

실시간 폴리싱 압력 제어시스템 개발

오창진#, 전문식*, 김옥현**

Development of In-Process Polishing Pressure Control System

Chang Jin Oh[#], Mun Shik Jeon^{*} and Ock Hyun Kim^{**}

ABSTRACT

Polishing process has been applied to get extremely fine surfaces, e.g., mirror surfaces such as optical mirrors, lens, molds and etc. Nowadays not only fine surface quality but also submicron order of dimensional accuracy is required for many applications. To meet the requirements polishing process should be provided with an active control of polishing pressure especially for automation of polishing process. In this paper a study on development of an active polishing pressure control system has been presented. A new type of tool assembly has been developed to facilitate the control. The tool is attached to an axis of a polishing machine with a coil spring and control of the polishing pressure is done by the position control of the axis, which needs no additional actuator. The polishing pressure is successfully measured by the measurement of the spring deformation. Control specifications were quantitatively considered by weighting functions and a controller was designed by using loop-shaping technique based on the H^∞ synthesis. Some experiments have been executed on a polishing machine with a PC-NC controller. It is shown that the results were coincident well with the theoretical analyses and satisfied the design specifications.

Key Words : Polishing (폴리싱), Pressure control(압력제어), Loop-shaping(루프쉐이핑), H^∞ synthesis(H^∞ 논리), Disturbance(외란), Command following(명령추종)

기호설명

ω = natural frequency
 ζ = damping ratio
 c = damping coefficient
 k = spring constant
 m = mass of the moving part

$f(t)$ = force applied to the polishing tool
 x = displacement caused by spring deflection
 $W_1(s)$ = sensitivity specification
 $W_3(s)$ = complementary sensitivity specification
 z_1 = displacement of the Z axis
 z_2 = disturbance from the polishing tool

접수일: 2003년 6월 26일; 게재승인일: 2003년 11월 14일
 교신저자, 충북대학교 기계공학과
 cjoh@chungbuk.ac.kr Tel. (043) 275-8026
 * 케프스㈜
 ** 충북대학교 기계공학부

1. 서론

천체망원경, 인공위성 등에 탑재되는 반사경의 경우 매우 높은 형상정밀도와 동시에 높은 표면거칠기가 요구된다. (1,2) 이러한 대형 반사경의 제작은 연삭 또는 랩핑에 의한 1차 가공으로 원하는 형상을 얻은 후 폴리싱 공정을 통하여 표면거칠기를 향상시키며 최종단계에서는 주로 숙련된 기술자의 수작업에 의해 요구 정밀도를 맞추어 생산하고 있다. 수작업에 의해 공정이 최종적으로 마무리 되므로 품질이 일정하지 않고 생산성이 낮으며 제조 원가가 상승하는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 최근에는 제어 기술을 바탕으로 하는 정밀 형상 수정연마의 자동화가 시도되고 있다.

폴리싱 가공을 통하여 정밀한 가공치수를 얻기 위해서는 폴리싱 가공에 의한 재료 제거량이 엄격히 제어되어야 한다. 그러나 선삭이나 연삭과 같이 공구의 형상과 공구의 궤적이 가공물에 전사되는 일반 절삭가공 방식과 달리 폴리싱 가공에 의한 단위 시간당 제거깊이는 식 (1.1)과 같이 표현되고

$$\frac{dh}{dt} = k_{wear} \cdot p \cdot v \quad (1.1)$$

여기서 k_{wear} 는 가공 조건에 의해 결정되는 비례상수, p 는 가공 압력, v 는 상대속도이다. 그러므로 폴리싱에 의한 제거량을 제어하기 위해서는 가공 압력과 상대속도를 엄격히 제어해야 한다. 이와 같은 자동 정밀 폴리싱을 위해 폴리싱 압력의 실시간 제어는 필수적인 것이 된다.

일반적으로 높은 표면조도만을 얻기 위한 종래의 폴리싱 공정에서는 카운터 발란스(Counter Balance)나 공압 등으로 일정압력을 유지하도록 되어있어 가공 중 능동적으로 압력을 제어할 수 없게 된다. (3,4,5) 높은 표면 조도와 동시에 가공 오차를 수정하기 위한 수정 폴리싱을 효과적으로 수행하기 위해서는 가공 중에 압력제어를 할 수 있는 압력 제어 시스템이 제공되어야 한다.

