

# 압전 구동기를 이용한 미소절삭 공구대의 정밀위치제어

송재욱\*, 김승한\*, 송하성\*, 김호상\*

## Precision Position Control of a Fast Tool Servo Using Piezoelectric Actuators

J. W. Song\*, S. H. Kim\*, H. S. Song\*, H. S. Kim\*

### ABSTRACT

A fast tool servo (FTS) for diamond turning improves machining accuracy by quickly compensating relative position errors between the cutter and the workpiece. Therefore, the FTS needs to have large bandwidth with good tracking performance. Serious hysteresis nonlinearity of PZT actuators used in the FTS, however, deteriorates fast tracking performance. Several types of feedforward hysteresis compensators and feedback controllers are tested to improve tracking performance. Through simulations and experiments, control structure which yields the smallest tracking error is selected. The maximum peak to peak error in tracking a sinusoidal waveform is reduced by one fifth compared to that of a regular PID controller.

**Key Words** : Fast tool servo(미소절삭 공구대), Piezoelectric actuator(압전 구동기),

Hysteresis compensator(이력보상기), Precision position control(정밀위치제어)

### 1. 서론

반도체, 광통신 시스템, 우주 항공 분야의 발전은 초정밀가공기술을 기초로 하고 있으며, 전자산업의 고도화로 초정밀 가공 기술에 대한 수요는 날로 증가하고 있다. 초정밀 가공기술범중 많이 사용되는 다이아몬드 절삭가공에서는 공작물과 공구의 상대위치의 정확도가 가공물의 정밀도를 좌우한다. 따라서 고정밀도 주축과 더불어 고분해능과 고응답성을 지닌 공구이송장치로 상대위치 오차를 감소시킬 필요가 있다. 그러나 초정밀 가공기는 공구대가 조립된 슬라이드의 행정거리가 수백mm로 나노급의 위치 결정 분해능을 얻기 어렵고, 슬라이드의 판성력이

크기 때문에 공구와 가공물간의 동적인 상대오차를 보상하기에 충분한 응답속도를 얻기 어렵다. 따라서 최근 고분해능, 고응답성 및 고강성 특성을 갖는 적층형 압전구동기를 이용한 미소절삭 공구대(Fast Tool Servo:FTS)를 개발하여 이러한 문제를 해결하기 위한 많은 연구가 수행되었다<sup>(1,2)</sup>. 그러나 압전구동기는 심한 비선형특성이 있어 이를 개선하기위하여 1) 압전구동기를 전압이 아닌 전하로 구동하는 연구<sup>(3)</sup>, 2) 비선형 특성을 모델링하여 feedforward로 적용하는 연구<sup>(4,5,6)</sup>, 3) 변위센서를 이용한 폐회로 제어기법에 관한 연구<sup>(2,7)</sup>등이 발표되었다.

본 논문은 압전구동기를 이용한 미소절삭 공구대(FTS)의 위치제어에 대한 것으로서, 압전 구동기의 비선

\* 고등기술연구원 생산기술연구소

형성을 보정하여 고속응답시의 추종성을 개선하였다. 먼저 압전구동기를 포함한 FTS의 비선형특성을 입력조건을 변화시키며 분석하여 비선형특성을 파악하고 이를 효과적으로 제거하는 보정기법을 제시하였다. 그리고 실험과 시뮬레이션을 통해 비선형 시스템에 대한 근사적 선형 전달함수를 구하여 feedforward/feedback 제어를 설계하고 고속추종실험을 통해 가장 추종성능이 우수한 제어구조를 선정하였다.

## 2. FTS 시스템 구성 및 모델링

### 2.1 FTS 시스템

FTS시스템은 Fig. 1에 도시된 바와 같이 FTS공구대, 고전압 증폭기, data acquisition 시스템으로 구성되어 있으며 주요 구성요소의 상세사항을 Table 1에 설명하였다. FTS 공구대는 강성을 증가시키기 위해 힌지형 스프링을 적용하여 Fig. 2와 같이 설계하였다. PZT구동기에

