

Piezo Actuator를 이용한 초정밀 위치결정기구의 Computer Simulation 및 제어 성능평가

김재열(조선대 기계공학부), 김영식(조선대 기계공학부),
곽이규*(조선대 대학원), 한재호(조선대 대학원)

Computer Simulation and Control performance evaluation of Ultra Precision Positioning Apparatus using Piezo Actuator

J. Y. Kim(Mech. Eng. Dept., CSU), Y. S. Kim(Mech. Eng. Dept., CSU),
L. K Kwac*(Graduate School, CSU), J. H Han(Graduate School, CSU)

ABSTRACT

Recently, High accuracy and precision are required in various industrial field especially, semiconductor manufacturing apparatus, Ultra precision positioning apparatus, Information field and so on. Positioning technology is a very important one among them.

For composition of this technology, the development of system with high speed and high resolution is needed. At start point and end position vibration must be repressed on this system for composition of position control. This vibration is arisen nose, is increased setting time, is reduced accuracy. Especially, repressed for the lead with high speed. The small actuator with high speed and high resolution is need to repression against this residual vibration. This actuator is, for example, piezo actuator. piezoelectric material that converting from electronic signal to mechanical force is adequate material, because of control of control to position and force.

In this study, piezo electric material is used to actuator, ultra precision positioning apparatus with stage of hinge structure is designed, simulation is performed, control performance is tested by producing apparatus. For easy usage and stability in industrial field, we perform to simulation and to position control test by digital PID controller.

Key Words : Piezo actuator(압전소자), PID controller, Ultra precision positioning apparatus, Simulation, Matlab Simulink

1. 서론

최근 첨단기계와 특히 반도체 제조장치, 초정밀 공작기계, 정보기기 등의 분야에서 끊임없이 고정도화, 고정밀화의 요구가 계속되어지고 있다. 이처럼 위치결정기술은 산업전반에서 포괄적으로 응용되는 기술로 이러한 기술들이 가속되어 현재는 서브마이크론의 위치정밀도를 요구하고 있으며 2000년대 초의 가공정밀도는 정밀가공분야에서 10nm, 초정밀가공분야에서는 1nm의 수준까지 도달 할 것으로 예상되어지고 있다. 또한 고속화와 저진동화 등의 요구도 강화되어 지고 있다. 예를 들면 메모

리형 반도체의 경우 기억 용량은 3년에 4배의 속도로 대 용량화 되고 그 때문에 Chip내의 최소선폭은 3년에 약 0.7배로 되어지고 있다. 그러므로 21세기의 초기에는 최소 선폭 100nm의 4GIGA DRAM이 개발 되어진다고 보며 이러한 문제의 야기로 첨단기계 제조장치에는 위치결정 정도 20~30nm가 요구되어지고 있는 실정이며 자기 디스크 분야에서도 기억 용량의 증대로 초정밀구동장치의 필요성이 커지고 있다.^{(1)~(3)}

따라서, 이러한 요구를 충족시키기 위해서는 액츄에이터의 소형화, 고정밀도화가 필요하다. 그러나 기존의 공, 유압 액츄에이터, 또는 전기적 액츄에

이더로는 서브 마이크로 이하의 정밀도를 얻기 힘들고 소형화 하기 힘들다. 따라서 최근에 형상기억 합금, 정전 액츄에이터 보이스코일 모터 등 새로운 원리를 이용한 액츄에이터에 대한 연구가 활발히 진행 되고 있다.⁽⁵⁾ 압전소자에 대한 연구도 이러한 흐름으로 볼수가 있다.

보통 고속 이송이 가능한 이송기구를 구현하기 위해서는 구조적 변경뿐 아니라 이송부의 경량화, 구동력의 증가가 효과 적이지만, 이는 제어 시작 시와 종료시의 진동을 야기 할 수 있다. 그러한 진동은 소음을 발생시키고, 정착시간을 증가시키며 정확도를 떨어뜨린다. 특히, 잔류진동은 고속 이송을 실현시키기 위해 억제되어야만 한다. 이러한 잔류진동을 억제할 수 있는 고속, 고성능의 소형 구동기가 필요하다.

