

에어백 공구 기반의 광학 연마 장치의 미세 힘 제어 구현

이호철*, 이창은⁺, 제태진⁺⁺

(Manuscript received: May, 15, 2012 / Revised: Jul, 13, 2012 / Accepted: Jul, 14, 2012)

Micro Polishing Force Control of the Polishing Machine with the Airbag Tool

Hocheol Lee*, Changeun Lee⁺, Taejin Je⁺⁺

Abstract

In this paper, the polishing force monitoring and the control method were implemented for the polishing machine with the airbag tool. Airbag tool has been known to be adaptable to the curvature variation such as the aspherical and the free-form surface. However, it was necessary to control the tool movement of vertical axis also because of the table rotational wobble and vibration. To solve it by the polishing force control, we installed another stepping motor to the z-axis. And the polishing force was measured with the load cell and controlled by the PID Labview controller. A few hundreds gram of the polishing force were well controlled under 0.8 second of the response time and 5% variation. An experiment was done to clean the edge burrs of the micro channel structure of width $87\mu\text{m}$ using the polishing force control.

Key Words : Polishing(연마), Polishing force(연마 힘), Airbag tool(에어백 공구), Micro polishing(미세 연마), Real time force control(실시간 힘 제어)

1. 서론

일정한 곡률의 평면이나 구면(spherical) 형태의 광학 표면이 아닌 비구면(aspherical)이나 자유곡면(free-form surface)의 광학 표면 연마 공정에 있어서는 공구나 연마경로에 대해 특별한 방법이 적용되어 왔다^(1~3). 특히, 에어백(airbag) 공구를 이용한 광학 연마는 적은 형상이나 곡률 변화에 따른 연마 힘 변화를 에어백 자체적으로 일정부분 적응하며 완충해주는 역할이 가능하다⁽⁴⁾. 그러나 회전 테이블의 와블(wobble) 및 진동이나 가공물의 큰 형상 변화에서는 연마공구의 움직임 없이 가공물과 연마공구 사이의 연마 힘 조정에는 한계가 있어, 연마 힘의 일정한 제어가 필요하다^(5,6). 또한 수동적이거나 공압 실린

더 형태의 연마 힘 부가 장치만으로는 원하는 힘을 정밀하게 조정하기는 어렵다. 특히, 미세한 광학 구조물의 연마에 있어서는 적은 연마 힘의 제어가 필요하다. 본 연구에서는 에어백 공구를 가지는 연마 장치에 미세한 연마 힘을 제어하는 모듈을 설계 및 제작하고 실시간으로 그 힘 제어 실험을 수행하였다.

2. 연마 힘 제어 방법 및 구현

2.1 에어백 연마 공구 및 연마 장치

본 연구의 실험에 사용된 에어백 공구를 가진 연마 장치는 연마 힘이 설정되면 피드백(feedback) 제어되지 않고, 균형추(balance weight)에 의해 자유이동(free-motion)하는 구조로 구

* 한밭대학교 기계공학과 (hcleee@hanbat.ac.kr)

주소: 305-719 대전시 유성구 동서대로 125

+ 한밭대학교 기계공학부

++ 한국기계연구원 나노융합기계연구본부

성되어 있었으며, 비구면 유리 렌즈 금형의 연마에 적용된 바가 있다⁽⁷⁾. 그러나 자유이동을 지지하는 장치 구조는 히스테리시스(hysteresis), 백래시(backlash)에 의해서 수백 그램(gram)의 연마 힘 범위 이하에 대하여는 그 수직 움직임이 원활하지 못하였다. 따라서 급격한 연마 힘의 변화를 초래하는 연마 환경에 대해서 능동적으로 동일한 힘을 제어하는 정밀하고 미세한 연마장치가 필요하다. 본 연구의 장치의 기본 구성으로는 로드셀(load cell)을 하부에 설치하여 연마 힘을 측정하고, 연마 힘의 제어는 수직의 Z축 위치 제어와는 별도로 슬라이드(slide) 일체형 스텝핑 모터(steping motor)를 Z축에 장착하여 에어백 공구만을 효율적으로 힘 제어하는 구조로 설계하였다. 다음 그림은 에어백 공구와 힘 제어 모듈을 갖춘 연마 장치로서 Fig. 1과 같다.