본 연구에서는 폴리싱 가공 중 실시간으로 폴리싱 압력을 제어할 수 있는 폴리싱 압력 제어 시스템을 개발하였다. 이를 통해 가공오차 수정 및 경면을 얻기 위한 수정 폴리싱의 자동화를 위

한 요소기술을 제공하였다. 폴리싱 압력제어를 용이하게 하기 위한 폴리싱 공구부를 설계제작하였으며 루우프 웨이핑(Loop Shaping)에 의한 제어기 설계와 컴퓨터를 이용한 구현을 통해 시스템을 개발하였다. 개발된 제어시스템은 실험을 통해 그 성능을 평가하였다.

2. 공구부 설계

2.1 압력공구의 구조설계

본 연구에서 제안하는 압력제어 방법은 가공시스템의 이송축(Z 축)에 탄성체로 연결되는 공구가 공작물과 접촉하게 하고 그 이송축을 움직여 탄성체의 변형량을 제어함으로써 폴리싱 압력을 제어하는 방법이다.

Fig.1 에 설계된 압력제어 공구의 구조를 보였으며 그 원리는 다음과 같다. 그림에 보인 프레임은 이송축에 고정된다. 이송축을 구동시켜 공구를 소재 쪽으로 접근 시키면 폴리싱 공구는 소재와 접촉하게 되며 계속하여 접근시킴에 따라 틀에 장착된 스프링이 인장하게 된다. 그 인장길이에 비례하여 폴리싱 압력이 결정된다. 따라서 갭센서(gap sensor)를 사용하여 스프링의 변위를 측정함으로써 폴리싱 압력을 측정하며, Z-이송축의 이송량을 제어함으로써 폴리싱 압력을 제어하게 된다.

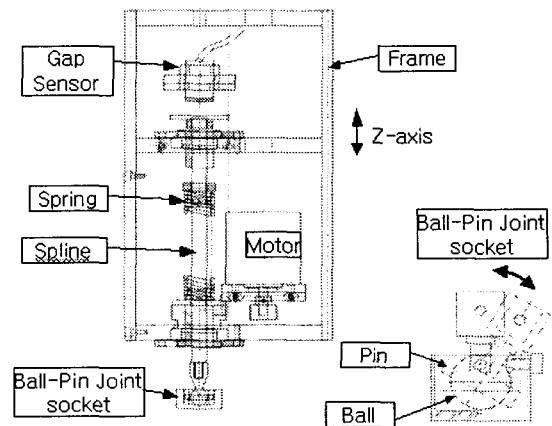


Fig.1 Structure of a polishing tool

2.2 스프링 설계 및 특성시험

햅센서의 측정 범위 내에서 요구하는 압력이 발생되도록 스프링상수 및 스프링의 주요 치수들을 설계하였다.

일반적으로 적용되고 있는 폴리싱 압력은 1.0~120 kPa 로 다양한 구간을 사용하고 있으며 본 연구에서는 최대 발생 압력을 60 kPa 로 설정하였고 폴리싱 공구의 패드 직경을 25 mm 로 하였다. 햅센서의 측정범위 5 mm 를 고려하여 스프링의 상수값이 5.89 kN/m 가 되도록 Table 1 과 같이 코일 스프링을 설계하였다.

이렇게 하여 개발된 Fig.1 에 보인 공구시스템의 정적 및 동적 특성실험을 수행하였다. Fig.2 에 보인 정하중-변위 특성실험 결과를 살펴보면 1 mm 이하의 작은 변위 구간과 3 mm 이상의 변위 구간에서는 선형성이 다소 떨어지는 것을 알 수 있으며 1 mm ~ 3 mm 구간에서는 선형성이 비교적 양호하게 나타남을 알 수 있다.

Table 1 Coil spring parameters

| design parameter | value |
|-------------------|-----------------------------|
| material | Spring Steel |
| mean diameter | 16 mm |
| wire diameter | 2.5 mm |
| number of turns | 16 |
| spring constant | 5.88 kN/m |
| max. shear stress | 189.53×106 N/m ² |

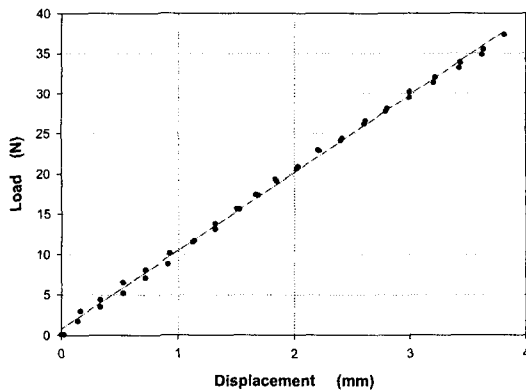


Fig.2 Result of static load-displacement test

이와 같이 스프링의 선형성 및 반복정밀도 등이 양호한 구간이 주 사용 구간이 되도록 스프링이 결정되어야 하며, 보다 정밀한 폴리싱 압력제어가 필요할 경우에는 스프링 상수가 작은 스프링을 사용함으로써 보다 세밀한 압력제어가 가능하게 된다.