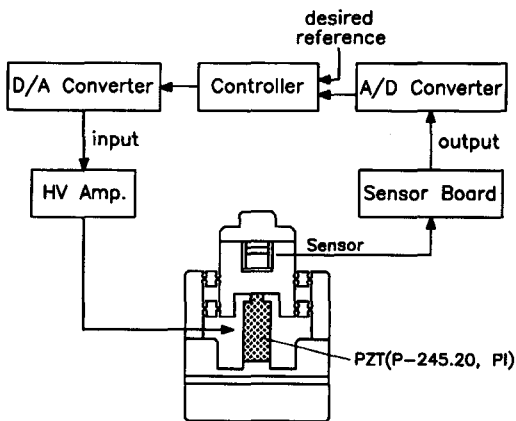


Fig. 1 FTS system

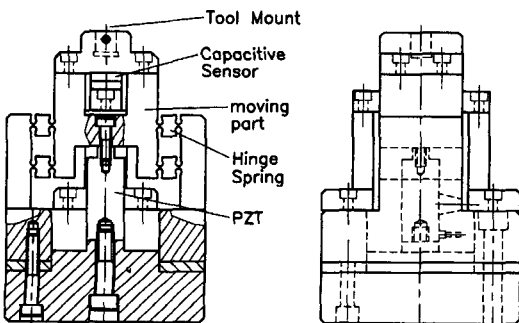


Fig. 2 Hinge-Type Tool Holder

전압을 가하면 PZT의 길이 방향으로 미소변위가 발생한다. 이러한 미소변위는 힌지스프링으로 base와 연결된 moving part에 전달되어 공구에 미소변위를 발생시키며, 힌지스프링을 양쪽에 대칭으로 설계함으로써 PZT의 변위가 오직 길이 방향만으로 전달되도록 하였다. FTS 시스템은 100 Hz까지의 오차보정지령을 서브미크론 수준으로 추종하여야 한다.

Table 1 Main specifications of FTS system

장비	사양	
압전 구동기	제품명	PI(Physik Instrumente) P-245.20
	최대 변위량	20 $\mu\text{m}(\pm 10 \%)$
	정전용량	@ 0 $\rightarrow$ 1000 V 100 nF ( $\pm 20 \%$ )
	온도팽창 계수	0.45 $\mu\text{m}/\text{K}$
고전압 증폭기	제품명	PI E-120 signal processing module
	출력범위	0 - 1000 V,
	대역폭	1.5 KHz
변위센서	제품명	PI capacitive sensor D-050.00
	입력범위	50 $\mu\text{m}$
	출력범위	0 - 10 V, $\pm 5\text{V}$

### 2.2 FTS 시스템 모델링

FTS 시스템은 심한 비선형 특성을 지닌 PZT구동기를 사용하므로 단순한 선형 2차 운동방정식으로 실제 시스템의 특성을 표현할 수 없다. 따라서 시스템의 특성을 나타내는 주파수 전달함수와 계단응답의 실험결과를 사용하여 실제 시스템과 유사한 특성을 나타내는 고차 전달함수를 구하고 이를 이용하여 제어를 설계하였다.

#### 2.2.1 고전압 증폭기

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

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

2.2.2 변위 센서 모델링

본 실험에서 변위센서로 사용된 capacitive sensor는 1차 요소로 모델링되었고, 여기서  $\omega_s = 1500 \times 2\pi \text{ rad/s}$  이다.

$$G_{\text{Sensor}} = \frac{100}{\frac{1}{\omega_s} s + 1} \quad (2)$$

2.2.3 공구대 모델링

공구대에 중량을 단계적으로 인가하여 그에 대한 변위량을 측정하였고, 이들의 상관관계를 통하여 공구대의 강성을 측정한 결과는 Fig. 3과 같으며, 강성치  $K_{TH} = 141.63 \text{ N}/\mu\text{m}$  이다. 인가전압을 1000V까지 가하여 측정한 공구대의 변위량은  $14.13\mu\text{m}$ 이었으며, 따라서 공구대 전달함수의 DC gain은  $14.13/1000 \mu\text{m}/\text{V}$  이다. 또한 진동시험을 통하여 구한 공구대의 지배적인 진동모드의 고유진동수는  $\omega_n = 2186 \times 2\pi \text{ rad/s}$  이었다. 그리고, 과도진동시험을 수행하여 진동과형에 대한 로그함수적 감쇠현상을 분석한 결과, 지배적인 진동모드에 대한 감쇠비는  $\zeta = 0.06$ 임을 알 수 있었다.

