

압전 재료를 이용한 초정밀 가공기용 공구 위치 제어

(Position Control of Ultra-Precision Machine Tool Postusing Piezoelectric Material)

김태형 (대우중공업 공작기계사업본부 연구개발실)

김승한, 송하성, 송재욱, 김의중 (고등기술연구원 생산기술연구실)

Abstract

This paper presents a position control of ultra-precision machine tool post using piezoelectric material. A stack-type piezoelectric actuator is employed in a hinge-type tool holder. An assumed linear transfer function of the practical nonlinear plant is established through the comparison of transfer functions and step responses in the experiments and the simulations. Several types of feedforward/feedback controllers are designed via computer simulations using the assumed linear transfer function. The position tracking control experiments are undertaken to show the control efficiency of each controller.

1. 서론

반도체, 광통신 시스템, 우주 항공 분야의 발전은 초정밀가공기술을 기초로 하고 있으며, 전자산업의 고도화로 초정밀 가공 기술에 대한 수요는 날로 증가하고 있다. 일반적인 다이아몬드 터닝에서는 절입량이 수 μm 에서 수십 μm 이지만, 이 절입량을 서브마이크로미터 이하로 제어하면 결정립 경계에서의 높이차이와 결함이 없는 이상적인 표면이 얻어질 가능성이 있다⁽¹⁾. 그러나 초정밀 가공기는 공구대가 조립된 슬라이드의 행정거리가 수백mm로 나노급의 위치 결정 분해능을 얻기 어렵고, 슬라이드의 관성력이 크기 때문에 공구와 가공물간의 동적인 상대오차를 보상하기에 충분한 응답속도를 얻기 어렵다. 따라서 최근 고분해능과 고응답성을 갖는 미소절삭장치(Fast Tool Servo)를 개발하여 이러한 문제를 해결하기 위한 많은 연구가 수행되었다.

본 논문은 압전 재료를 이용한 초정밀 가공기용 미소절삭장치(Fast Tool Servo) 공구의 위치제어에 대한 것으로서, 적층형 압전 구동기를 이용한 힌지형 공구대를 설계하여 미소절삭장치 공구의 초정밀 위치제어를 실현하고자 하였다. 전달함수와 스텝응답을 실험과 시뮬레이션을 통하여 비교함으로써 hysteresis를 포함하는 비선형 플랜트에 대한 가정적인 선형 전달함수를 구하였고, 이것을 시뮬레이션에 적용하여 feedforward/feedback 제어기를 설계하였으며, 이러한 제어기를 실험에 적용하여 제안된 제어기의 성능을 확인하기 위한 위치 추적 제어를 실시하였다.

2. 힌지형 공구대 설계

Fig.1은 힌지형 공구대의 형상을 나타낸 것으로서, PZT에 전압을 가하면 PZT의 길이 방향으로 미소변위가 발생한다.

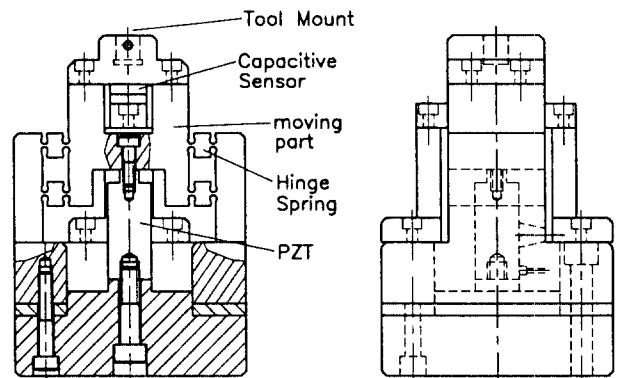


Fig. 1 Hinge-Type Tool Holder

이러한 미소변위는 힌지스프링으로 base와 연결된 moving part에 전달되어 공구에 미소변위를 발생시키며, 힌지스프링을 양쪽에 대칭으로 설계함으로써 PZT

의 변위가 오직 공구의 PZT 길이 방향 이송만을 발생 시키도록 하였다.

