

Laser Interferometer를 이용한 초정밀위치결정 피드백시스템의 컴퓨터 시뮬레이션 및 제어성능 평가

김재열*, 이규태*, 곽이규**, 한재호**, 김창현**

Computer Simulation and Control Performance Evaluation for Feedback System of Ultra Positioning by using Laser Interferometer

Jae-Yeol Kim*, Kyu-Tae Lee*, Lee-Ku Kwac**, Jae-Ho Han**, Chang-Hyun Kim**

Abstract

This system is composed of fine and coarse apparatus, measurement system and control system. Piezoelectric actuator is designed for fine positioning. We make a study of precision apparatus that is used in the various industrial machine. The study was carried out to develop a precision positioning apparatus, consisting of servo motor and piezoelectric actuator. Coarse positioning using lead screw is driven by servo motor. Control system output a signal from laser interferometer to amplifier of servo motor and piezoelectric actuator after digital signal processing(DSP). Resolution of this apparatus measure with laser interferometer.

In this study, design method and control system with ultra precision position apparatus are researched. As the first step, we have estimated for control performance and system stability before an actual apparatus is manufactured by MATLAB with SIMULINK including various functions those are composed of pre-design and system modeling.

Key Words : Laser Interferometer(레이저 간섭계), Piezoelectric Actuator(압전소자), Fine Positioning(미동 위치결정), Coarse Positioning(조동 위치결정), Resolution(분해능), DSP(digital signal processing), Simulation(시뮬레이션), Matlab Simulink, PID Controller

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 가속

* 조선대학교 기계공학부
(김재열 jykim@chosun.ac.kr)

** 조선대학교 대학원 정밀기계공학과

되어 현재는 서브마이크론의 위치정밀도를 요구하고 있으며 2000년대 초의 가공정밀도는 정밀가공분야에서 10nm, 초정밀가공분야에서는 1nm의 수준까지 도달 할 것으로 예상된다. 또한 고속화와 저 진동화 등의 요구도 강화되고 있다⁽¹⁾⁽²⁾.

이러한 위치결정을 실현하기 위해 최근 들어 학계에 많은 노력과 관심이 증대되고 있고 이러한 기술의 필요성 또한 함께 확산되고 있다^{(3)~(6)}.

따라서 본 연구에서는 이러한 초정밀서보기구의 설계 구성방법과 레이저 피드백 제어계에 대해서 연구하는 것으로 써 기본단계인 Matlab을 이용한 제어기의 성능 평가와 시뮬레이션을 하였다. 또한 실제 기구를 제작하기 전에 시행착오를 줄이기 위한 성능평가를 실시하였고 초정밀위치결정기구를 제작하여 여러 가지 제어 알고리즘을 비교 분석하였다. 최종적으로는 최적 알고리즘을 선정하여 조동 및 미동기구의 레이저를 이용한 초정밀위치결정기구에 대한 유효성을 확인하고 제어 성능을 평가하고자 한다.

2. 동역학적 모델링

2.1 조동기구 모델

조동 기구는 제어대상을 고속으로 목표치 부근에 위치결정을 실시하는 것을 목적으로 한다.

여기서는 커플링과 볼 나사 및 너트사이의 스프링효과를 무시하고, 모터축 커플링과 이송나사축을 하나의 강체로 보고 모델을 간략화 했으며 마찰토크도 무시하였다. 먼저 이송 나사 축의 운동방정식을 세우면 다음과 같이 유도되고

$$J \ddot{\theta} + C_s \dot{\theta} = -\frac{d}{2} N \sin \phi + T \quad (1)$$

조동 테이블의 운동방정식은 다음과 같다

$$M \ddot{x}_C = N \cos \phi \quad (2)$$

더블너트의 회전과 테이블의 변위는 다음과 같은 관계가 성립되며

$$x_C = \frac{l}{2\pi} \theta \equiv K\theta \quad (3)$$

모터에 흐르는 전류와 발생 토크는 다음과 같다

$$T = K_2 i_m \text{ 또는 } \tan \theta = \frac{l}{\pi d} \quad (4)$$

모터의 회로 방정식은 다음과 같이 유도된다.