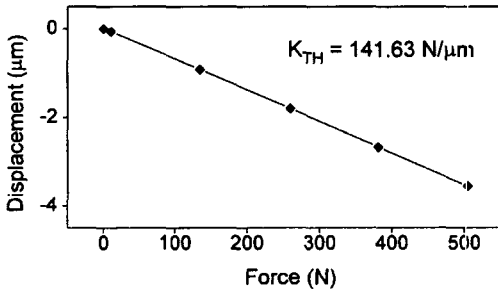


Fig. 3 Stiffness of Tool Holder

Fig. 4는 control systems analyzer(model 3563A, HP)를 통하여 구한 실제 plant의 전달함수와 시스템 모델링을 통하여 구한 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 계단응답실험을 수행한 결과, Fig. 5에서 알 수 있듯이, 1차 요소가 포함된 경우에 두드러지게 나타나는

반응 지연 현상과 오버슈트에서 첫번째 피크보다 두번째 피크가 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 시스템으로 추론할 수 있었다. 전달함수와 계단응답실험결과를 시뮬레이션과 상호 비교함으로써 다음과 같은 4차 전달함수를 갖는 공구대를 모델링하였으며 여기서  $a = 2300 \times 2\pi \text{ rad/s}$  이다.

$$G_{TH} = \frac{1}{\frac{1}{a} s + 1} \cdot \frac{1}{\frac{1}{a} s + 1} \cdot \frac{DCgain \times \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3)$$

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

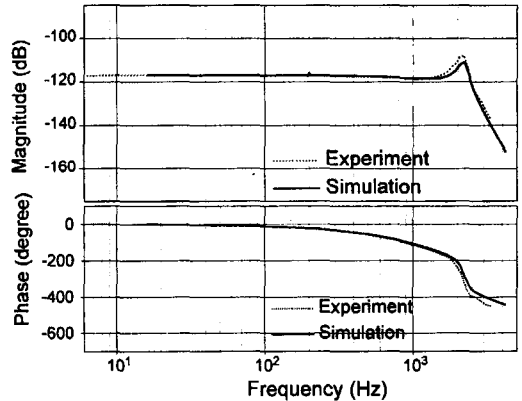


Fig. 4 Frequency Response of Plant  $G_{\text{Plant}}$

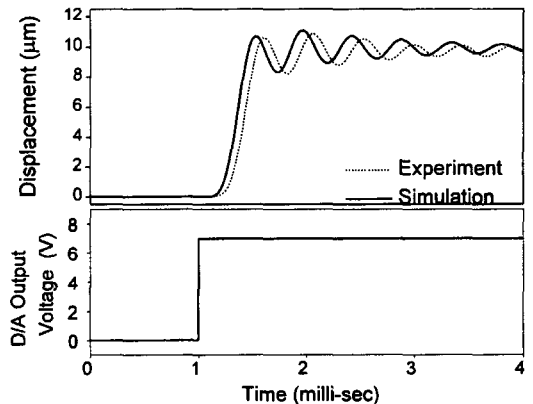


Fig. 5 Comparison of Step Response

$$G_{Plant} = G_{Amp} \cdot G_{TH} \cdot G_{Sensor} \quad (4)$$

### 3. 비선형 특성 보상기 설계

#### 3.1 히스테레시스 특성시험

시스템의 비선형특성은 공구대의 기계적 특성보다는 압전구동기의 물성과 전기적 비선형특성으로 인한 히스테레시스 현상이 지배적이나 공구대의 정밀위치제어를 위해서는 압전구동기를 포함한 전체 시스템의 특성을 고려하여야 하므로 Fig. 1과 같이 압전구동기가 공구대에 조립된 상태에서 입력전압에 대한 출력변위의 히스테레시스 특성시험을 수행하였다.