Fig.2와 같은 노치형굽힘힌지(notched hinge)에 대한 Paros & Weisbord의 강성식⁽²⁾은 아래와 같으며

$$K_B = \frac{2Eht^{5/2}}{9\pi R^{1/2}} \quad (1)$$

여기서 E 는 Young's modulus이고 R 은 notch radius이며, t 는 flexure의 가장 얇은 곳의 두께이고, h 는 굽힘힌지의 폭이다.

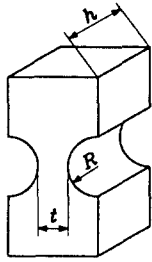


Fig. 2 Notched Hinge

Fig.1의 공구대 반쪽에 해당하는 힌지 스프링은 다음의 그림과 같으며,

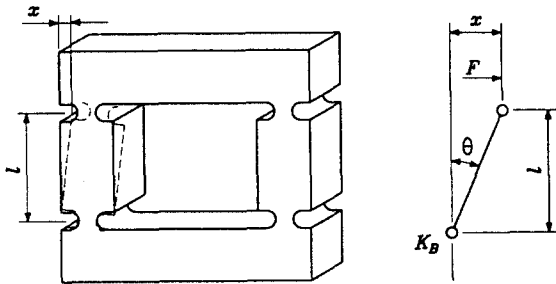


Fig. 3 Hinge Dimensions and Various Forces

힌지 한 개의 굽힘강성을 K_B 라 하면, 거리 x 만큼 움직이기 위한 힘 F 는 다음과 같이 구하여지고, 여기서 $\theta = \frac{x}{l}$ 이다.

$$F \frac{l}{2} = K_B \theta \quad (2)$$

$$F = \frac{2K_B}{l^2} x \quad (3)$$

Fig.3에는 힌지가 2개 있으므로 강성은 다음과 같으며,

$$K_{Fig.3} = 2 \times \frac{2K_B}{l^2} \quad (4)$$

결국 Fig.1의 Hinge-Spring System 강성은 아래와 같다.

$$K_{HSS} = \frac{8K_B}{l^2} \quad (5)$$

따라서 공구대 강성은 다음과 같이 구하여지고, 여기서 K_P 는 PZT의 강성이다.

$$K_{TH} = K_{HSS} + K_P \quad (6)$$

PZT는 임의의 강성(K_P)과 최대입력전압(U_0)에 대한 stroke(ΔL_0)를 갖고 있기 때문에 힌지스프링의 반력에 의해 전체 stroke가 축소되며, 이 경우 전체 stroke(ΔL)를 구하기 위한 모델링은 아래의 그림과 같다.

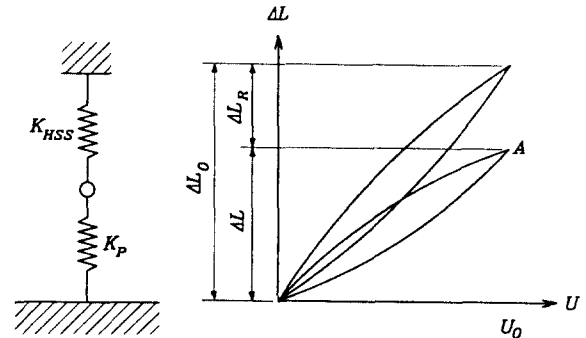


Fig. 4 Tool Holder Stroke Modeling

Fig.4에서 PZT가 팽창한 후 위치 A에서 평형을 이루면 이때 K_{HSS} 에 의해 발생하는 힘 F 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F &= K_{HSS} \Delta L = K_P \Delta L_R \\ &= K_P \cdot (\Delta L_0 - \Delta L) \end{aligned} \quad (7)$$

그러므로 공구대 전체의 stroke는 아래와 같다.

$$\Delta L = \frac{K_P}{K_{HSS} + K_P} \Delta L_0 \quad (8)$$

3. 시스템 모델링 및 제어기 설계

3.1 시스템 모델링의 목적

단순한 2차 운동방정식 형태의 시스템 모델링은, 대부분의 경우, 실제 시스템의 거동 예측에 적용하는 것이 부적합할 뿐만 아니라, 시스템을 이용하여 제어기를 설계함에 있어서 실제로 적용되어야 하는 제어기와 대단히 큰 차이를 발생시킬 수 있으므로 제어 성능

예측에 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 시스템의 특성을 나타내는 주파수 전달함수와 step response를 통하여, 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 상호 비교함으로써, PZT의 hysteresis 비선형성을 갖는 실제 시스템과 유사한 선형 시스템을 모델링하고자 하였으며, 이러한 선형 시스템을 시뮬레이션을 통한 제어기의 설계 및 게인 설정에 적용하고자 하였다.

