모델이 타당함을 알 수 있다.

Table 1 Experimental results for the velocity

속도변화 V(rpm)	P=9lb, T=180min			
	$1 \mu m$		$0.3 \mu m$	
	가공량 ( $\mu m$ )	$K_w$ ( $10^{-8} mm^2/kg_f$ )	가공량 ( $\mu m$ )	$K_w$ ( $10^{-8} mm^2/kg_f$ )
50	0.50	19.44	0.43	16.72
70	0.71	19.66	0.64	17.72
100	0.90	17.46	0.81	15.71
120	1.00	16.15	0.97	15.67
150	1.42	18.36	1.19	15.39

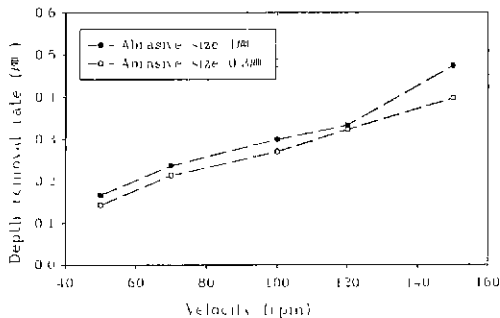


Fig. 5 Depth removal rate for the velocity variety

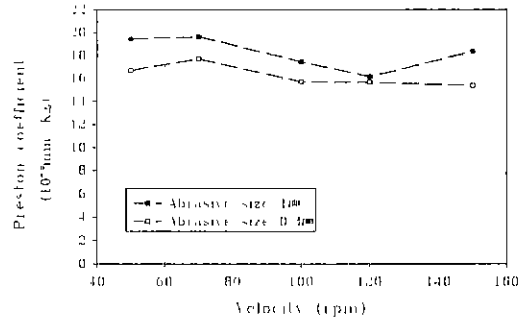


Fig 6 Preston coefficient for the velocity variety.

### 3.2 시간변화에 대한 연마특성

시간변화에 대한 연마특성 실험 결과 Table 2와 같이 시간의 증가에 따라 가공량이 선형적으로 증가했으며 이에 따른 단위 시간당 제거율은 Fig. 7와 같이 일정한 값으로 계산되었다.

프레스턴 상수값은 Fig. 8의 결과와 같이 입자크기  $0.3 \mu m$ 의 1시간인 경우를 제외하면 비교적 일정한 값으로 분포함으로써, 연마 시간에 대한 특성 역시 앞에서 제시한 모델을 잘 추종함을 알 수 있다.

Table 2 Experimental results for the polishing time

시간변화 T(h)	P=9lb, V=120rpm			
	$1 \mu m$		$0.3 \mu m$	
	가공량 ( $\mu m$ )	$K_w$ ( $10^{-8} mm^2/kg_f$ )	가공량 ( $\mu m$ )	$K_w$ ( $10^{-8} mm^2/kg_f$ )
1	0.39	18.90	0.25	12.12
2	0.74	17.90	0.76	18.38
3	1.00	16.18	0.95	15.37
4	1.59	19.29	0.118	14.32
5	1.91	18.54	1.57	15.24