입력조건 변화에 따른 비선형 특성 변화를 관찰하고 또한 히스테레시스의 천이현상을 파악하기 위해 1Hz와 100Hz 사인파를 10분간 500V 진폭(500V 윽셋)으로 고전압증폭기에 입력하였고 각 주파수별로 입력을 인가한 후 0분, 4분, 8분, 10분경과시의 데이터를 수집하였다. Fig. 6 a), b)에 도시된 실험결과를 보면 입력 주파수가 높아질수록 히스테레시스의 폭이 커지고 히스테리시스 모양이 타원형으로 변화하는 것을 알 수 있다. 특히 minor loop의 행태는 더욱 큰 차이를 보여준다. 1Hz 입력시 1차 반전곡선이 major loop를 따르다가 반전되는 양상을 보이거나(Fig. 6-a) 100Hz에서는 1차 반전곡선이 major loop과 분리되어 major loop과 닮은꼴의 loop이 형성된다 (Fig. 6-b). 이런 현상은 압전구동기의 물성에

의한 히스테레시스현상과 제어시스템의 전기적/기계적 동특성이 복합되어 발생하는 것으로 저주파 입력신호시에는 히스테레시스현상에 의한 비선형특성이 지배적이다가 입력신호의 주파수가 증가할수록 제어시스템의 동특성에 의한 비선형특성이 커지는 것으로 이해된다. 따라서 압전구동기의 비선형특성을 모든 입력조건에 대해 보상하기 위해서는 물성으로 인한 히스테레시스현상과 동특성에 의한 비선형 특성을 분리하여 고려하여야 한다. 또한 히스테레시스 루프가 동일 입력조건시에도 시간에 따라 변위축 방향으로만 천이하는 현상은 주로 압전구동기의 온도팽창에 기인한다<sup>5)</sup>. 이 현상은 폐회로 제어를 적용하면 충분히 극복할 수 있으므로 큰 문제가 없으나 개회로 제어를 적용할 경우에는 압전구동기가 열평형상태에 이른 후 입력조건 변화가 크지 않도록 주의하여야 한다.

#### 3.2 비선형 역이력 모델

압전구동기의 물성으로 인한 히스테레시스현상은 고속 추종 제어시 위상지연을 일으켜 추종오차를 증가시킨다. 따라서 추종오차를 감소시키기 위하여 히스테레시스현상에 대한 모델을 feedforward방식으로 적용할 필요가 있으며 물성으로 인한 히스테레시스현상을 정확히 반영하기 위해서는 1Hz 미만 입력시의 히스테레시스 데이터를 사용하여야 한다.

여러 히스테레시스현상 모델링 기법중에서 정승배<sup>6)</sup>의 기법이 히스테레시스현상을 함수로 간결하게 표현하여 모델링이 간단하고 실시간 적용이 용이하다. 그러나 정승배의 기법은 주어진 입력전압에 대해 변위량을 예측하는 forward 방식으로 히스테레시스 모델을 제어 시스템에 적용하기 위해서는 원하는 변위량이 주어지면 이에 해당하는 입력전압을 예측하는 inverse기법이 필요하다. 따라서 역함수( $H^{-1}$ : Inverse function)를 다음 식과 같이 과거의 제어입력신호중 부호가 반전된 반전점  $R = (V_R, X_R)$ , 현재의 변위 ( $X_E$ ), 변위 제어신호의 증감방향  $sign(\dot{X}_E)$ 의 함수로 나타내면 주어진 변위에 대한 전압을 예측할 수 있다.

$$V = H^{-1}(X_E, R, sign(\dot{X}_E))$$

정승배 기법을 1Hz 사인파로 13.6 $\mu$ m과 6.8 $\mu$ m 변위신호를 제어시스템에 가하여 major loop과 minor loop에 대한 역이력모델(Inverse hysteresis model)을 구하였다. 첫번째로 major loop에 대해 3차 최소자승법으로 역

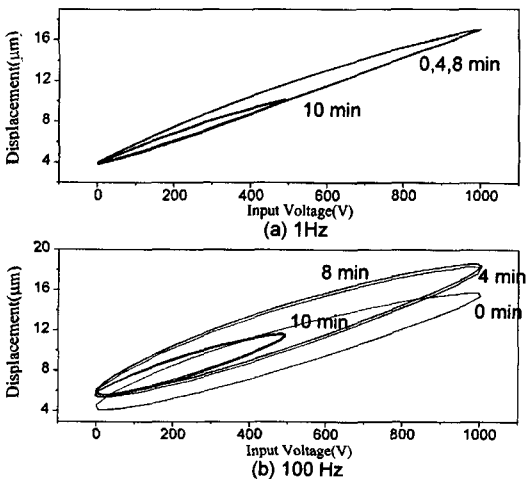


Fig. 6 Hysteresis Characteristics of FTS system

함수를 아래와 같이 구하였다.