3.2 고전압 증폭기 모델링

전달함수를 통한 고전압 증폭기의 모델링을 실험을 통하여 실시하였다. DC gain이 100으로 설정되어 있는 고전압 증폭기는 다음과 같은 2차 요소 형태로 모델링되었으며 여기서 $\omega_a = 5300 \times 2\pi \text{ rad/s}$ 이다.

$$G_{Amp} = \frac{100}{\frac{1}{\omega_a} s + 1} \cdot \frac{1}{\frac{1}{\omega_a} s + 1} \quad (9)$$

3.3 변위 센서 모델링

본 실험에서 변위센서로 사용된 capacitive sensor (model D-050.00, Physik Instrumente(PI))의 bandwidth는 1.5kHz로 설정되어 있으며, 다음과 같은 1차 요소로 모델링되었고, $\omega_s = 1500 \times 2\pi \text{ rad/s}$ 이다.

$$G_{Sensor} = \frac{1}{\frac{1}{\omega_s} s + 1} \quad (10)$$

3.4 공구대 모델링

공구대(Fig.1)에 중량을 단계적으로 인가하여 그에 대한 변위량을 측정하였고, 이들의 상관관계를 통하여 공구대의 강성을 측정된 결과는 Fig.5와 같으며, 강성치는 $K_{TH} = 141.63 \text{ N}/\mu\text{m}$ 이다.

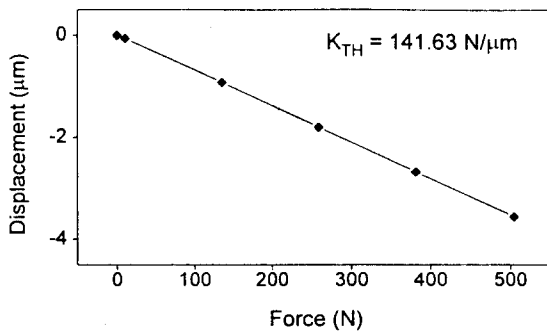


Fig. 5 Stiffness of Tool Holder

인가전압을 1000V까지 가하여 측정된 공구대의 변위량은 $14.13 \mu\text{m}$ 이었으며, 따라서 공구대 전달함수의 DC gain은 $DCgain = 14.13/1000 \mu\text{m}/V$ 이다. 또한 진동시험을 통하여 구하여진 공구대의 지배적인 진동모드의 고유진동수는 $\omega_n = 2186 \times 2\pi \text{ rad/s}$ 이었다. 그리고, 과도진동시험을 수행하여 그의 진동파형에 대한 logarithmic decrement를 분석한 결과, 지배적인 진동모드에 대한 감쇠비는 $\zeta = 0.06$ 임을 알 수 있었다.

Fig.6은 control systems analyzer(model 3563A, HP)를 통하여 구해진 실제 plant의 전달함수와 시스템 모델링을 통하여 구해진 전체 plant 전달함수에 대한 시뮬레이션 결과이다. 여기서 실험결과를 보면, 고전압 증폭기 및 변위 센서와 연계된 공구대의 시스템 특성이 고차의 전달함수로 이루어져 있고, 고전압 증폭기와 변위 센서를 제외한 순수한 공구대의 전달함수도 2차 이상의 고차 전달함수로 이루어져 있다는 것을 알 수 있다. 또한 plant에 대한 step response 실험을 수행한 결과, Fig.7에서 알 수 있듯이, 1차 요소가 포함된 경우에 두드러지게 나타나는 반응 지연 현상과 over-shoot에서 첫째 pick보다 두번째 pick가 더욱 커지는 현상이 관측됨에 따라, 실험을 통하여 구한 전체 시스템의 전달함수와 비교 분석한 결과, 공구대의 전달함수가 두개의 1차 요소와 지배적인 진동모드인 2차 요소가 직렬로 연결되어 있는 시스템임을 추론할 수 있었다. 따라서, 모델링이 완료된 고전압 증폭기, 지배적인 진동모드를 갖고 있는 공구대의 2차 요소, 그리고 변위센서를 제외한, 추가적인 두 개의 1차 요소를 모델링하기 위하여 실험 결과와 모델링 시뮬레이션을 통하여 전달함수와 step response를 Fig.6, Fig.7과 같이 상호 비교함으로써 다음과 같은 4차 전달함수를 갖는 공구대를 모델링하였으며, $a = 2300 \times 2\pi \text{ rad/s}$ 이다.