그러한 구동기로서 압전체의(Piezoelectric Material)는 좋은 특성을 가진다. 압전체는 전기적 신호를 직접 기계적인 힘 또는 운동으로 바꾸어 주므로 위치제어나 힘 제어를 위하여 적합한 물질이다.

본 논문에서는 압전소자를 액츄에이터로 사용하고 힌지구조로 초정밀 스테이지를 장착한 초정밀 위치결정기구를 설계하고 이를 시뮬레이션을 하였고 기구를 제작하여 제어성능을 시험하였다. 제어기는 실제 산업현장에서의 적용의 용이성과 안정성을 위하여 디지털 PID제어기를 사용하여 Simulation과 위치 결정 실험을 하였다.

2. 초정밀위치결정기구의 동역학적 모델링과 정적특성 검토

2.1 동역학적 모델링

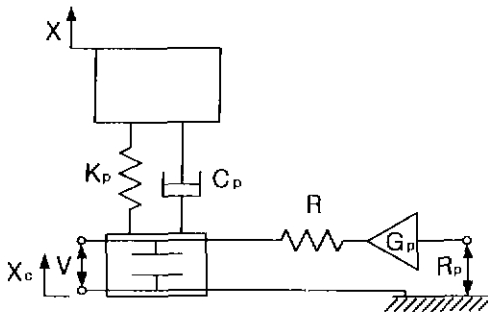


Fig. 1 Model of Ultra Precision Positioning Apparatus

본 기구에 대한 운동방정식은 다음과 같다. 테이블의 변위와 압전 소자와의 변위 관계는

$$m\ddot{x} + c_p(\dot{x} - \dot{x}_p) + K_p(x - x_p) = 0 \quad (1)$$

로 되고 압전소자 양단의 전압과 압전소자의 변위 관계는 식(2)와 같다.

$$x_p = K_p v \quad (2)$$

그리고, 앰프의 입력전압과 압전소자 양단의 전압관계를 보면 식(3)과 같이 됨을 알 수 있다.

$$G_p V_p = RC\dot{v} + v \quad (3)$$

식(10)(11)(12)로부터 x, \dot{x}, v 상태변수로 하는 상태방정식은 식(4)와 같이 되고

$$\begin{bmatrix} \dot{\bar{x}} \\ \dot{x} \\ \dot{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{K_p}{m} & -\frac{c_p}{m} & \frac{K_p}{m} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{G_p K_p}{RC} \end{bmatrix} v_p \quad (4)$$

출력방정식은 식(14)와 같이 된다.

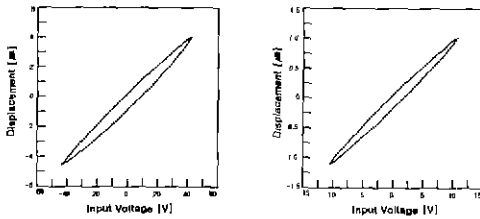
$$y = [1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ v \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.1 정적특성

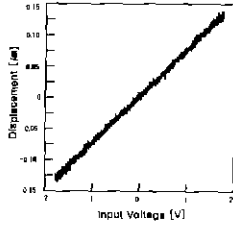
Table 1에 본 기구의 정적특성을 나타낸다. Fig.2는 각각 압력소자에의 입력전압을 1.8V, 11V, 42V로 했을때의 출력변위이다. 이것은 본 기구가 약 0.1 μ m, 1 μ m, 4 μ m 변위 하는 경우의 압전소자에의 입력전압과 변위 사이의 게인 K_p 를 구하기 위해서 한 것이다. 입력전압 11V, 42V의 경우에는 히스테리시스가 보인다. 그래서 여기에 최소 이송법의 직선근사값을 구하는 것에 의해 게인 값을 구한다. 그 결과 입력전압 1.8V, 8V, 11V, 42V의 경우 각각 게인 K_p 는 0.078 μ m/v, 0.096 μ m/v, 0.116 μ m/v이 되었다. 이때 압전소자 구동용 앰프 출력전류의 한 개에 의한 비선형성의 나타나지 않는 0.1 μ m의 진폭으로 선정했다. 본 기구의 정적 게인 K_p 도 0.1 μ m 진폭의 경우의 값, 0.078 μ m를 이용하고 있다.