2.2 힘 측정 및 제어 방법의 구성

공구의 힘 측정과 피드백 제어는 Labview 프로그램(program)을 작성하여 수행하였다. 로드셀에서 입수된 힘과 설정 힘을 비교하여 그 차이에 해당하는 양을 제어 오차로 설정하였다. 힘 제어는 PID 제어를 이용하였으며, 입력은 로드셀 측정값, 출력은 스텝핑 모터의 제어 이동 위치로 설정되었으며, 이용된 식은 (1)과 같다.

$$MP(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

모터의 이동위치량은 P이며 힘 오차량은 e, K값은 PID 제어 위한 게인(gain) 값 들이다. M은 힘에 대한 스텝핑 모터 이동을 결정하기 위한 선형적인 기울기 변환인자 값이다. 로드셀 측정값을 컴퓨터의 Labview로 전달하는 방법은 로드셀 인디케이터(indicator)의 출력인 ASCII 값을 컴퓨터의 RS-232C 포트(port)로 전송하는 방법으로 우선 진행하였다. 또한, 인디케이터가 아닌 별도의 증폭기(amp)를 설치하고 AD(analog to digital)

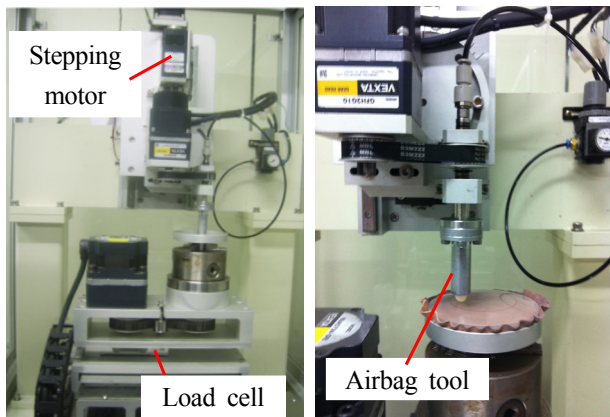


Fig. 1 Polishing machine with the airbag tool and the load control module

변환기를 이용하여 출력값을 입수하는 방식도 빠른 응답 특성을 확보하기 위하여 추가로 진행되었다.

2.3 로드셀 인디케이터를 이용한 힘 측정 및 제어결과

측정값은 ASCII Code 프로세싱 과정을 거쳐 보정된 힘 값으로 Fig. 2와 같이 변환되었다.

인디케이터로부터의 샘플값은 Fig. 3과 같이 1초에 17~20개 사이로 대략 20Hz 정도 되도록 최대로 설정하였다.

데이터 손실을 최소화 하기 위하여 Labview에서의 설정할 time-out 값은 65ms로 파악되었다. Time out 값은 세분화하여 총 3가지로 나눌 수 있는데 데이터를 읽어 들이기 위한 대기시간, 데이터를 읽어 들이는 시간, 데이터를 쓰는 시간이다. Labview에서는 이 세분화된 Time out을 합쳐서 하나의 변수로 사용하고 있다. 그리고 연마공구의 하강하여 누르는 위치 증가와 힘 증가의 상관관계를 모터 스텝을 증가하면서 파악하는 실험을 Fig. 4(a)와 같이 수행하였다. 공구가 접촉하는 시편의 하부에 부드러운 패드(pad)를 추가한 측정 결과도 Fig. 4(b)에서 보여주고 있다.