$$V_f = -6.2810 \cdot 10^{-2} X^3 - 2.3865 X^2 + 9.4902 \cdot 10^1 X - 8.9278 \cdot 10^1 \quad (5)$$

$$V_r = 6.2996 \cdot 10^{-2} X^3 + 6.7222 \cdot 10^{-1} X^2 + 4.7817 \cdot 10^1 X - 6.4298 \cdot 10^1 \quad (6)$$

윗 식에서  $X$ 는 변위량 [ $\mu m$ ],  $V_f$ 는 상승시 전압 [V],  $V_r$ 는 하강시 전압 [V]이다. 식(5)은 상승시의 변위량을, 식(6)은 하강시의 변위량을 사용한다. 두번째로 minor loop에 대해 상승시에는 식(7), 하강시에는 식(8)을 사용한다.

$$V_{mf} = V_f + \Delta V_R \cdot h_f$$

$$h_f = -3.1902 \cdot 10^{-1} X_n^3 + 1.5552 X_n^2 - 2.2351 X_n + 1.0376$$

$$X_n = \frac{X - X_R}{X_{max} - X_R} \quad (7)$$

여기서,  $V_{mf}$ 는 상승시의 전압 [V],  $\Delta V_R$ 는 반전점의 상승곡선과의 편차량,  $X_R$ 는 반전점에서의 입력변위,  $X_{max}$ 는 히스테레시스 루프의 최대변위 그리고  $X_n$ 은 normalized displacement를 나타낸다.

$$V_{mr} = V_r - \Delta V_R \cdot h_r$$

$$h_r = -1.1611 \cdot 10^{-1} X_n^3 + 1.1393 X_n^2 - 1.1911 X_n + 1.0196$$

$$X_n = \frac{X_R - V}{X_R - X_{min}} \quad (8)$$

여기서,  $V_{mr}$ 는 하강시의 전압 [V],  $\Delta V_R$ 는 반전점의 하강곡선과의 편차량을 나타낸다.

역이력 모델의 위상 지연효과를 확인하기 위하여 Fig. 1의 제어시스템에 역이력 모델을 feedforward방식으로 적용하여  $10\mu m$  변위의 사인파를 10Hz부터 200Hz까지 10Hz씩 입력주파수를 증가시키며 제어시스템의 입력과 출력의 위상차를 실험적으로 구하고 Fig. 7에 도시하였다. 실험결과 역이력모델을 적용한 경우가 비적용한 경우보다 200Hz 입력까지 약 7 ~ 8도 정도의 일정한 크기의 위상개선 효과가 있었다. 그러나 역이력모델은 입력주파수에 무관하게 일정량의 위상지연만 보정하므로 입력주파수가 증가할수록 커지는 위상지연 현상을 모두 효과적으로 보정하지 못한다.

### 3.3 위상지연 보상기 설계

히스테레시스 특성시험에서 설명된 바 같이 입력주파수가 증가할수록 히스테레시스현상보다는 제어시스템의 전기적/기계적 동특성에 의한 비선형성이 증가한다. 이 비선

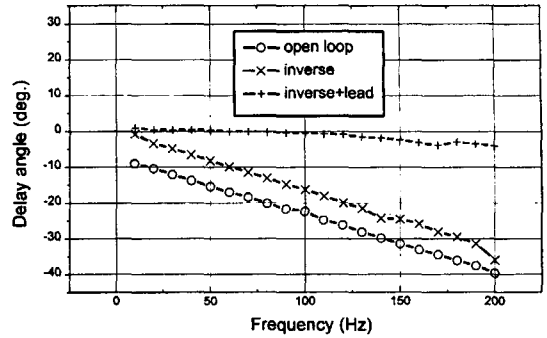


Fig. 7 Phase Comparison of Open Loop, Inverse Model and Inverse Model+Lead Compensator

형성은 역이력모델로 보정할 수 없으므로 별도의 보상기를 적용하여야 한다. 이를 위해 Fig. 7에서 역이력모델을 적용하여도 발생하는 위상지연을 제거하도록 lead보상기를 설계하여 제어시스템의 위치정밀도를 향상토록 한다.