$$G_m v_m = R_m i_m + L_m \dot{i}_m + K_1 \dot{\theta} \quad (5)$$

식(1)~(5)에 의해서 x_C, \dot{x}_C, i_m 을 상태변수로 하고, 입력력은 모터 앰프의 입력전압으로 하는 상태방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_C \\ \ddot{x}_C \\ \dot{i}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{-c_s}{J + K^2 M} & \frac{KK_2}{J + K^2 M} \\ 0 & \frac{-K_1}{L_m K} & \frac{-R_m}{L_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_C \\ \dot{x}_C \\ i_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{G_m}{L_m} \end{bmatrix} v_m \quad (6)$$

출력방정식은 다음과 같이 유도된다.

$$y = [1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} x_C \\ \dot{x}_C \\ i_m \end{bmatrix} \quad (7)$$

Table 1은 조동기구의 파라미터 이다.

Table 1 The parameter of coarse apparatus

M	8.975 kg
J	6.882×10^{-5} kg · m ²
G _m	3
C _s	1.876×10^3 N · s/m

2.2 미동기구 모델

미동기구는 제어대상을 미세하게 위치결정을 실시하는 것을 목적으로 한다.

미동기구에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

미동테이블의 변위와 압전 소자와의 변위 관계는 다음과 같고

$$m\ddot{x} + c_p(\dot{x} - \dot{x}_p) + K_p(x - x_p) = 0 \quad (8)$$

압전소자 양단의 전압과 압전소자의 변위관계는 다음과

같은 관계를 가진다.

$$x_p = K_p v \quad (9)$$

그리고, 앰프의 입력전압과 압전소자 양단의 전압관계는 다음과 같다.

$$G_p V_p = RC\dot{v} + v \quad (10)$$

식(8)~(10)으로부터 x, \dot{x}, v 상태변수로 하는 상태방정식은 다음과 같이 유도 된다.

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{\dot{x}} \\ \dot{v} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{k_p}{m} & -\frac{c_p}{m} & \frac{k_p K_p}{m} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ \dot{x} \\ v \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{c_p G_p K_p}{RCm} \\ \frac{G_p}{RC} \end{pmatrix} v_p \quad (11)$$

출력방정식은 다음과 같다

$$y = [1 \ 0 \ 0] \begin{pmatrix} x \\ \dot{x} \\ v \end{pmatrix} \quad (12)$$

Table 2는 미동기구의 정특성을 나타낸다.

Table 2 Static characteristic of fine apparatus

m	0.217 Kg
cp	980 Ns/m
kp	1.37×10^7 N/m
C	6.5×10^9 F
R	10Ω
Gp	10
Kp	0.78×10^7 m/v

3. 제어계 설계

3.1 이중서보구성

이중서보 구성은 조동 위에 미동기구의 베이스(Base)를 체결하여 구성하였다. 이중서보의 구동은 조동기구가 목표 지점까지 이송운동을 하면서 위치에러를 초정밀 미동기구 PZT 액츄에이터(actuator)로서 초정밀 스테이지를 이송하여 보상해 주거나 조동 스테이지를 목표지점에 보낸 후, 이때의 위치에러를 미동 스테이지의 PZT 액츄에이터(Actuator)가 보상해주는 구조로 이루어지게 된다.

초정밀 운동스테이지 상에서는 변위 측정을 위한 레이저 옵틱스(optics)가 설치되어 슬라이드와 초정밀 미세운동의 이송이 함께 측정된다. 본 시스템은 서브 마이크론의 분해능을 구현하고자 하며 동적인 페루프 제어를 요하므로 PC Based 레이저 간섭계(Laser Interferometer)를 이용한다. 종래의 연동 제어방식을 보면, 조동 위치결정과 미동 위치결정을 순차적으로 반복하여 제어하는 방식과 조동과 미동기구를 동시에 제어하는 연동제어방식으로 나눌 수 가있다. 본 연구에서는 후자의 제어방식을 기본으로 설계를 하였다. 제어기는 PID제어기를 설계하여 실험을 하였다. Fig. 1은 시스템의 블록선도이다.

초정밀위치결정기구는 조동과 미동을 동시에 제어되도록 하고 미동기구의 스트로크가 $\pm 10 \mu\text{m}$ 로 매우 작으므로 연동 동작 중에 미동기구의 변위가 스트로크를 넘지 않도록 설계하고 본 기구는 2개의 구동앰프에 제어 동작을 입력하여 목표치인 1개의 출력시스템으로 생각하고 제어계를 구성하였다.