하부의 부드러운 패드 존재 여부에 따라 1.6Kg에 도달하는 스텝(step)의 양이 6~7배 정도 차이가 나는 것을 알 수 있다. 패드의 완충작용에 의하여 스텝 당 가해지는 힘이 달라지기 때문이다. Fig. 4의 위쪽 측정선은 공구가 하강하여 힘이 증가하는 방향이고 아래쪽의 측정 선은 공구가 상승하여 힘이 감소할 때의 방향이다. 점탄성의 특성인 패드 또는 에어백 공구의 영향이

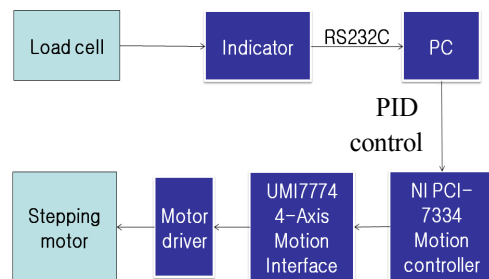


Fig. 2 The monitoring and control flow of the polishing load using the indicator value of the load cell

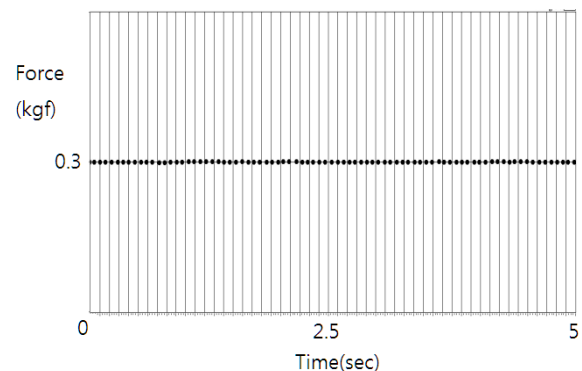
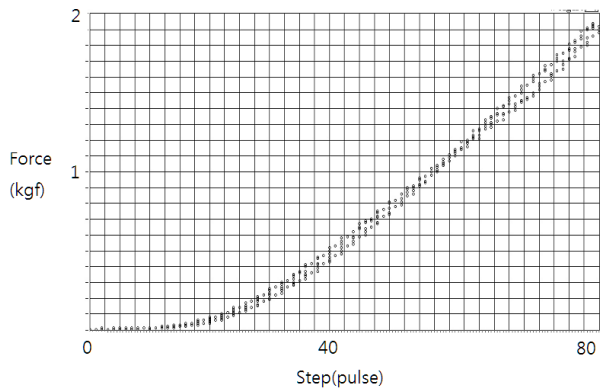


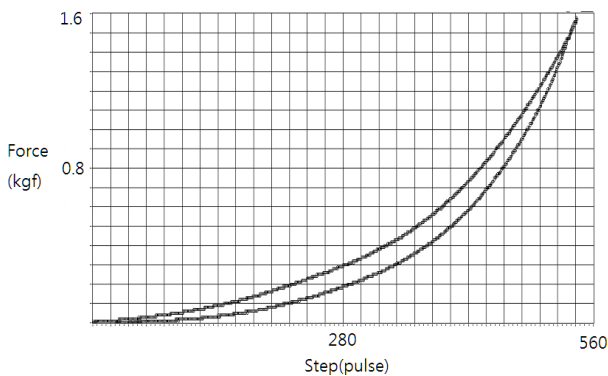
Fig. 3 Samle points for the force measurement

클수록 접촉하면서 힘이 증가하는 기울기가 완만하고 비선형적인 특성과 역방향 불일치가 커진다는 것을 보여준다. 특히 패드가 있는 경우에는 공구가 다시 상승하여 힘이 감소하는 경우에는 상승의 경로와는 다소 차이를 보이고 있다. 패드가 없이 에어백 공구만 사용하는 경우에는 연마 힘의 제어에서 비선형성과 상승 하강의 불일치의 오차는 고려하지 않아도 될 것으로 판단된다.

Fig. 5에서 보이는 것과 같이 공구가 10mm에서 하강하여 접촉하며 힘 상승이 발생하기 시작한 후 기준 힘 300gf 까지 안정화되는 데에도 약 2초 이상의 시간이 소요된다. 또한, 초기 안