동특성 규명은 공구의 임펄스 응답 특성 즉, 임팩트 입력에 대한 공구 운동 변위 출력 실험을 통하여 규명하였다. 그 결과로부터 공구의 동특성은 Table 2 의 파라미터를 갖는 1 자유도계로 모델링 하였다.

Table 2 Dynamic parameters of the tool

| parameter | value |
|-------------------------------|----------------|
| equivalent mass, m | 0.092 kg |
| damping coeff., c | 0.48 kg·s/m |
| equivalent spring constant, k | 5.278 kN/m |
| damping ratio, ζ | 0.0109 |
| natural freq., ω _n | 239.8304 rad/s |

3. 압력제어기 설계

3.1 시스템 모델링

앞에서 설명한 바와 같이 폴리싱 압력제어 시스템의 플랜트는 스프링으로 지지되는 폴리싱공구와 모터와 볼스크류로 구동되는 z 축 이송시스템으로 구성되며 각각 다음과 같이 모델링하였다.

Table 2 와 같이 규명된 폴리싱공구의 운동방정식은 아래의 식(3.1)과 같다.

$$f = m\ddot{x} + c\dot{x} + kx \quad (3.1)$$

위 식에서 F 는 공구에 가해지는 외력 즉, 폴리싱 하중이며 m, c, k 는 각각 공구의 상당 질량, 댐핑상수, 스프링 상수이고 x 는 스프링의 변형량으로 Z 축 이송 위치와 폴리싱공구의 상대변위, 즉 Z₁ - Z₂ 이다. Table 2 에서 보인 공구의 동특성 실험을 통하여 규명된 값을 대입하여 변위 입력 x(t) 과 출력 접촉력 F(t) 의 주파수 응답 특성을 질량과 댐핑을 무시한 경우와 이들을 고려한 경우를 비교하여 Fig.3 에 보였다. 폴리싱 압력제어시

해당 주파수 영역을 다음과 같이 추론 하였다. 폴리싱공구와 소재가 면접촉을 하므로 폴리싱공구가 가지는 정상성분보다 높은 주파수성분의 정상 오차는 가공과정에서 제거되며 이보다 낮은 성분은 제어를 통하여 능동적으로 보상해야 한다. 반사경의 폴리싱과 같이 소재가 20 rpm 이하로 회전하고 회전당 압력제어를 통하여 수정해야할 정상 오차 성분은 3 사이클 이하인 것으로 하여 10 Hz 이하를 관심 주파수 영역으로 하였다.

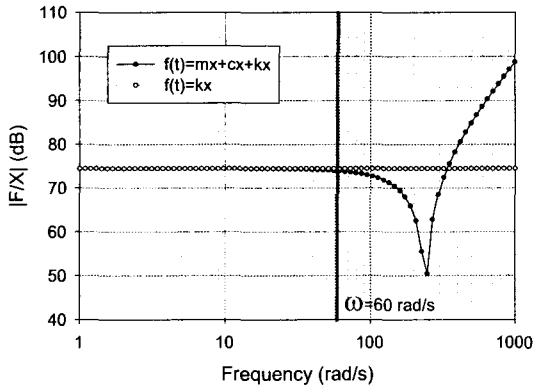


Fig.3 Dynamic effect of the tool structure

Fig.3 의 결과로부터 폴리싱 가공시 사용되는 주파수 대역이 10 Hz 이내인 점을 고려하면 이 범위에서는 관성력과 감쇠력의 영향이 거의 없으므로 접촉력 모델을 다음과 같이 스프링의 변형에 의한 항으로 단순화할 수 있다.

$$f = kx \quad (3.2)$$

이 식으로부터 해당 주파수 범위에서 폴리싱 압력의 정적 변화뿐만 아니라 동적 변화도 스프링 변위를 측정함으로써 측정할 수 있음을 알 수 있다.

이상에서 설명한 바와 같은 구조의 공구와 압력제어 원리에 의해 구성되는 폴리싱 압력 제어 시스템의 간략도를 Fig.4 에 보였으며 그 블록선도를 Fig. 5 에 보였다.