Table 1 Static characteristic of PZT

m	0.217 Kg
c_p	980 Ns/m
K_p	1.37×10^7 N/m
C	6.5×10^{-6} F
R	10 Ω
G_p	10
K_p	0.78×10^7 N/v



(a) Input 42V (b) Input 11V



(c) Input 1.8V

Fig.2 The hysteresis of the PZT

3. 제어기 설계

본 논문에서는 직선운동시스템을 안정화하기 위한 제어기로서 우수한 성능을 가지는 디지털 PID제어기를 사용하였다. 일반적으로 비례이득의 증가는 시스템의 공진 주파수를 높이는 반면 감쇠를 감소시키며, 미분이득의 증가는 공진 진폭을 감소시키며 감쇠력을 증가시켜 제어루프의 안정성을 향상시킨다. 그리고 적분이득의 증가는 출력이 입력 지령치와 일치하도록 하여 정밀도를 향상시킨다. 일반적인 상용의 제어기들은 이들을 모두 조합한 PID제어기에 위상 보상을 첨가한 것이 많으며 이는 최근 많이 연구되고 있는 LQG제어, H_{∞} 제어, 슬라이딩 모드제어 등의 견실 제어기에 비해 큰 외란에 대한 견실성은 떨어지나 응답성 및 안정성 등에 있어서 상당히 우수한 것으로 평가되고 있다. 또한 본 논문의 적용의 대상이 되는 작업이 대부분 초정밀 작업을 위하여 초청정 환경에서 이루어지며 주로 비접촉 작업에 이용되므로 외란에 대한 영향은 그리 크지 않다고 할 수 있다.⁽⁴⁾ 특히 실제 산업현장에서 적용의 용이성과 안정성을 위하여 디지털 PID제어기를 사용하여 Simulation을 하였다.

$$\frac{Y_{\beta}(s)}{U(s)} = \beta, \quad \frac{Y_{\alpha}(s)}{U(s)} = \frac{\alpha s}{\alpha Ts + 1}, \quad \frac{Y_{\gamma}(s)}{U(s)} = \frac{\gamma}{s} \quad (6)$$

$$s = \frac{2}{T} \times \frac{z-1}{z+1} \quad (7)$$

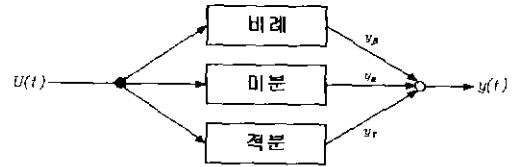


Fig. 4 PID Controller of Ultra Precision Positioning Apparatus

Table 2 The Parameter of PID Controller

β	0.01
γ	800
α	5×10^{-4}
T_{α}	2.5×10^{-11}
	7.9×10^6 v/m
	0.707

$$y_{\beta} [i] = \beta u [i] \quad (8)$$

$$y_{\alpha} [i] = \frac{2\alpha-1}{T(2\alpha+1)} y_{\alpha} [i-1] + \frac{2}{T(2\alpha+1)} (\alpha [i] - U [i-1]) \quad (9)$$

$$y_{\gamma} [i] = y_{\gamma} [i-1] + \frac{\gamma T}{2} (\alpha [i] - \alpha [i-1]) \quad (10)$$

$$\frac{U_{AMP}}{E} = \beta + \frac{\gamma}{s} + \frac{\alpha s}{\alpha Ts + 1} \quad (11)$$

식(6)은 각 제어인자의 전달함수이다. 이렇게 각 제어기의 출력은 식(8), (9), (10)과 같다. 식(11)은 본 시스템의 PID제어기의 전달함수이다.

4. 초정밀위결정기구의 시스템 구성과 컴퓨터 시뮬레이션

4.1 시스템 구성

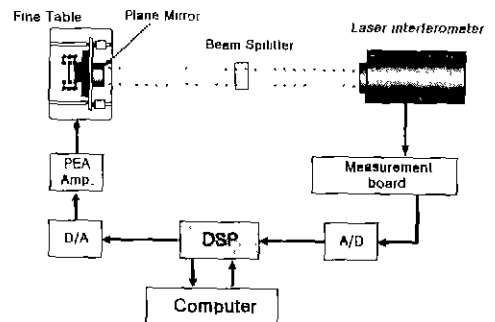


Fig. 5 Schematic Diagram of Ultra Precision Positioning System

이송 시스템은 압전소자를 액츄에이터로, 탄성힌지 구조를 가진 초정밀 테이블로 구성되어 있고 변위 측정은 레이저 인터페로미터를 이용하였다. 신호처리는 DSP 보드를 사용하였으며 전체시스템은 PID제어를 적용한 폐루프 시스템으로 구성하였다.