Fig. 7에서 200Hz까지도 위상차가 거의 선형으로 증가하므로 이 위상차를 제거하기 위한 위상보상기는 수백 Hz까지는 선형의 lead성분을 지녀야 함을 알 수 있다. 제어시스템이 추종하고자 하는 최대 입력주파수가 100Hz이므로 100Hz까지 위상차가 영이 되도록 S평면의 lead보상기를 다음과 같이설계하였다.

$$L(s) = \frac{\frac{s}{2000} + 1}{\frac{s}{20000} + 1} \quad (9)$$

이 보상기를 0.1msec(10KHz)의 sampling시간으로 Tustin 변환기법을 적용하여 Z평면 전달함수를 얻어 주파수 응답특성을 Fig. 8에 도시하였다. Lead보상기를 역

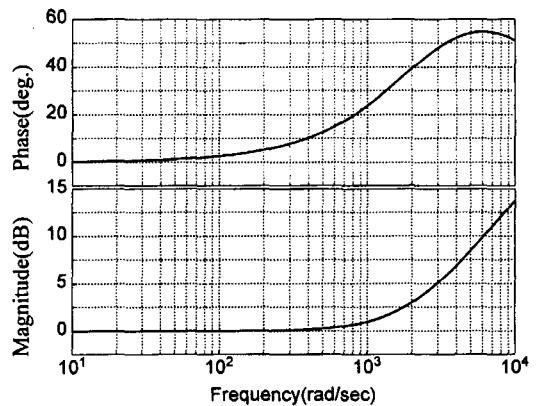


Fig. 8 Frequency Response of Lead Compensator

이력모델과 함께 제어시스템 입력단에 feedforward방식으로 적용한 경우의 위상차는 Fig. 7에 나타난 바와 같으며 입력주파수 변화에 따른 위상지연을 매우 효과적으로 보정하는 것을 알 수 있다.

#### 4. 제어기 설계 및 제어실험

##### 4.1 제어기 설계

FTS 시스템의 추종성능을 향상시키기 위하여 고려한 폐회로 제어구조는 Fig. 9와 같다.

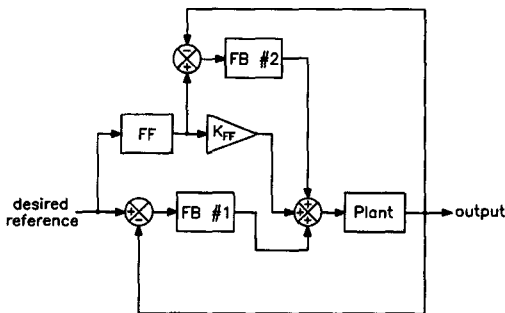


Fig. 9 Block Diagram of Closed Loop Control System

폐회로 제어시스템내의 FF, FB #1, FB #2는 Table 2와 같은 형태를 시도하였다.

Table 2 Tested Control Structures

제어 구조	FF	FB #1	FB #2
1	0	PI	0
2	1	PI	0
3	Lead 보상기+역이력 모델	PI	0
4	Lead 보상기	I	P

여기서 제어구조 #1은 식 (4)의 전달함수를 이용하여 Ziegler-Nichols법으로 구한 게인(Gain)을 실험으로 미세조정하여  $K_p = 3.36 \cdot 10^5$ ,  $K_i = 2.8 \cdot 10^9$ 를 적용하였다. 제어구조 #2에는 제어구조 #1과 동일한 PI 제어기를 적용하고 응답성을 증가시키기 위하여 feedforward 경로를 추가하였다. 미터[m]단위의 입력지령(desired reference)를 전압[V]단위로 변환하기 위하