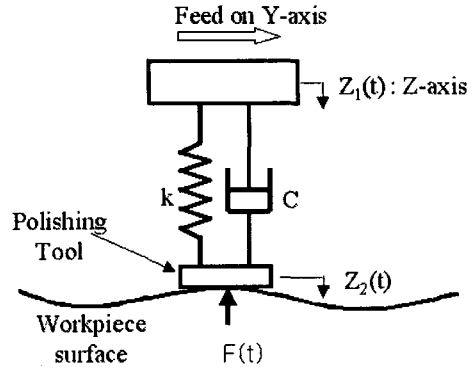


Fig.4 Schematic of polishing tool dynamics

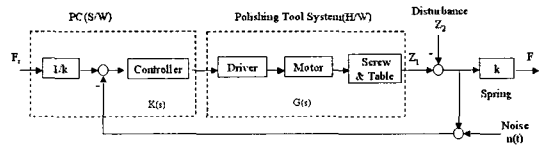


Fig.5 Block diagram of a polishing pressure control system

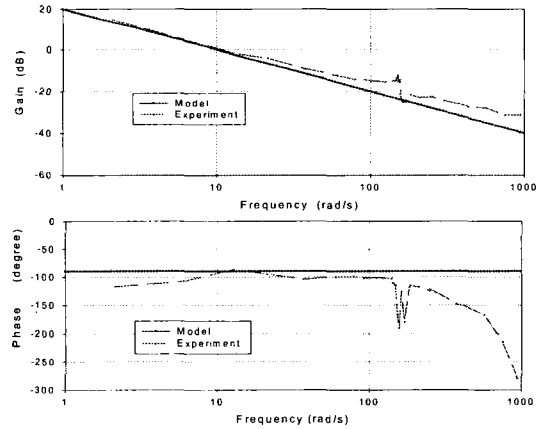


Fig. 6 Frequency response of the z axis

제어기 설계를 위하여 Fig.5 에 보인 폴리싱공구를 부착하고 모터로 구동되는 Z 축 이송시스템의 주파수 응답 특성실험을 수행하였으며 Fig. 6 에 그 결과를 보였다.

이 결과로부터 관심 대역이 10 Hz 이내인 점을 고려하여 구동모터, 볼스크류, 이송테이블로 이루어

어진 Z 축 이송시스템을 식 (3.3)과 같이 1 차 시스템으로 모델링 하였다.

$$G(s) = \frac{10000}{1+1000s} \quad (3.3)$$

3.2 제어기 설계

본 연구에서는 H^∞ 최적화를 이용한 루프 셰이핑(Loop Shaping) 방법⁽⁶⁾을 적용하여 제어기를 설계하였고 제어기 설계를 위하여 요구되는 제어기 사양을 다음과 같이 결정하였다. 명령 추종 성능 향상과 출력 외란(Output Disturbance) 영향을 감소시키기 위하여 저주파수 영역에서 개루프 전달함수의 게인이 크도록 설계되어야 하며, 고주파수 영역에서의 센서 노이즈 영향을 감소시키기 위해서는 고주파수 영역에서 개루프 게인이 작아야 한다. 이와 같은 개루프 전달함수의 요구조건을 만족시키기 위하여 아래의 식(3.4), (3.5)와 같이 가중치 함수를 설정하였다. 즉, 제어기 설계의 목표는 설계된 개루프 전달함수의 게인이 저주파수 영역에서는 $W_1^{-1}(s)$ 의 게인 보다 커야 하며 고주파수 영역에서는 $W_3^{-1}(s)$ 의 게인 보다 작아야 한다. 이렇게 하여 센서 노이즈에 대한 저감도 특성은 컷오프 주파수 이상에서의 이득 감소비(Roll-off rate)를 -40 dB/decade 가 되도록 하였으며 저주파수 대역에서의 외란 제거 성능은 DC 외란 입력에 대한 영향이 1% 이내가 되도록 하였다.

$$W_1^{-1}(s) = \frac{(0.2s+1)^2}{100(0.005s+1)^2} \quad (3.4)$$

$$W_3^{-1}(s) = \frac{45000}{s(s+100)} \quad (3.5)$$

제어기는 연속시간계(s-domain)에서 Matlab 의 툴박스를 이용하여 설계하였으며, 그 결과 설계된 제어기 전달함수는 아래의 식과 같다.

$$K(s) = \frac{2386.7682s^2 + 125441.986s + 125.4396}{s^3 + 237.0261s^2 + 2296.2607s + 5675.6518} \quad (3.6)$$

4. 압력 제어 실험

압력제어 시스템의 구현은 자체 개발한 폴리싱 머신을 사용하였으며 앞에서 설계된 제어기

를 실제 제어 시스템으로 구현하기 위하여 식(3.7)과 같이 바이리니어 변환(Bilinear transformation)에 의해 이산 시간영역의 전달함수로 변환하여 PC-NC 제어기에서 적용하였다.