4.2 Computer Simulation

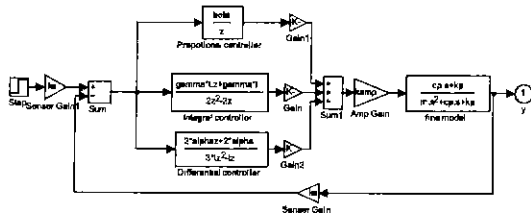


Fig. 6 Simulink of Ultra Precision Positioning System

시스템의 시뮬레이션을 하기 위해 Matlab의 시뮬링크를 구성하였으며 Fig.6은 본 시스템의 시뮬링크를 도시한 것이다.

일반적으로 스프링, 댐퍼, 질량 시스템의 극점과 영점의 개수가 2개 차이가 남으로 압전소자의 주파수 특성곡선을 극점의 개수를 3개, 영점의 개수를 1개로 근사화하여 Fig.7에 주파수 특성곡선을 나타내었다.

그리고 근사화에 의하여 구하여진 극점과 영점 및 DC 게인은 Table 3과 같다.

Fig.8은 본 시스템의 근체적 선도를 나타낸 것이다. 여기서 안정적인 게인값은 3 이다. 그리고 Fig.9와 Table 4에는 시간영역의 스텝응답과 그 분석을 나타내었다.

이렇게 시뮬레이션을 행한 결과, 설계한 PID제어기는 만족할만한 성능을 보여 주었고 안정된 시스템 응답을 확인하고 실제 시스템의 위치결정 실험을 하였다.

Table 3 The Poles, zero, and DC gain to perform computer simulation

Poles	-149.11+2245j -149.11-2245j
Zero	-777.06
DC gain	3472
	254476

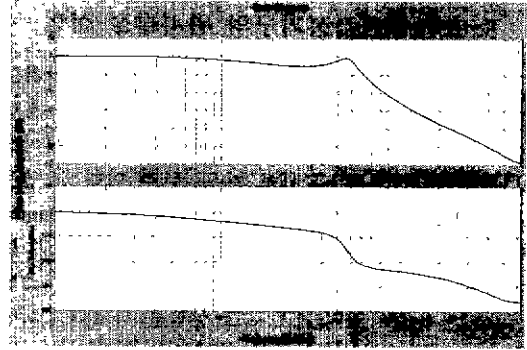


Fig. 7 The frequency curve fitting to perform computer simulation

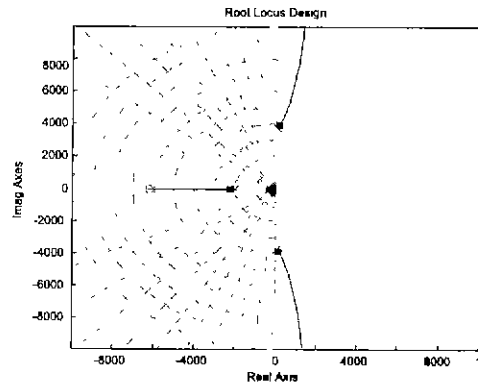


Fig. 8 The Root locus curve to perform computer simulation

Table 4 The step Response to perform computer simulation

Title	Parameter	Unit
Steady state error	0	
Maximum overshoot	0.1(10%)	[%]
Rise Time	0.005	[s]
Setting Time	0.0075	[s]