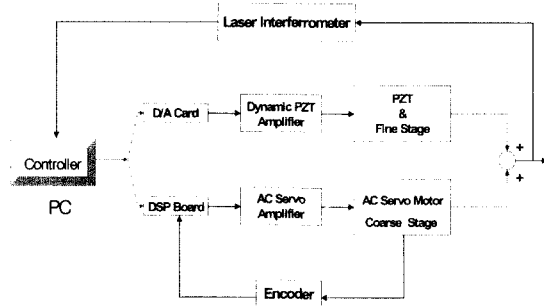


Fig. 1 Block diagram of dual servo loop

제어계의 상태 방정식과 출력식을 보면 다음과 같다.

$$\dot{x}_s = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{55} & a_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix} x_s + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ b_{21} & 0 \\ b_{31} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & b_{62} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_p \\ v_m \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$x_s = [x \quad \dot{x} \quad v \quad x_c \quad \dot{x}_c \quad i_m]^T \quad (14)$$

$$\dot{y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} x_s \quad (15)$$

$$y = [1 \ 0] \dot{y} \quad (16)$$

$$a_{21} = -\frac{k_p}{m}, \quad a_{22} = -\frac{c_p}{m}, \quad a_{23} = \frac{k_p K_P}{m} - \frac{c_p K_P}{RCm}$$

$$a_{24} = \frac{K_P}{m}, \quad a_{25} = \frac{c_p}{m}, \quad a_{33} = -\frac{1}{RC}$$

$$a_{55} = \frac{-c_s}{J+k^2M}, \quad a_{56} = \frac{KK^2}{J+K^2M}, \quad a_{65} = -\frac{K_1}{L_m K}$$

$$a_{66} = -\frac{R_m}{L_m}$$

$$b_{21} = \frac{c_p G_p K_P}{RCm}, \quad b_{31} = \frac{G_p}{RC}, \quad b_{62} = \frac{G_m}{L_m}$$

이렇게 함으로써 2개의 기구를 한 개의 상태방정식으로 표현할 수 있으며 조동 제어계와 미동제어계를 일체로 설계하는 것이 가능하다. 이것을 토대로 최적 서보계를 설계하였다. 시스템을 선형으로 취급하기 위해 모터구동전류가 포화하지 않는다는 가정으로 제어계를 설계하였다.

4. 초정밀위치결정 실험 및 고찰

4.1 시뮬레이션

4.1.1 조동기구 시뮬레이션

Fig. 2는 조동기구의 SIMULINK를 도시하고 있다. 보통 주파수 영역에서 시스템을 분석한 후 주파수 응답 해석법을 사용하여 제어시스템을 설계하면 설계과정이나 변수에 약간의 오차가 있더라도 제어시스템의 성능이 웬만큼

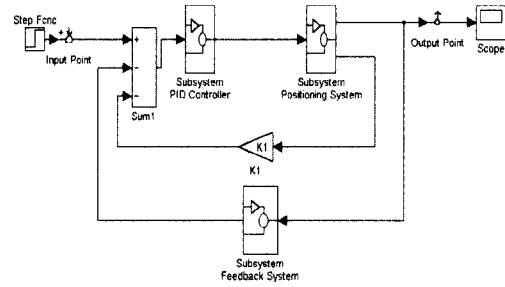


Fig. 2 The simulink of coarse apparatus

보장되기 때문에 시간영역에서 설계하는 것에 비해 상당히 견실한 제어시스템을 구성할 수 있다. 그리고 제어기 설계는 궁극적으로 폐루프(Closed loop)전달함수가 원하는 주파수 응답특성을 가지도록 만드는 것이지만 폐루프 이득을 직접 다루기가 쉽지 않기 때문에 대신 개루프 이득(open loop)을 이용하였다.

본 시스템의 개루프 주파수 분석은 Fig. 3에서와 같이 $G_m=96.589dB$, $P_m=89.998 \text{ deg}$ 이다. 이득여유가 6dB이상인 반면 위상여유가 60deg이상이다. 따라서 위상여유를 보다 작게 하는 제어기의 설계가 필요하다. 여기서 바람직한 안정도 여유는 이득여유가 6[dB]이상이고 위상여유가 30~60[degree]이다.