여  $K_{FF} = 7.9 \cdot 10^5$ 를 적용하고 이것을 FB #1 제어기의 출력과 합하여 plant에 입력하였다. 제어구조 #3은 lead 보상기와 역이력모델로 구성된 비선형 보상기를 적용한 feedforward 경로와 폐회로 PI 제어기를 결합한 구조이며 게인값은 각각  $K_p = 5 \cdot 10^5$ ,  $K_i = 3 \cdot 10^9$ ,  $K_{FF} = 1$ 이다. 마지막으로 제어구조 #4는 적분 제어기를 적용한 FB #1, 입력지령을 lead처리한 신호와 plant 출력간의 차에 대하여 비례 제어기를 적용한 FB #2, 그리고 입력지령을 lead처리한 후 게인  $K_{FF}$ 로 증폭시킨 feedforward를 모두 합산하여 plant에 적용하는 제어기로 구성되며, FB #2의 역할은 plant의 히스테레시스 현상을 보정함으로써 폐회로 제어기의 성능을 보강하는 것이다. 적용된 게인값은 제어구조 #3과 동일하며  $K_{FF}$ 만  $7.9 \cdot 10^5$ 이다. #1에서 #4까지 단계적으로 제어구조를 변경함에 따라, 추종성능은 현저히 향상되었다.

##### 4.2 제어 실험

제어 실험은 입력지령을 100Hz, 10 $\mu$ m의 사인 파형으로 설정하여 수행하였다. Fig. 1에 도시한 바와 같이 capacitive sensor의 변위신호가 센서기판(model E-150.00, PI)을 통하여 출력되어 A/D converter로 입력되고, 이 신호와 입력지령을 근거로 PC에서 제어량을 계산하여 D/A converter와 고전압 증폭기(model P-270.01, PI)를 통해 증폭된 제어 전압이 PZT로 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. 먼저 개회로 제어실험을 수행하고 이를 Fig. 10에 나타냈다.

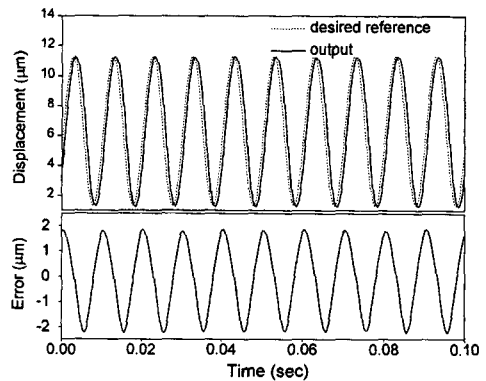


Fig. 10 Open-Loop Control Result

개회로 제어시에는 약  $1.8\mu\text{m}$ 의 peak-to-peak(p-p) 오차가 발생하므로 단순한 개회로 제어로는 원하는 성능을 얻을 수 없음을 알 수 있다.

Fig. 11에 나타난 제어구조 #1과 #2의 실험결과를 보면 단순한 PI제어기를 적용한 경우 p-p 오차가 약  $1.5\mu\text{m}$  발생하나 간단한 feedforward경로를 추가함으로써 p-p 오차를 약  $1\mu\text{m}$  수준으로 감소시킬 수 있었다.

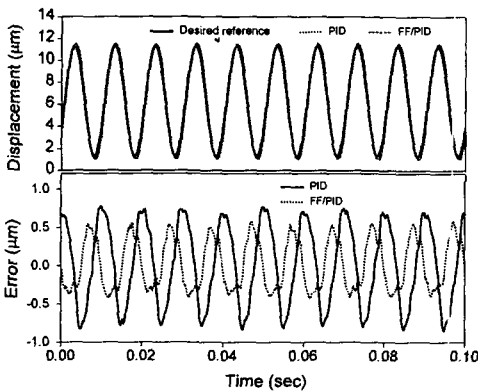


Fig. 11 Comparison of Control Structure #1 and #2

추종오차를 서브마이크론 이하로 줄이기 위하여 제어구조 #3을 적용한 결과 Fig. 12에 나타난 바와 같이 p-p 오차가  $0.5\mu\text{m}$  수준으로 감소하였다. 그러나 입력지령의 최대최소치에서 역이력모델의 예측오차가 크게 발생하여 오차의 스파이크 현상이 일어나며 이로인해 오차감소에 한계가 있다. 추종오차를 더욱 개선하기 위하여 비선형 역이력모델을 feedforward경로에서 제거하고 제어구조