(a) without and the bottom pad



(b) With the bottom pad

Fig. 4 Polishing force characteristics with the motor steps

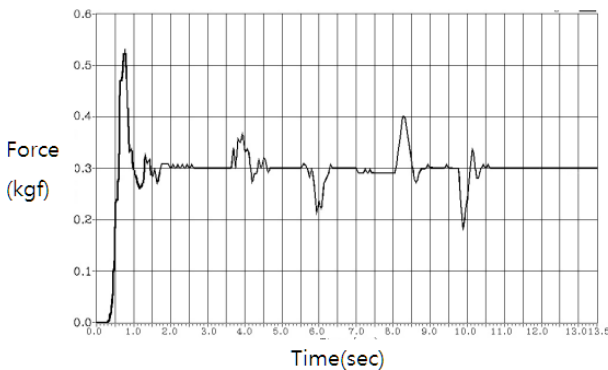


Fig. 5 Force control characteristics for the constant reference (300gf) using the indicator

정화 이후에도 계속적으로 힘 제어값의 변화가 간헐적으로 나타난다. 이것은 측정 신호의 노이즈(noise)와 측정 데이터 손실에 따라 제어 모터가 현재의 게인 값에서 결과적으로 과도하게 반응하여 불안정한 현상이 발생한 것이다.

2.4 AD 변환을 이용한 힘 측정 및 제어

인디케이터에서의 제어의 불안정성과 응답 특성의 저하를 개선하기 위한 방안으로 증폭기(amp)를 이용하여 로드셀의 힘 신호를 직접 증폭한 후 AD변환기를 이용하여 전송하는 방식을 Fig. 6과 같이 수행하였다. 측정값의 샘플링(sampling) 및 변환은 500Hz로 설정하였다.

폴리싱 연마 공구로서의 힘 특성과 모터 제어 변수를 파악하기 위해서 모터스텝을 증가하면서 로드셀의 힘 증가 경향을 다시 Fig. 7과 같이 다시 측정하였다.

공구의 하강에 따른 힘 증가는 접촉이 이루어진 25초 이후 대체로 선형적인 증가 특성을 보인다. 그러나 공구가 다시 상승하여 힘이 감소하는 경우에는 상승의 경로와는 차이를 보이고 있다. 연마 힘의 제어에서 비선형성과 상승 하강의 불일치의 오차는 고려하지 않아도 될 것으로 판단된다.

기준 힘을 500gf로 주고서 공구가 10mm 위치에서 하강하여 접촉하면서 설정 힘을 유지하도록 Fig. 8과 같이 실험하였다. 10mm 위치에서 하강하는데 소요되는 시간은 0.4초 정도이

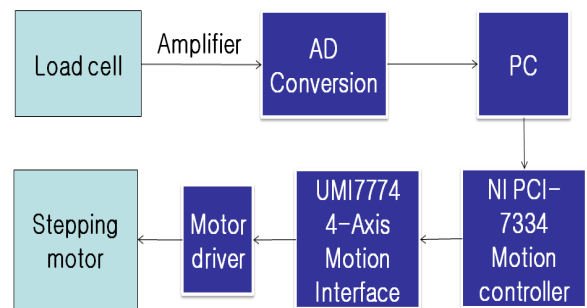


Fig. 6 The monitoring and control flow of the polishing load using the AD converter value

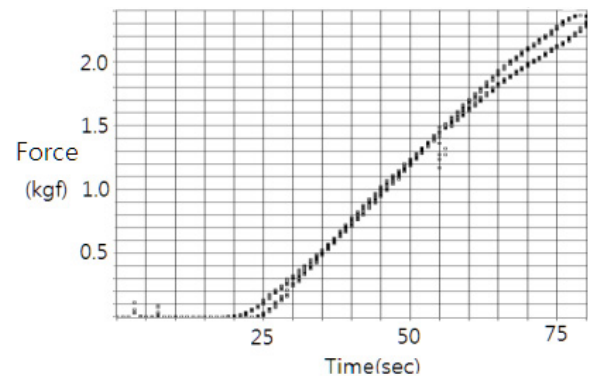


Fig. 7 Polishing force characteristics with the motor step

고 접촉 후 안정된 기준 힘까지 도달하는데 약 0.8초 정도 소요되었다. 모든 안정화 시간은 에어백 공구의 특성을 반영한 시간이라고 볼 수가 있다.