위에서 설계한 PID제어기를 적용하여 Fig. 4와 Fig. 5와 같이 주파수영역의 Bode선도와 시간영역의 스텝 응답을 분석한 결과 좋은 응답을 보여주었다.

제어기를 포함한 폐루프(close loop) 주파수 분석은 Fig.4와 같이, $G_m=7.079dB$, $P_m=42.054 \text{ deg}$ 이 나왔으며, 이득여유가 6dB이상이고 위상여유가 30~60deg이다. 이에 대한 제어기의 파라미터는 Table 4와 같다.

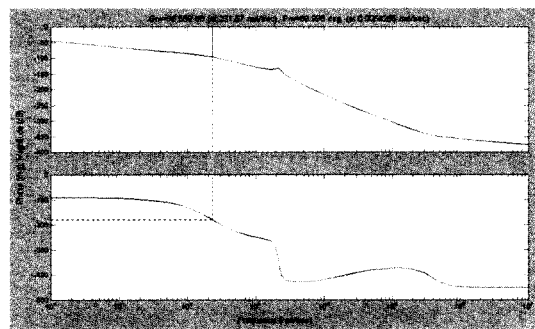


Fig. 3 The bode diagrams of coarse apparatus by open loop to perform simulation

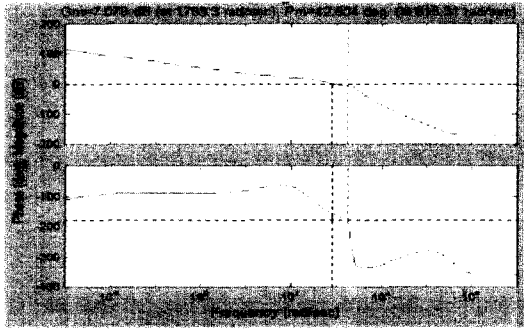


Fig. 4 The bode diagrams of coarse apparatus by closed loop to perform simulation

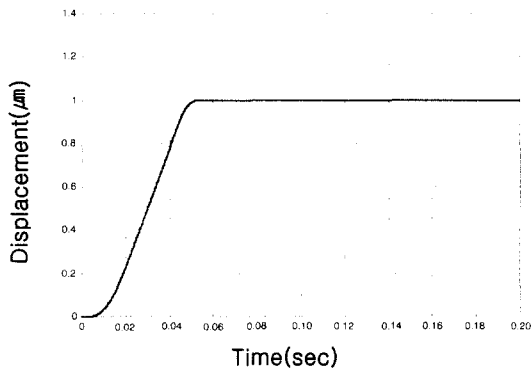


Fig. 5 The Step response of Coarse Apparatus to Perform Simulation

Table 3 Step response of coarse apparatus to perform simulation

Title	Parameter	Unit
Steady state error	0	
Maximum overshoot	0.1(10%)	[%]
Rise Time	0.047	[s]
Setting Time	0.062	[s]

Table 4 Parameter of PID controller for coarse apparatus to perform simulation

P	β 97500
I	γ 40 s ⁻¹
D	α 2000
	T α 0.0002s × 2000s

그리고 시간영역 스텝응답에서도 Table 3과 Fig. 5와 같이 좋은 응답특성을 보여주고 있다. 따라서 PID제어기를 포함한 본 시스템은 안정하다고 판단된다.

4.1.2 미동기구 시뮬레이션

Fig. 6은 미동기구의 시뮬링크를 도시하고 있다. 그리고 Fig. 7은 이에 대한 주파수 응답을 보여주고 있다.

압전소자 구동용 앰프 출력전류의 한 개에 의한 비선형성의 나타나지 않는 0.1 μm의 진폭으로 제어기의 계인을 동정을 했다. 미동기구의 정적 계인 kp도 0.1 μm 진폭의 경우의 값, 0.078 μm를 이용하고 있다.

Fig. 7에 의해 미동구조체의 공진주파수가 약 1KHz~2KHz인 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 14와 Table 5에서는 시간영역의 스텝응답과 그 분석을 나타내었다. 시간영역의 응답에서도 만족할만한 응답을 보여주고 있는 것을 알 수 있다.

이렇게 시뮬레이션 결과를 보는 것과 같이 미동기구의 PID제어기와 시스템은 안정하다고 판단된다. Table 8은 미동기구에 적용하는 PID제어기의 파라미터 값이다.