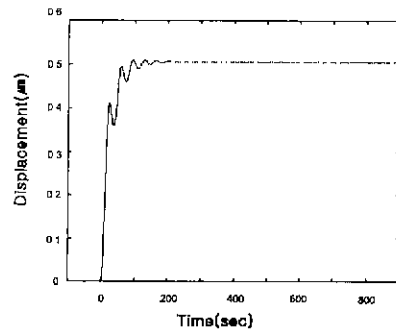


Fig. 9 The step Response to perform computer simulation

5. 초정밀위결정기구의 위치결정 실험

시뮬레이션 결과 본 시스템의 안정성을 확인하고 위치결정 실험을 행하였다. 실험은 먼저 $0.5\mu\text{m}$ 스텝을 주어 Fig.9의 스텝응답을 확인하였다. 시뮬레이션의 스텝응답과 아주 유사한 것을 볼 수 있다. 스텝응답으로만 본다면 본 시스템의 분해능은 $\pm 10\text{nm}$ 의 반복 정밀도를 보여 주었다. 하지만 이것만으로 분해능을 확인하기에는 부족하다. 그래서 50nm 의 스텝을 1초간 유지시키며 스트로크 실험을 하였다. 그 결과 Fig.10과 같이 $\pm 10\text{nm}$ 의 분해능을 확인할 수 있었다.

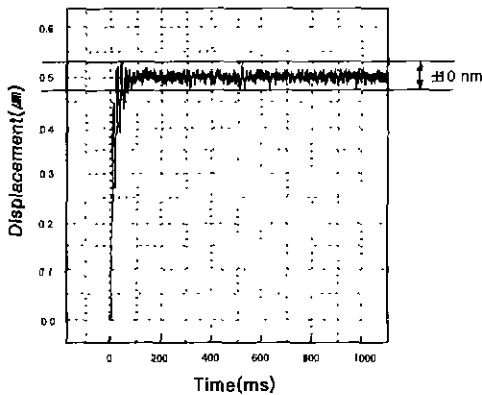


Fig. 9 The step Response of Ultra Precision Positioning System

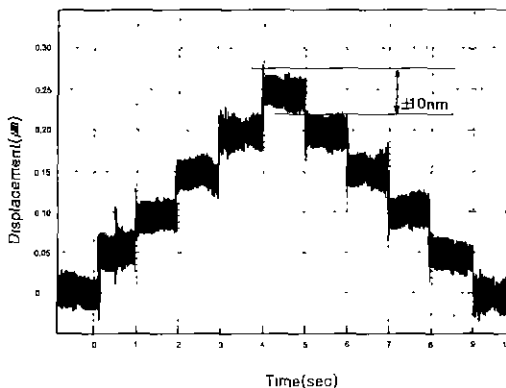


Fig. 11 The resolution experiment of Ultra Precision Positioning System

6. 결론

압전소자를 이용한 초정밀위치결정기구를 제작하기 위해 시스템의 모델링과 시뮬레이션을 행하였으며 좋은 제어성능을 얻기 위해 PID제어기를 설계하였다. 그리고 시뮬레이션을 통해 얻은 파라미터를 기본으로 실제 시스템을 구동하였으며 만족할만한 제어성능을 보여주었다.

본 논문에서는 다음과 같은 결과를 시뮬레이션과 실험을 통해 확인할 수 있었다.

- 1) 설계한 PID 제어기는 만족할만한 성능을 보여주었다.
- 2) 시스템의 동역학적 모델링과 설계한 PID제어기를 적용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 행하여 본 시스템의 안정성을 확인하였다.
- 3) 시뮬레이션을 기본으로 실제 시스템을 구동하여 분해능 실험을 한 결과 본 시스템의 분해능은 $\pm 10\text{nm}$ 의 반복 정밀도를 확인할 수 있었다.

후기

본 발표논문은 산업자원부지정(사) 부품산업 테크노센터에서 제공된 장비의 지원과 2000년 과학기술부지원 국제공동연구의 일환으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. Simokohbe 외2인, "Control performance of Lead screw Positioning with Intelligent Control Methods", 日本 精密工學誌 vol. 64. No. 11, p.1627~1632, 1998.
2. Benjamin C. Kuo, "Automatic Control Systems" Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J 07632, p689~699, 1994
3. Kaiji SATO 외 5인, "Performance Evaluation Lead screw Positioning System with Five Kinds of Control Method(2nd Report)", 日本 精密工學誌 vol. 63. No. 12, p.1759~1763, 1997
4. 김재열, 김영석, 박이구, 마상동, 한재호, "초정밀서보기구의 제어성능 평가(II)", 정밀공학회 춘계발표논문집, 2000
5. 권기영, "이중 구동기를 이용한 회전 이송기구의 고속 위치 및 진동 제어", 연세대학교 대학원 석사 학위논문, p1~2, 1998