접촉 시점을 기준으로 볼 때 500gf의 변동량에 대하여는 0.8초의 시간이 필요하게 게인 세팅이 이루어졌다는 것을 알 수 있다. 공구 외에 연마를 위한 테이블 등은 정지한 것으로 공구를 이동하는 스테핑 모터만의 힘을 제어하기 위한 힘 제어 특성이다. 그리고 Fig. 9에서는 공구가 하강 안정화 된 후 임의적으로 테이블(table)에 변동 힘이 주고, 기준 힘을 유지하려는 제어 성능을 파악하는 실험을 수행하였다. 제어 성능 시험 결과, 기준 힘의 약 8%인 80gf의 변동치 범위 내에서 기준 위치로 복귀하려는 움직임을 성공적으로 보여 주었다. 또한, 처음부터 테이블(table)에 임의의 변동 힘을 별도로 지속적으로 부여하면서 공구가 하강 후 기준 힘으로 안정화되는지에 대한 실험을 Fig. 10과 같이 수행하였다.

테이블이 정지하는 경우보다는 안정화되는데 소요시간이 2초 이상 더 필요하였다.

기준 힘으로 안정화된 이후에는 Fig. 9와 거의 동일한 모습을 보이고 외부의 힘 변동 환경에서도 기준 힘인 500gf로 복귀하려는 안정된 움직임을 보여주고 있었다.

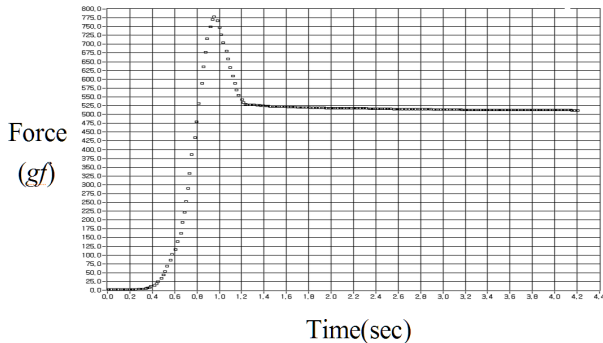


Fig. 8 Force control characteristics for the constant reference (500gf) using the AMP and AD converter

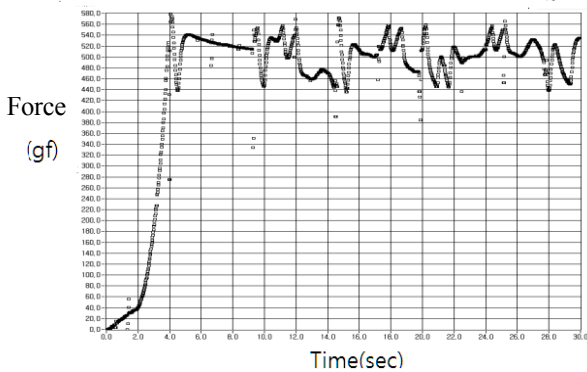


Fig. 9 Force control characteristics for the external disturbance after the tool settling

3. 연마 검증 실험

3.1 연마 시편 및 연마 조건

연마장치의 힘 제어의 성능 평가를 위한 연마 실험으로서, 채널(channel) 폭이 약 87 μ m의 스테인레스 스틸(stainless steel)