제어시스템을 디지털컴퓨터 상에서 구현하는데 사용한 샘플링 타임은 1 ms 로 하였으며 형상수정 목표사양인 10 Hz 에 대해 100 배 가량으로 연속시간 시스템을 이산시간 시스템으로 변환하는데 있어 100 Hz 에서 4%이하의 오차를 가지며 설계된 제어기를 통한 형상수정을 구현하는데 충분하다.

$$K(z) = \frac{1.0944z^3 - 1.0384z^2 - 1.0944z + 1.0384}{z^3 - 2.7861z^2 + 2.5743z - 0.7882} \quad (3.7)$$

제어 시스템의 성능 실험을 위하여 Fig. 7 에 보인 바와 같은 실험 장치를 구성하였다.

명령추종성능 실험을 위해 오프셋(Offset) 하중 10 N, 진폭 ± 1 N 의 명령(F) 입력에 대한 접촉력(F) 출력의 주파수응답 실험을 수행하였으며 Fig. 8 에 이론 해석 결과와 비교하였다. 그림의 실험 결과는 본 연구에서 개발한 시스템이 이론적 성능과 정량적으로도 잘 일치하는 명령추종성능을 갖는 것을 보이고 있다.

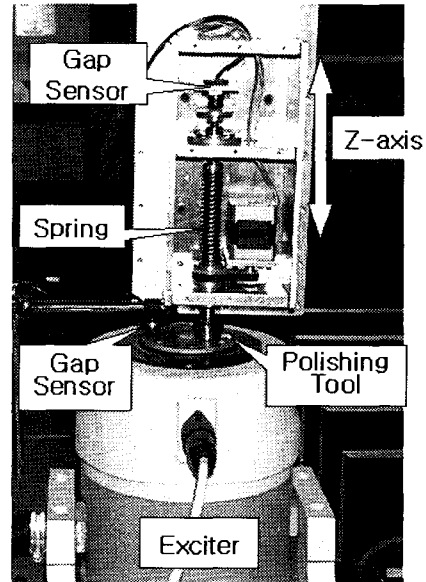


Fig.7 Photograph of an experimental setup

출력 외란 제거 성능 실험을 위해 Fig.7 에 보인 바와 같이 가진기를 공구에 접촉시켜 외란 입력(Z_2)에 대한 접촉력(F) 출력의 주파수응답 실험을 수행하였으며 그 결과를 이론해석 결과와 함께 Fig.9 에 보였다. 이론과 실험 결과가 다소 정량적인 차이는 보이고 있으나 만족할 만한 외란 제거 성능을 보이고 있음을 확인 할 수 있다.

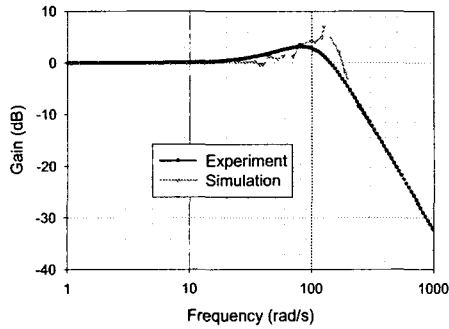


Fig.8 Command following and measurement noise attenuation performance

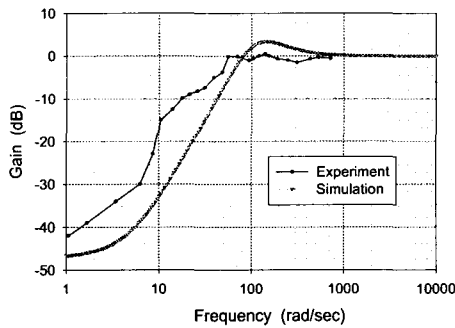


Fig. 9 Output disturbance attenuation performance

실제 가공환경에서의 제어기 작동성능을 확인 하기 위하여 경사면 형태의 가공면을 대상으로 압력제어 성능을 시험하였다. 경사 높이가 약 1.2 mm 에 대하여 설정압력 10 kPa 을 유지하며 이송을 반복하는 경우를 실험하였으며 결과를 Fig.10 에 보였다. 이 결과로부터 본 제어에 의해 출력 외란의 영향이 약 4.2% 이내로 감소되어 제어되고 있음을 알 수 있다.