$$G_{TH} = \frac{1}{\frac{1}{a} s + 1} \cdot \frac{1}{\frac{1}{a} s + 1} \cdot \frac{DCgain \times \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (11)$$

앞서 수행한 모델링 결과를 종합하여 다음과 같은 전체 plant의 전달함수를 정의할 수 있다.

$$G_{Plant} = G_{Amp} \cdot G_{TH} \cdot G_{Sensor} \quad (12)$$

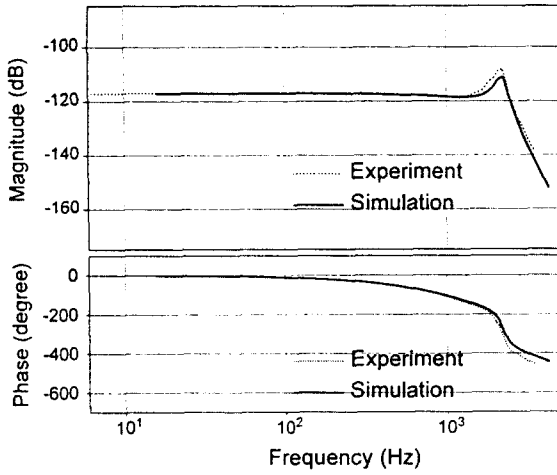


Fig. 6 Frequency Response of Plant (G_{Plant})

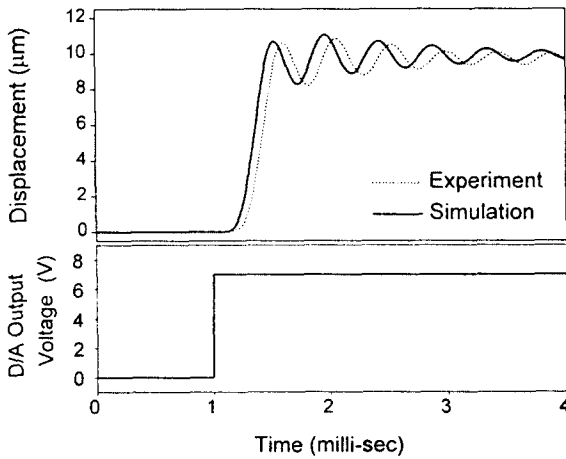


Fig. 7 Comparison of Step Response

3.5 FF/FB(Feedforward/Feedback) 제어기 설계

아래의 Fig.8은 본 논문에서 설계한 FF/FB 제어기의 블록 선도이다.

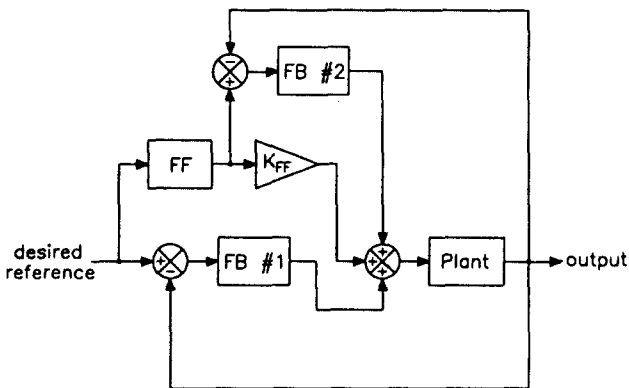


Fig. 8 Block Diagram of FF/FB Controller

본 연구를 위하여 설계되었던 제어기는 다음과 같

으며,

Table 1 Controllers

	FB #1	FB #2	FF
1) PI(비례-적분)	PI	0	0
2) FF/FB_1	PI	0	1(unity)
3) FF/FB_2	PI	0	Lead
4) FF/FB_3	I(적분)	P(비례)	Lead