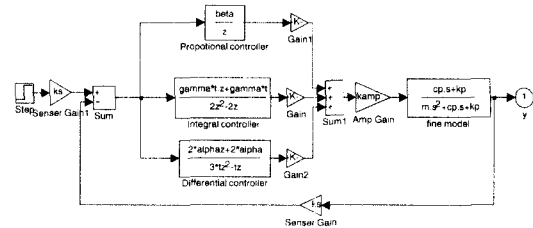


Fig. 6 The Simulink of Fine Apparatus

Table 5 The step response fine apparatus to perform simulation

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

Table 6 Control parameters of PID controller in fine apparatus to perform simulation

P	β 0.01
I	γ 800
D	α 5 × 10 ⁷
	T α 2.5 × 10 ⁻¹¹

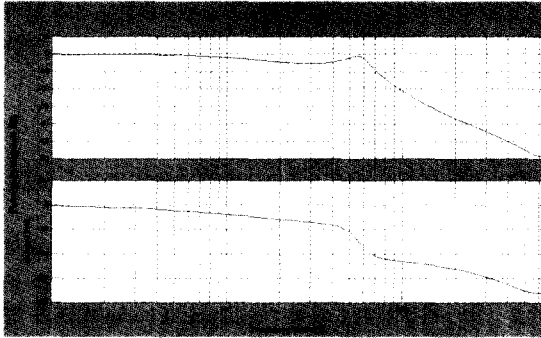


Fig. 7 The bode diagram of fine apparatus by closed loop to perform simulation

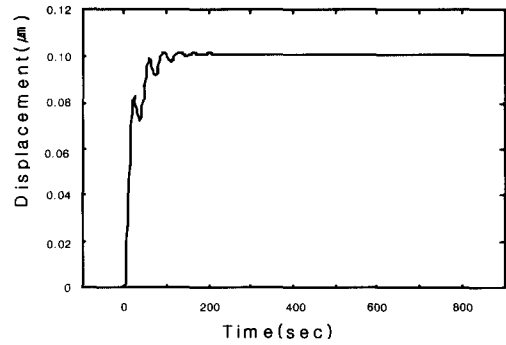


Fig. 8 The step response of fine apparatus to perform simulation

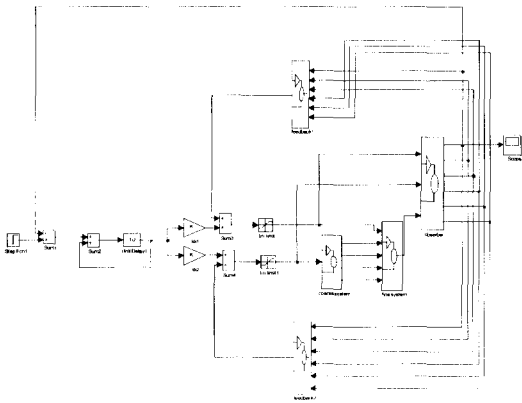


Fig. 9 Simulink of ultra precision positioning system

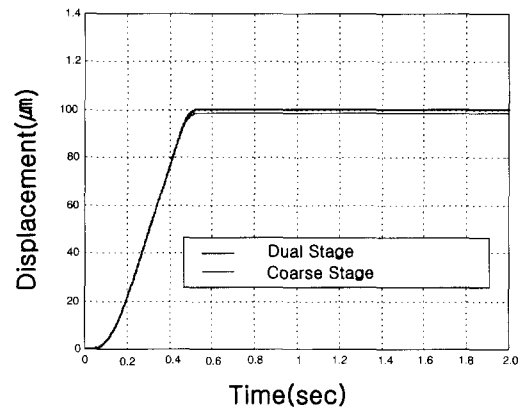


Fig. 10 Step response of dual stage to perform simulation

4.1.3 이중서보 시뮬레이션

위와 같이 조동과 미동의 시뮬레이션을 마친 뒤 이를 결합한 초정밀위치결정기구의 시뮬링크를 구성하였으며 이는 Fig. 9에 도시하였다.

Fig. 10은 Fig. 9의 시뮬링크에 의해 시뮬레이션하여 조미동 연동제어를 실시하였을 때 조미동 듀얼스테이지의 변위와 조동 스테이지의 변위를 나타낸 것이다. 여기서 조동과 미동의 스테이지가 서로 오차 값을 보정하면서 시스템이 구동되고 있는 것을 볼 수가 있었다. 이것은 연동 제어가 올바르게 작동되고 있음을 의미 한다.