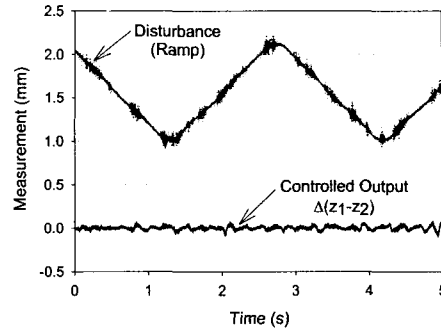


Fig.10 Time response to a ramp disturbance

이상의 연구결과로부터 개발된 폴리싱 압력제어 시스템을 적용하여 유리소재에 대하여 가공실험을 실시하였다. Fig.11 의 a)는 폴리싱 가공전 랩핑으로 형상가공된 원 소재의 사진이고 b)는 본 연구에서 제안한 폴리싱 압력제어 시스템을 적용하여 폴리싱 가공후의 사진이다. 사진에서 보듯이 가공결과가 매우 양호함을 알 수 있다.

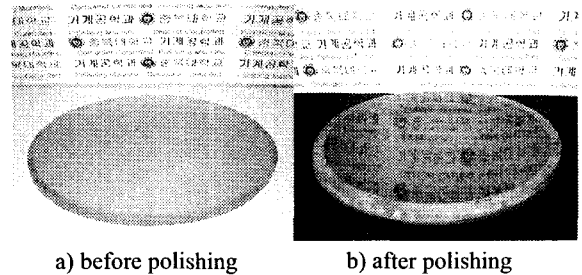


Fig.11 Photograph of a workpiece (Material : Glass)

5. 결론

본 논문에서는 가공 오차 수정을 위한 정밀 폴리싱의 필수 요소 기술인 실시간 폴리싱 압력 제어 시스템 개발에 관한 연구를 수행하였다. 폴리싱 공구시스템 개발, 제어기 설계 및 구현, 폴리싱 압력 제어시스템의 성능 실험 등의 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 기존의 공작기계 이송축을 이용하고 스프링 변형량을 이용하여 압력 제어를 할 수 있는 압력제어공구를 설계 제작하였다. 개발된 공구는 별도의 작동기(Actuator)를 필요로 하지 않으며 스

프링 변위 측정으로 정적 및 동적 폴리싱 압력 변화를 측정할 수 있음을 확인 하였다.

2) H^∞ 최적화 기법을 적용한 루프웨이핑 방법으로 명령추종성능, 센서노이즈 저감특성, 출력 외란제거 성능을 정량적으로 고려하여 제어기를 설계하였으며 PC-NC로 구현하였다.

3) 성능검증 시험 결과 명령추종 성능 및 외란제거 성능이 이론 해석 결과와 잘 일치되며 또한 설계 목표 성능을 성공적으로 만족시키고 있음을 확인하였다.

4) 경사면에 대한 실제 폴리싱 가공을 통하여 실시간 압력 레귤레이팅(Regulating) 제어 성능 시험을 수행하였으며 그 결과 압력변동이 4.2% 이내로 제어됨을 확인 하였다.

이와 같은 연구결과로 부터 본 논문에서 제시한 능동형 실시간 폴리싱 압력 제어시스템이 경면가공 및 오차수정 폴리싱의 자동화를 위해 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-1999-00262)지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. Suzuki, H., Kodera, S., Nakasuji, T., Ohta, T. and Syoji, K., "Study on Aspherical Surface Polishing of Single Crystal Silicon," JSPE, Vol.63.No.9, pp.1280-1284, 1997
2. Beckstette, K. and Heynacher, E., "A New Fabrication Technology for Large Mirrors," Proc. ESO, Vol.30, p.341-352, 1988
3. Negishi, M., and Ando, M., "Study of Super-Smooth Polishing on Aspherical Surfaces," JSPE, Vol. 61, No.10, pp.1393-1396, 1995
4. Ahn, J. H., Jeong, H. D., Lee, M. C., Jun, C. S., Lee, M. H., and Cho, K. K., "Development of Automatic System for Die Polishing ," Journal of KSPE, Vol.17, No.4, pp.69-79, 2000
5. Shahian, B., and Hassul, M., Control System Design Using MATLAB, Prentice-Hall, 1993