

# 유연힌지형 정밀스테이지의 모델링 및 진동제어

## Modeling and Vibration Control of the Precision Positioning Stage with Flexible Hinge Mechanism

김재익\*\* 황윤식\* 김영식† 김인수\*\* 김기범\*

J. I. Kim, Y. S. Hwang, Y. S. Kim, I. S. Kim and K. B. Kim

Key Words : Piezoelectric Actuator(압전 구동기), Sliding Mode Control(슬라이딩 모드 제어), Hysteresis(히스테리시스), Coupling Effect(연계 효과)

### ABSTRACT

This paper suggests a precision positioning control technique of a precision positioning stage with coupling effects. The precision positioning stage is supported by four flexible spring hinges and driven by two piezoelectric actuators. The dynamic characteristics of the precision positioning stage is modeled and identified by the FEM analysis. The dynamic characteristics of the stage are also identified by the frequency domain modeling technique based on the experimental data. Reliability of two modeling methods is examined by comparing the numerically and experimentally produced responses of the stage. This paper proposes a sliding mode control technique with integrator to improve the tracking ability of the precision positioning stage to the complex input signal using. To demonstrate the effectiveness of the proposed modeling schemes and control algorithm, experiment validations are performed.

### 1. 서론

초정밀 이송 기구는 정밀화, 소형화, 경량화 등이 함께 요구되는 우주 항공, 반도체 제조, 세포 생물학, 광전자 학 분야 등에서 그 활용도가 끊임없이 높아지고 있다.<sup>(1)</sup> 초정밀 이송 기구는 그것의 정밀도를 구현하기 위해 다양한 구성요소의 조합을 통해 이루어진다. 최근에는 나노미터(nm)의 분해능을 가지는 유연 힌지 기구와 빠른 응답성과 높은 분해능을 가지는 압전 구동기(Piezoelectric Actuator)의 조합을 통해 이루어진 이송 기구가 여러 가지 장점으로 인해 적용 범위가 넓어지고 있다.<sup>(2)</sup> 압전 소자는 기계적 에너지와 전기적 에너지를 서로 양 방향으로 변환을 일으킬 수 있는 것으로서 구동기 및 센서로서 모두 사용될 수 있고<sup>(3)</sup> 강유전체의 극화 효과(polling effect)에 기인한 히스테리시스(hysteresis) 특성과 입력전압의 변화없이 시간에 따라 변위가 변화하는 크리프(creep)특성을 가진다. 많은 연구들이 이러한 압전소자의 비선형특성을 보완하고 분해능과 정밀도를 향상시키기 위해 진행되어 왔다.<sup>(4-6)</sup>

본 연구에서는 유연 힌지와 압전 구동기를 이용하여

초정밀 스테이지를 설계, 제작하고자 한다. 또한 구현된 초정밀 스테이지는 유한요소해석을 통해 동적 거동을 해석하고 실험 및 주파수 영역에서의 커브피팅(curve fitting)에 의해 결정된 수학적 모델과 응답을 비교하여 규명된 모델의 신뢰성을 검증한다. 스테이지의 위치제어는 적분기가 포함된 슬라이딩 모드제어기를 통하여 이루어지도록 한다. 슬라이딩 모드 제어기 설계 계수는 외란 및 모델오차에 강인성을 갖도록 선정하였고 다양한 형태의 기준입력 신호에 대한 응답 실험을 통해 구현된 스테이지의 명령 추종성을 확인한다.

### 2 스테이지 모델링

#### 2.1 스테이지의 동적 특성

Fig. 1은 구현된 초정밀 스테이지의 형상과 유한요소 해석 소프트웨어(ANSYS)을 이용하여 얻어진 주요 진동 모드를 보인 것이다. 유한요소해석을 통해 정현파 응답을 얻기 위해 스테이지는 2330 요소수, 15418 노드수를 갖는 유한요소 모델로 표현되었고 Fig. 1(b)에서 보인 바와 같이 스테이지의 하단부는 고정시켰다. 재료의 물성치는 스테인레스 강 316의 것을 사용하였으며 해석 관심 주파수 영역은 1 kHz 이하로 설정하였고 입력 가진력 진폭은 X방향, Y방향 모두 45N으로 하였다. 유한요소해석을 통해 얻어진 주요 공진 주파수는 100Hz, 322Hz 및 349Hz에서 발생되었다. 322Hz와 349Hz는 각각 X축과 Y축방향의 강제 운동(rigid body motion)모