안정된 두 시스템을 하나의 시스템으로 시뮬링크를 구성하고 이를 연동제어를 실시 한 결과 그림에서와 같이 좋은 제어성능을 보여주고 있었다.

따라서 초정밀위치결정기구를 Matlab에 의해 시뮬레이션

해본 결과 본 시스템의 제어성능 및 안전성을 확인하였고 실제 기기에서의 구동 실험과 시뮬레이션을 비교하여 최적의 제어성능과 파라미터를 선정하여야 한다.

4.2 위치결정 실험

초정밀서보기구 시스템에서 위치결정을 위한 변위 측정용 계측시스템은 레이저 간섭계를 이용하여 변위를 측정하고 본 시스템의 실험 장치도와 사진을 Fig. 12에 나타내고 있다.

Fig. 12는 본 시스템의 개략도이고, Fig. 13은본 시스템의 사진이다.

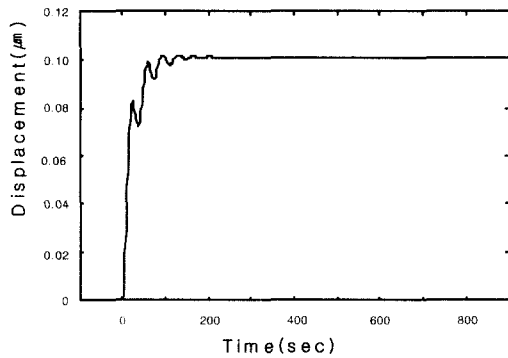


Fig. 11 Step response of fine stage for dual servo to perform simulation

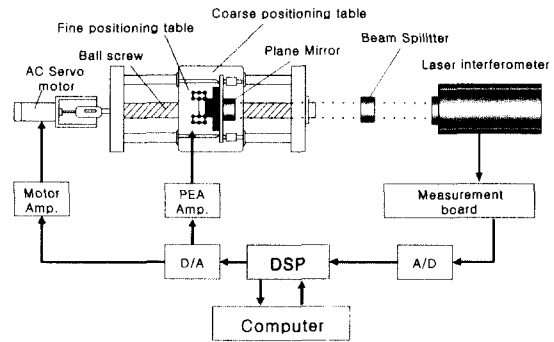


Fig. 12 Schematic diagram of ultra precision positioning system



Fig. 13 Photograph of ultra precision positioning apparatus

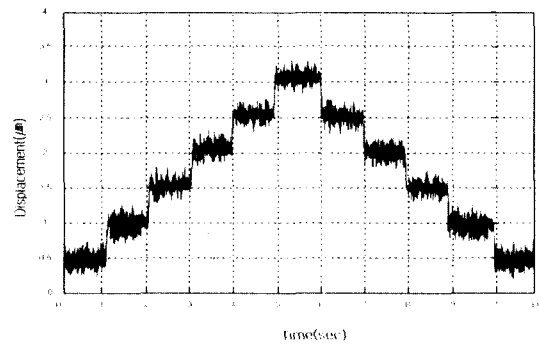


Fig. 14 $0.5\mu\text{m}$ Step response of feedback from laser interferometer output

4.2.1 조동기구 실험

시뮬레이션에서 설정된 파라미터를 기본으로 본 시스템을 구성하여 적용시켜 보았고 조동기구를 구동시킨 결과 Fig. 14와 같은 응답을 보여주었다.

레이저 인터페로미터를 피드백 센서로 사용하여 $0.5\mu\text{m}$ 스텝을 1초간 유지시키면서 내보냈을 경우 Fig. 14와 같은 응답을 보여주었다. 따라서 조동기구의 반복정밀도는 $\pm 0.5\mu\text{m}$ 임을 확인하였다. 또한 백래쉬 문제는 양호하게 보정되었다.

4.2.2 미동기구 실험

압전소자 구동시, 구동신호를 증폭하는 고전압 증폭기는 압전소자 구동에 직접적으로 영향을 주게 되므로, 이의 출력 특성은 중요하다. 따라서, 압전소자의 위치결정 실험에 앞서 고전압 증폭기의 출력특성을 확인한 후 실험하였다.