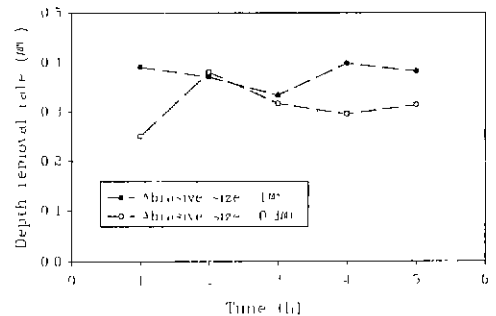


Fig. 7 Depth removal rate for the polishing time

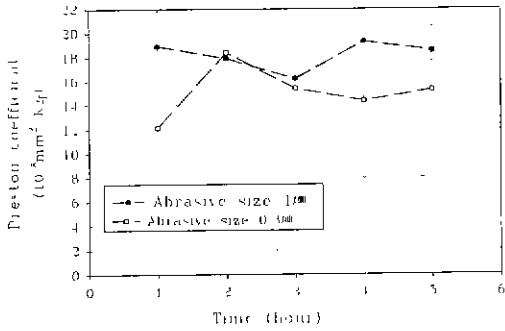


Fig. 8 Preston coefficient for the polishing time

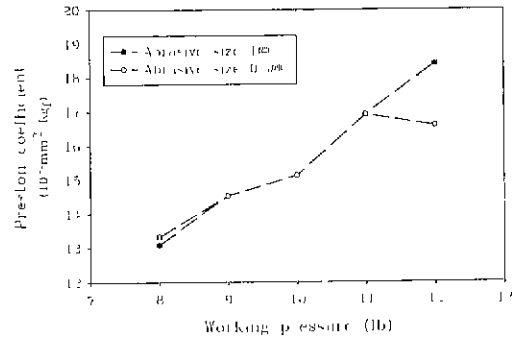


Fig. 10 Preston coefficient for working pressure

### 3.3 압력변화에 대한 연마특성

압력변화에 대한 연마특성 실험의 결과 Fig. 9와 같이 압력의 증가에 따라 제거율도 선형적으로 증가하고 있다. 그러나 프레스톤 상수를 속도 및 시간에 대한 특성 실험결과와 비교하였을 때, 어느 일정한 값으로 분포하고 있는데 비해, 압력변화 실험에서는 프레스톤 상수가 일정한 값으로 분포하기 보다는 점차로 증가하였다. 이것은 압력변화에 따른 마모 기구가 다른 것으로 판단된다. 따라서 프레스톤 상수값은 속도 및 시간의 영향보다는 압력에 의한 영향이 더 크다는 것을 알 수 있다. 그럼으로 연마 특성방정식을 모델링 할 경우 프레스톤 상수값은 속도 및 시간의 영향보다는 압력의 영향을 더 고려하여 선정할 필요가 있다.

Table 3 Experimental result for working pressure

압력변화 P(lb)	실험조건 : V(Ω)=120rpm, T=180min			
	1μm		0.3μm	
	가공량 (μm)	K <sub>w</sub> (10 <sup>-8</sup> mm <sup>2</sup> /kgf)	가공량 (μm)	K <sub>w</sub> (10 <sup>-8</sup> mm <sup>2</sup> /kgf)
8	0.72	13.09	0.73	13.33
9	0.90	14.53	0.90	14.53
10	1.04	15.12	1.04	15.12
11	1.28	16.90	1.28	16.90
12	1.52	18.40	1.37	16.58

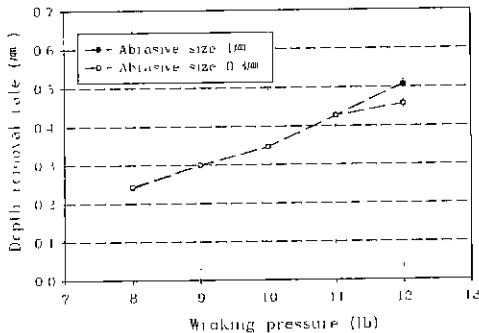


Fig. 9 Depth removal rate for working pressure

### 3.4 연마특성 검증실험

앞의 연마 특성 실험 결과로부터 구한 연마 모델을 이용하여 형상수정 연마가공의 가능성을 실험하였다. 우선 목표 가공량으로 깊이 4 μm를 선정하였으며 선정된 가공량 만큼 가공이 되게 하기 위해 Table 4와 같이 압력을 10 lb에서 14 lb까지 2 lb씩 증가시키며 조건을 설정하였다. 압력변화에 대한 실험 결과에서 연마 특성이 속도 및 시간의 영향에 비하여 압력에 더 큰 영향을 받고 있으므로 프레스톤 상수의 값을 선정할 때 Fig. 11과 같이 Least square 값을 취하여 적용하였다. 특히 압력 14 lb의 경우 프레스톤 상수의 값이 압력에 대해 일정하게 증가하고 있는 것으로부터 선형 보간 한 결과를 사용하였다.

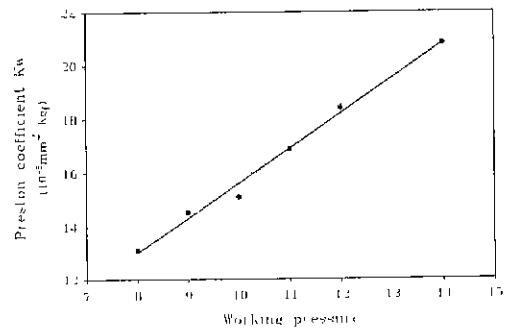


Fig. 11 Linear fit for preston coefficient K<sub>w</sub> of working pressure

Table 4 Condition and result for the verification

실험 NO	P(lb)	K <sub>w</sub> (10 <sup>-8</sup> mm <sup>2</sup> /kgf)	V(rpm)	T(h)	H(1μm)
Case 1	10	15.6	220	6	3.67
Case 2	12	18.2	290	4	3.61
Case 3	14	20.8	140	5	3.71

검증 실험에 사용한 입자의 크기는 1 μm이며, 속도

와 시간은 선정된 압력과 프레스톤 상수로부터 목표 가공량을 연마하기 위해 설정한 값이며 가공 시간이 너무 길지 않도록 하기 위해 속도를 충분히 높여 주었다.