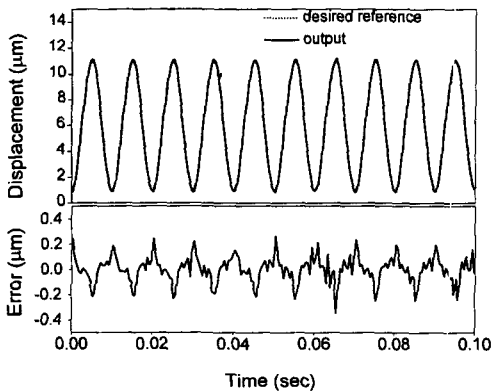


Fig. 12 Experimental Result of Control Structure #3

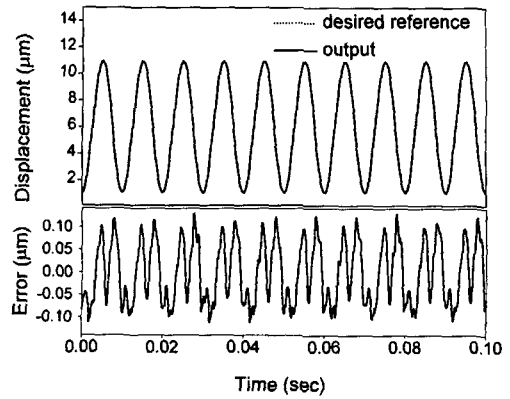


Fig. 13 Experimental Result of Control Structure #4

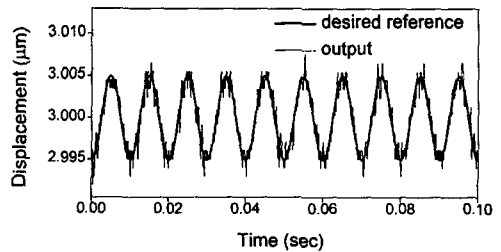


Fig. 14 Resolution Test

#4를 시도한 결과 Fig. 13에 나타난 것과 같이 오차의 스파이크 현상을 제거하면서 p-p오차를  $0.28\mu\text{m}$  수준으로 향상시킬 수 있었다.

마지막으로 제어시스템의 해상도를  $100\text{Hz}$ 의 주파수와  $10\text{nm}$ 의 변위를 가진 파형에 대한 추종 제어 실험을 통하여 구하였다. Fig. 14의 해상도 시험 결과, 제어 시스템이  $10\text{nm}$  이하의 충분한 해상도를 가짐을 알 수 있었다.

## 5. 결론

압전구동기의 비선형 특성을 보정하는 간단한 선형의 보정구조를 설계하고 폐회로 제어구조와 같이 적용한 결과 제어시스템 전체의 선형성이 개선되어  $100\text{Hz}$ ,  $10\mu\text{m}$ 의 변위를 갖는 입력지령에 대한 p-p오차가  $0.28\mu\text{m}$  수준으로 감소하였다. 이 결과는 PID제어기만을 적용한 경우보다 오차가 5배이상 감소한 수준이며 향후 외란에 강인한 폐회로 제어기의 설계와 실제 가공시험을 수행하여 가공면의 상태를 측정할 계획이다.

참 고 문 헌

1. S. R. Patterson, E. B. Magrab, "Design and Testing of a Fast Tool Servo for Diamond Turning," Precision Engineering, Vol. 7, No. 3, pp. 123-128, July, 1985.
2. Y. Okazaki, "A Micro-Positioning Tool Post Using a Piezoelectric Actuator for Diamond Turning Machines," Precision Engineering, Vol. 12, No. 3, pp. 151-156, July, 1990.
3. H. Kaizuka, B. Siu, "A Simple Way to Reduce Hysteresis and Creep When Using Piezoelectric Actuators," Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 27, No. 5, pp. 773-776, May, 1988.
4. S. Jung, S. Kim, "Improvement of Scanning Accuracy of PZT Piezoelectric Actuators by Feed-forward Model Reference Control," Vol. 16, No. 1, pp. 49-55, Jan. 1994.
5. P. Ge, M. Jouaneh, "Modeling Hysteresis in Piezoceramic Actuators," Precision Engineering, Vol. 17, No. 3, pp. 211-221, July, 1995.
6. 정승배, 박준호, 김승우, "주사터널링현미경을 위한 압전구동기의 비선형 모델링," 대한기계학회논문집, 제 18권, 제 9호, pp. 2272-2283, 1994.
7. P. Ge, M. Jouaneh, "Tracking Control of a Piezoceramic Actuator," IEEE Trans. Control Systems Technology, Vol. 4, No. 3, pp. 209-216, May, 1996.