본 논문에서 사용한 고전압 증폭기는 THORLABS의 MDT693을 사용하였다.

위치결정실험은 먼저 $0.1\mu\text{m}$ 스텝을 주어 Fig. 15와 같이 스텝응답을 확인하였다. 시뮬레이션의 스텝응답과 아주 유사한 것을 볼 수 있다. 스텝응답으로만 본다면 본 시스템의 분해능은 $\pm 10\text{nm}$ 의 반복 정밀도를 보여 주었다.

여기서, 더 확실한 분해능의 신뢰성을 위하여 10nm 의 스텝을 1초간 유지시키며 스트로크 실험을 하였다. 그리고 개루프와 폐루프의 제어의 차이점과 제어를 적용하였을 때와 하지 않을 때의 성능을 비교하기 위해 $1\mu\text{m}$ 의 스텝을 주어 개루프 분해능 실험을 해보았다.

그 결과 Fig. 16과 Fig. 17 같이 성능이 확실하게 비교할 수 있었다. 개루프 제어와 제어를 적용하지 않았을 때는 압전소자의 히스테리시스와 오버슈트가 확실하게 나타남을 알 수 있었다.

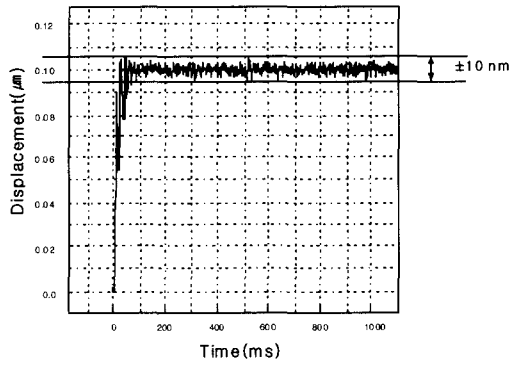


Fig. 15 Step response of fine apparatus

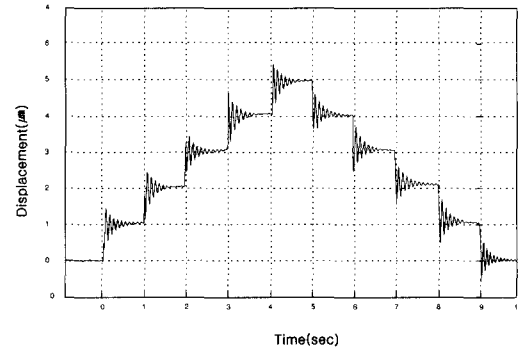


Fig. 16 The resolution experiment of ultra precision positioning system by open loop

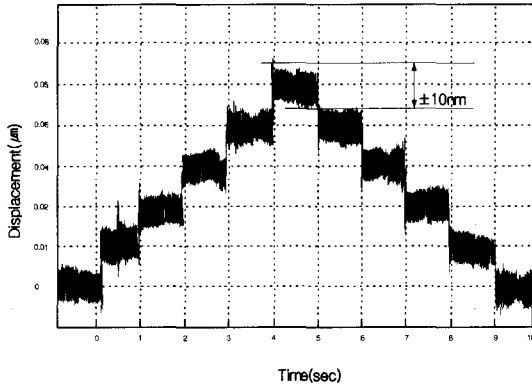


Fig. 17 The resolution experiment of ultra precision positioning system by closed loop

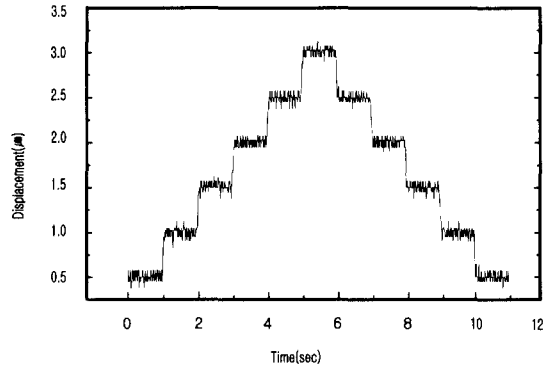


Fig. 18 The resolution experiment of dual positioning control

따라서 Fig. 17과 같이 미동기구의 분해능은 $\pm 10\text{nm}$ 임을 확인할 수 있었다.