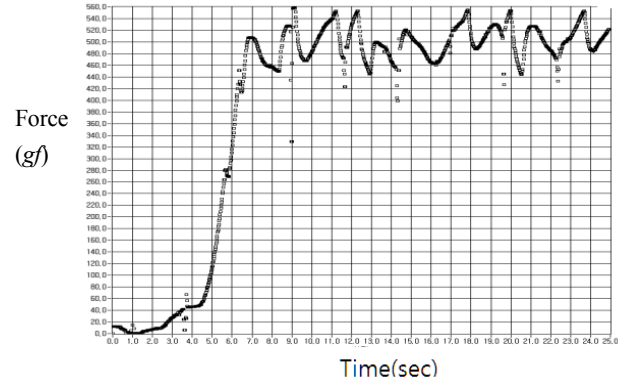
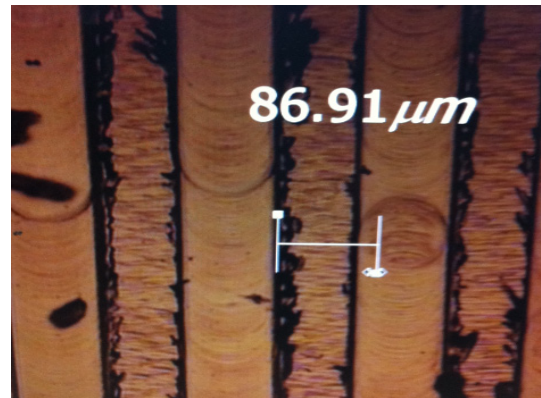
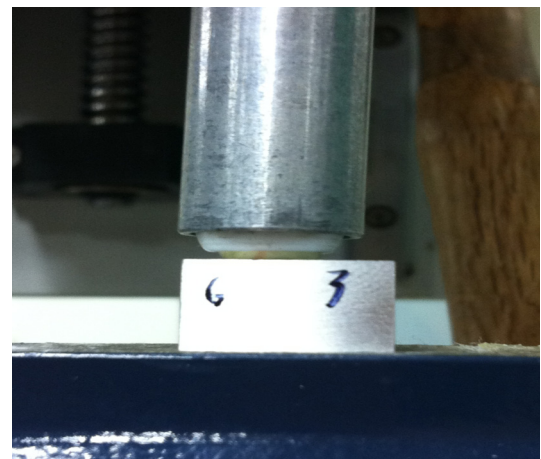


Fig. 10 Force control characteristics with the external disturbance before the tool settling



(a) Sample photo

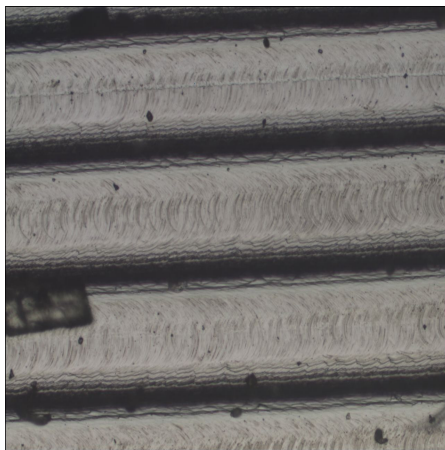


(b) Polishing with the airbag tool

Fig. 11 The polished sample with the microstructure and the following polishing experiment

Table 1 Polishing experimental parameters

Parameter	Value
Polishing load(<i>gf</i>)	335
Working distance(mm)	10
Airbag pressure(MPa)	0.2
Abrasive size(μm)	3
Polishing time(sec)	900
Tool rotation(rpm)	60
Table rotation(rpm)	60



(a) Before



(b) After

Fig. 12 The sample surface comparison by the polishing

재질의 미세 구조물을 초정밀 다이아몬드(diamond) 공구를 이용하여 기계가공으로 준비하였다. 가공된 형상은 채널 주위로 Fig. 11과 같이 채널 경계 주위로 버(burr)를 형성하고 있는 모습이다.

실험에 사용된 연마 조건은 다음과 같다. 편심운동의 연마 장치의 특성에 따라 공구는 정속 회전하고, 테이블이 병진 운동하는 형태이다⁽⁷⁾. 회전 속도는 각각 60rpm으로 설정되었다. 연마