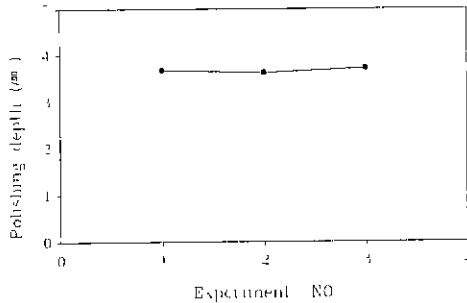


Fig. 12 The measured depth of removal shape for respective verifying experiment

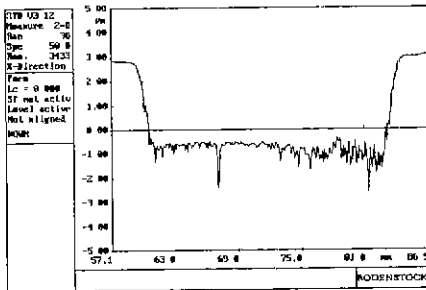


Fig. 13 Measured surface profile of verifying experiment in case 3.

Fig. 12는 Table 4에서 선정된 조건으로 가공한 결과이다. 각각의 경우에 대한 가공량은 약  $3.66 \mu\text{m}$ 로 선정된 목표가공량  $4 \mu\text{m}$ 에 매우 근사한 값이다.

이 검증실험을 통하여 가공 압력에 대한 연마 특성 규명실험으로부터 구한 프레스톤 상수를 선형 보간법으로 적용한 연마모델의 타당성을 검증하였다.

따라서 수정 연마 가공은 이와 같은 연마 모델 및 프레스톤 상수를 이용함으로써 원하는 형상을 가공할 수 있다. 그럼으로 실험에 의해 임의로 선정된 목표 제거량 만큼을 가공할 수 있었고 이것은 수정연마 가공의 가능성을 의미한다.

Fig. 13은 Case 3에서 측정된 가공면 형상이다

Fig. 14는 가공후의 연마패드의 사진이다 사진에서 알 수 있듯이 연마입자가 패드의 섬유 조직 사이에 치밀하게 박혀있는 모습을 볼 수 있다. 연마입자가 공구와 공작물 사이에서 원활히 순환을 못할 경우 가공시간이 길어지고 표면품질도 저하된다. 본 실험의 경우  $1 \mu\text{m}$ 의 산화알루미늄 연마제를 사용하여 Cutoff 0.08에서 표면거칠기를 측정할 결과 20~25  $\mu\text{m}$  Ra를 얻을 수 있었다.

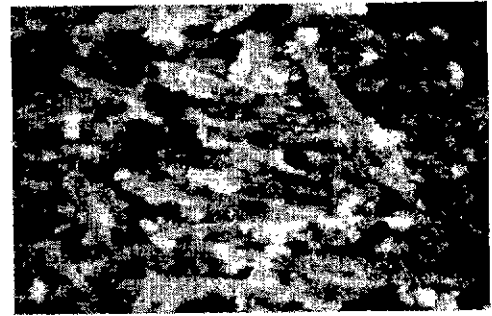


Fig. 14 Photograph of the pad after polishing ( $\times 300$ )

#### 4. 결론

본 연구에서는 광학 유리 소재의 형상 수정 연마 가공에 적용하기 위하여 가공 형상 및 가공량을 예측할 수 있는 프레스톤 식을 사용하여 연마 가공 특성을 모델링 하였다.

연마 특성 모델에 사용되는 프레스톤 상수는 가공 조건 중 속도에 대해서는 큰 변화가 없고 압력에 따라 선형적으로 증가하였다. 규명된 연마특성 모델은 실험과 시뮬레이션을 통하여 타당성을 검증하였다.

규명된 연마 특성 모델을 사용하여 임의로 선정된 제거량은 10 %이내의 오차로 가공할 수 있었으며 형상수정 가공이 가능함을 확인하였다.

#### 참고문헌

1. I Kataoka, "Super smooth polishing technology for aspheric mirrors," JSPE, Vol. 64, No. 7, pp983~986, 1998
2. M. Ando, M. Negishi, M. Takimoto, A. Deguchi, N. Nakamura, "Super-smooth polishing on aspherical surfaces," Nanotechnology 6, pp111~120, 1995
3. T. Kurobe, Y. Yamada, N. Sakai, S. Ueda and K. Singu, "Local area polishing of glass by fine pressure controlling," JSPE, Vol 60, No. 11, pp1642~1646, 1994
4. H. Suzuki, S. Kodera, T. Nakasuji, T. Ohta, K. Syoji, "Study on aspherical surface polishing of single crystal silicon lens," JSPE, Vol. 63, No. 9, pp1280~1284, 1997
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