여기서 1)은 시스템 모델링에서 설정한 가정적인 선형 전달함수를 Ziegler-Nichols법에 도입하여 구한 계인을 기준으로, 시뮬레이션에서 tuning을 실시하여 설정한 조정 계인을 적용한 것이며, 이러한 조정 계인은 2)와 3)에도 그대로 적용된다. 2)는 1)에 FF(=1)를 추가한 것으로서 desired reference를 계인 K_{FF} 로 증폭시키고 이것을 FB #1과 합하여 plant에 입력하게 된다. 3)은 1)에 FF(=Lead)를 추가한 것으로서 본 연구에서 설계된 lead 제어기는 다음과 같으며,

$$Lead = \frac{\frac{1}{2000}s + 1}{\frac{1}{20000}s + 1} \quad (13)$$

이를 통하여 desired reference를 lead처리하고 계인 K_{FF} 로 증폭시킨후, FB #1과 합하여 plant에 입력하게 된다. 4)는 적분 제어기를 적용한 FB #1, desired reference를 lead처리한 신호와 plant output간의 차에 대하여 비례 제어기를 적용한 FB #2, 그리고 desired reference를 lead처리한 후 계인 K_{FF} 로 증폭시킨 피드포워드를 모두 합산하여 plant에 적용하는 제어기로서, 여기서 FB #2의 역할은 실제 plant의 hysteresis에 대한 제어기의 성능을 보장하는 것이다. 1)에서 4)까지 단계적으로 제어기 설계를 변경함에 따라, 제어기의 추종성능은 현저히 향상되었으며, 본 논문의 제어실험 결과는 가장 성능이 우수한 제어기 4)를 적용한 경우이고 이때 각 제어기 계인은 미터[m] 단위를 기준으로 하였을 경우 FB #1의 $K_i = 3e9$ 이며, FB #2의 $K_p = 5e5$ 이고, FF의 $K_{FF} = 7.9e5$ 이다.

4. 제어 실험 결과

4.1 제어 실험 조건

제어 실험은 desired reference를 40 Hz의

frequency와 $7.2 \mu\text{m}$ 의 stroke를 가진 파형으로 설정하여 수행하였다.

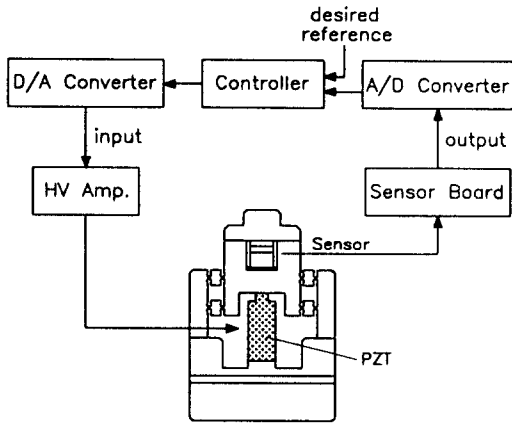


Fig. 9 Experimental Apparatus

Fig.9는 실험을 위한 experimental apparatus를 나타낸 것으로서, capacitive sensor(model D-050.00, PI)의 신호가 sensor board(model E-150.00, PI)를 통하여 출력되어 A/D converter로 입력되고, 이것과 desired reference를 근거로 PC에서 제어기가 계산되어 D/A converter를 통하여 High Voltage(HV) Amp. (model P-270.01, PI)로 입력되며, Amp.에서 증폭된 제어 전압이 PZT(model P-245.20, PI)로 전달된다.

Converter(model PCL-818, Advantech)를 통한 제어기의 작동 주기는 10kHz이었고, D/A converter가 12bit resolution, 0~10V range로 설정되어 제어기의 해상도는 2.44mV이었다.

4.2 Open-loop 제어 실험 결과

Fig.10은 open-loop 제어실험 결과이다.