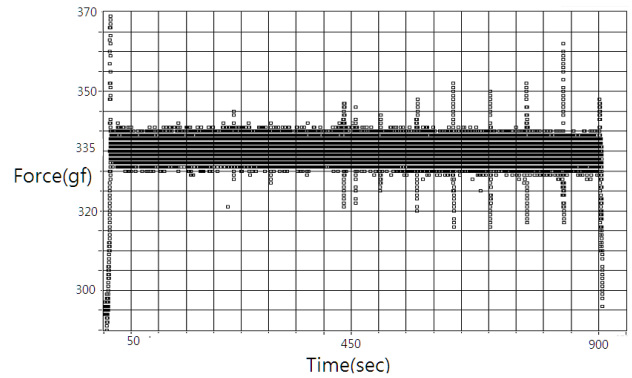


Fig. 13 Polishing Force control during the polishing process

공구는 10mm 만큼 시편 위에서 초기에 위치하였고 병진 운동하는 시편으로 하강하여 접촉하였다. 마이크로 채널이 가공된 스테인레스 스틸 재질의 시편의 연마를 위해 연마입자 크기 3 μm 의 다이아몬드 슬러리를 사용하였다. 에어백 형성을 위한 에어백 공기압은 0.2MPa로 설정하였다. 약 900초 동안 연마를 실시하였다. 연마 힘은 일정 크기 형태의 에어백 공구에서 335gf로 설정되어 제어되도록 하였다.

3.2 연마 실험 결과

연마 전후의 시편의 표면 상태를 현미경으로 Fig. 12와 같이 비교 측정하였다. 일정 시간의 연마로 금속표면을 연마한 결과, 채널 주변의 초기의 버는 성공적으로 제거되었다.

연마 공정 중의 테이블 진동 및 시편 경사 설치에 의한 수직 변동 부분에도 연마 힘은 약 10gf 이내의 일정폭 내에서 힘 제어가 적절하게 이루어졌다.

4. 결론

연마 힘을 실시간으로 측정하여 연마 힘제어에 사용하기 위해 로드셀과 랩뷰, 슬라이드 일체형 스테핑모터를 이용하여 구현하였다. 로드셀 인디케이터를 이용하는 방식과 로드셀 신호를 직접 증폭하여 사용하는 방식의 두 가지를 병행하였으며, 결과적으로 인디케이터의 응답성을 개선하였다.

점탄성의 특성을 가지는 에어백 공구의 연마 힘을 제어한 결과, 10mm의 위치에서 하강하는데 소요되는 시간은 0.4초 정도이고 접촉 후 500gf 기준 힘 설정에 대하여 안정되게 도달하는데 약 0.8초 정도 소요되는 응답 성능을 얻었다. 안정화 후에는 약 5% 이내의 변동 폭을 보이는 제어 성능을 보였다.

연마 실험으로서 마이크로 채널 형태로 초정밀 기계 가공된 연마시편에 대하여 에어백공구의 힘 제어 상태에서 연마를 수행하여 표면의 버를 적절하게 제거 가능함을 보였다. 또한 자유 곡면과 마이크로 광학 소자의 표면 연마 공정에서도 연마 힘 제어 장치의 이용이 가능할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 한국 연구재단 과제번호(KRF-2008-D00061)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- (1) Lee, H., and Yang, M., 2001, "Dwell Time Algorithm for Computer-controlled Polishing of Small Aaxis-symmetrical Aspherical Lens Mold," *Optical Engineering*, Vol. 40, No. 9, pp. 1936~1943.
- (2) Jiao, C., Li, S., and Xie, X., 2009, "Algorithm for Ion Beam Figuring of Low-gradient Mirrors," *Applied Optics*, Vol. 48, No. 21, pp. 4090~4096.
- (3) Kim, D., and Burge, J. H., 2010, "Rigid Conformal Polishing Tool using Non-linear Visco-elastic Effect," *Optics Express*, Vol. 18, No. 3, pp. 2242~2257.
- (4) Lee, H., 2007, "A Study on Optics Polishing Technology by Adaptive Tool and Eccentric Motion Mechanism," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 16, No. 6, pp. 133~139.
- (5) Deng, Y., Yu, A., Li, W., and Zhen, D., 2010, "Study on Force Control in Abrasive Polishing of Aspheric Parts," *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 37~38, No. 11, pp. 1287~1291.
- (6) Igarashi, K., Sato, M., and Kakinuma, Y., 2011, "Buffing Performance Analysis of Viscoelastic Polymer with Sensor-less Polishing Pressure Control," *Advanced Materials Research*, Vol. 325, No. 8, pp. 482~488.
- (7) Lee, H., Kim, J., and Kang, H., 2010, "Airbag Tool Polishing for Aspherical Glass Lens Molds," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 24, No. 1, pp. 153~158.