4.2.3 연동제어 실험

위와 같이 조동과 미동을 따로 분리하여 위치결정 실험을 한 결과 각각의 기구에서는 만족할만한 성능을 보여주었다.

Fig. 18은 연동제어를 적용하여 분해능 실험을 한 것이다. 앞서 실험했던 Fig. 14의 조동기구의 분해능 실험과 비교한 결과 에러를 크게 보상하였음을 알 수 있다.

위와 같이 실험을 통하여 얻은 본 기구의 분해능을 확인한 결과 약 $\pm 10\text{nm}$ 였다.

5. 결론

본 논문에서는 초정밀위치결정기구를 조동과 미동의 두 개의 시스템을 한 개의 시스템으로 결합하여, 두 개의 입력을 한 개의 출력을 얻는 시스템을 구현하였다. 그리고 조동기구와 미동기구를 분리하여 실험하여 보았고 듀얼서보 알고리즘을 적용하여 연동제어 시뮬레이션을 하였다. 또 시행착오를 줄이기 위해 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 반복하여 실험결과를 비교하였으며 시뮬레이션과 실험은 유사한 결과를 보여 주었다. 본 기구의 모델과 설계한 PID제어기의 성능을 시뮬레이션을 통해 미리 분석하였으며 실험을 통하여 만족할 만한 PID제어기의 성능을 확인할 수 있었다.

조동 위치결정실험을 한 결과 $\pm 0.5\mu\text{m}$ 의 분해능을 확인하였다. 미동기구의 위치결정실험에서는 압전소자 자체의

비선형성 특징 때문에 페루프 제어가 필수적 이었으며, 또 위치결정실험을 한 결과 미동기구의 분해능은 $\pm 10\text{nm}$ 의 분해능을 얻을 수 있었다.

두 시스템은 우수한 성능을 보여주었으며, 이를 결합하여 연동 제어를 실시하였을 경우에도 좋은 결과를 보여 주었다. 실험을 통하여 확인한 레이저 피드백을 이용한 초정밀 위치결정기구의 분해능은 약 $\pm 10\text{nm}$ 임을 확인하였다. 이렇게 두 시스템의 연동제어 실시하여 좋은 성능을 얻을 수 있었다.

후 기

본 논문은 과기부 과학재단지정 지역협력 연구센터인 레이저응용신기술연구센터의 2001년도 연구비 지원에 의해 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) 박기형, 김재열, 광이구, 한재호, "DC Servo Motor를 이용한 초정밀위치결정기구의 컴퓨터 시뮬레이션 및 제어성능 평가", 한국공작기계학회지, 제9권 6호, 2000, pp. 164~169.
- (2) Simokohbe, "Control performance of Lead screw Positioning with Intelligent Control Methods", JSPE, Vol. 64, No. 112, 1998, pp. 1627~163.
- (3) Benjamin C. Kuo, "Automatic Control Systems", Prentice Hall, Englewood Cliffs. N. J 07632, pp. 689~699, 1994.
- (4) Chegal, Won, "A study on position control of piezo-driven translation actuator using fuzzy algorithms", KAIST Master Thesis, 1997, pp. 11~21.
- (5) Kaiji SATO, "performance Evaluation Lead screw Positioning System with Five Kinds of Control Methode(2nd Report)", JSPE Vol. 63. No.1 2, 1997, pp. 1759~1763.
- (6) H. NAKAZAWA, "Principles of Precision Engineering", Gordon and Breach Science Publishers, 1994, pp. 75~82, pp. 140~167.
- (7) S.T.Smith and D.G.Chetwynd, "Foundation of Ultra Precision Mechanism Design", Gordon and Breach Science Publishers, 1992, pp. 95~128.
- (8) 竹林進一, 玄葉佳則, 堀内幸, "工作機械におけるPZT精度位置決定のに関する研究", 日本精密工學會秋季大會學術講演會論文集, 1992, pp. 347~348.
- (9) 葛欣, 高野政晴, 佐々木健, "2重驅動精密ロボットに関する研究", 日本精密工學會誌, Vol. 57, No. 5, 1991, pp. 813~818.
- (10) 김재열, 김영석, 윤성운, 광이구, 한재호, 유신 "Laser Interferometer를 이용한 초정밀위치결정 피드백시스템의 컴퓨터 시뮬레이션 및 제어성능 평가", 2001 공작기계추계학술대회 논문집, 2001, pp. 68~74.