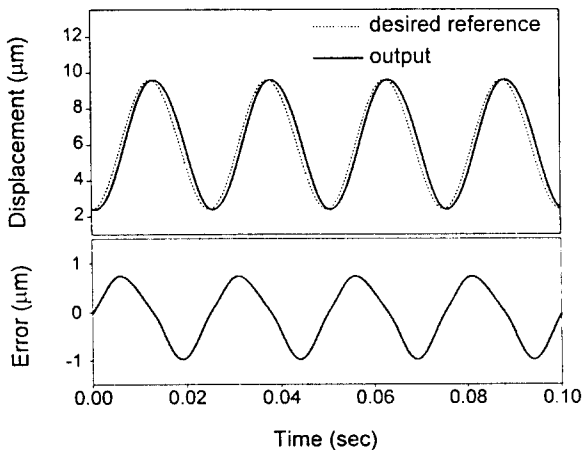


Fig. 10 Open-Loop Control

앞의 그림에서 볼 수 있듯이, 개회로 제어시에는 약 $1.8 \mu\text{m}$ 의 peak-to-peak error가 발생함을 알 수 있으며, 단순한 개회로 제어로는 원하는 성능을 얻을 수 없음을 알 수 있다.

4.3 FF/FB 제어 실험 결과

Fig.11은 FF/FB₃ 제어기를 적용한 경우이다. 그림에서 알 수 있듯이, FF/FB₃ 제어기를 사용할 경우, 약 80 nm 의 peak-to-peak error를 발생시켜, 대단히 향상된 제어성능을 발휘함을 알 수 있다.

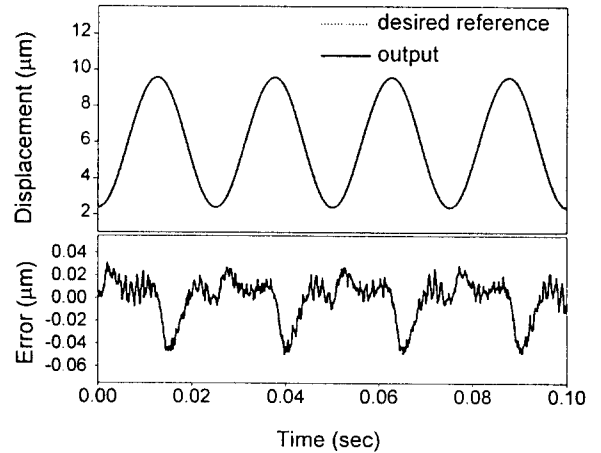


Fig. 11 FF/FB₃ Control

4.4 해상도(Resolution) 시험 결과

40Hz의 주파수와 10nm의 stroke를 가진 파형에 대한 추종 제어 실험을 통하여 구해진 해상도 시험 결과는 아래의 Fig.12와 같으며, 그 결과에서 알 수 있듯이 10nm이하의 충분한 해상도를 가짐을 알 수 있다.

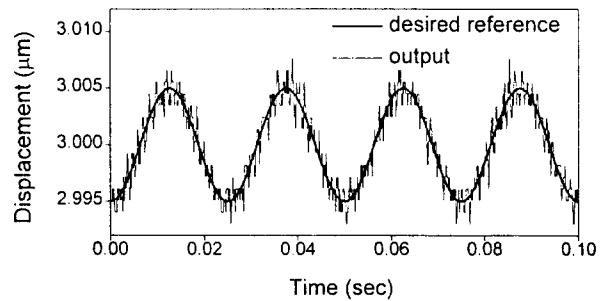


Fig. 12 Resolution

5. 결론

제어 실험 결과, 본 논문에서 설계한 FF/FB 제어

기를 이용함으로써, 40 Hz의 frequency와 7.2 μm 의 stroke를 갖는 desired reference에 대한 초정밀 가공기용 미소절삭장치(Fast Tool Servo) 공구의 위치제어를 80 nm의 peak-to-peak error 범위내에서 수행할 수 있음을 확인하였다. 향후 더욱 우수한 제어성능을 갖는 제어기의 설계와 실제 가공시험을 수행하여 가공면의 상태를 측정할 계획이다.

참고문헌

1. Suguru Motonishi, Yoshihiro Hara and Koji Yoshida, "A New Micro Cutting System with High Resolution," JSPE-57-12, pp. 59-64, 1991.
2. Paros, J. M. and Weisbord, L. "How to design flexure hinges," Machine Design, 27, pp. 151-156, 1965.