† 교신저자; 금오공과대학교 기계공학부  
E-mail : yskim@kumoh.ac.kr  
Tel : (054) 478-7365, Fax : (054) 478-7319

\* 금오공과대학교 기전공학과  
\*\* 정희원 금오공과대학교 기계공학부

드의 공진 주파수이고 100Hz는 롤링(rolling) 모드의 공진 주파수이다.

Fig. 2는 스테이지의 위치제어 실험을 위한 제어계 구성도이다. 기준 입력 신호에 따라 이산신호 처리장치(dSPACE 1104)는 적절한 제어기 출력 신호를 발생시키고 이는 파워 증폭기(AVL 790)를 거쳐 스테이지 이송을 위해 압전 구동기에 인가된다. 스테이지의 X축과 Y축변위를 측정하기 위하여 스테이지 상단에 상단에 2개의 갭 센서(gap sensor : ADE Technologies 5130)를 설치하였다. 갭 센서로부터 측정된 변위 신호는 아날로그 저역통과 필터를 거친 후 고속 이산신호 처리장치에 입력된다. 제어 샘플링 주파수는 정밀 스테이지의 공진주파수를 고려하여 5kHz로 정하였고 저역통과 필터의 차단 주파수는 2.5kHz로 정하였다.

Fig. 3은 스테이지의 동적 특성을 확인하기 위해 30V, 0.5초 주기의 사각파형의 기준 입력신호와 그에 따른 응답을 보인 것이다. 잔류진동 지속시간이 X축 방향으로 0.25초 이상 Y축 방향으로 0.2초 이상이고 최대 오버슈트(overshoot)가 X축 방향으로 97%, Y축 방향으로 31%인 것을 알 수 있다.

## 22 주파수 영역 커브피팅을 이용한 스테이지 모델링

복잡한 형태의 구조물에 대해 이산-실시간 제어가 가능하도록 하려면 정확고 가능한 낮은 차수(order)의 시스템 모델링이 요구된다. 이는 행렬분수 표현법(matrix-fraction description)을 이용하는 주파수영역에서의 동특성 규명법을 통해 실현될 수 있다.<sup>(7)</sup>

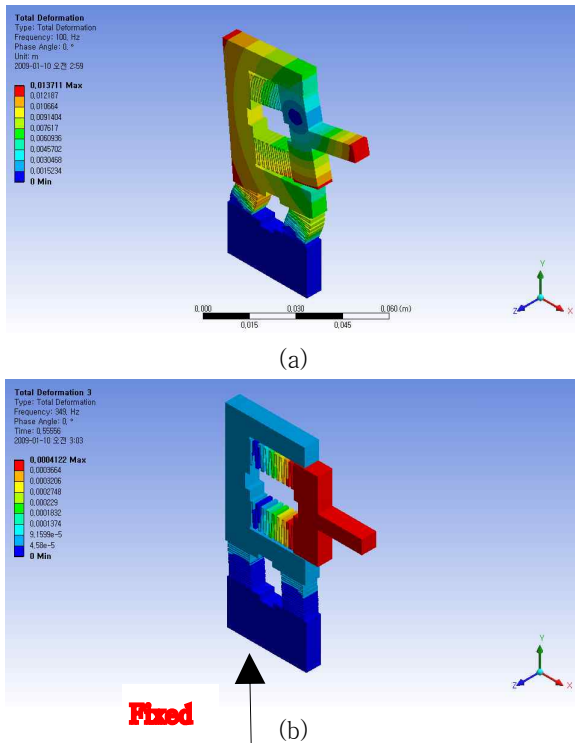


Fig. 1 FEM Analysis of precise stage using flexible hinge mechanism : (a) 100Hz (b) 349Hz

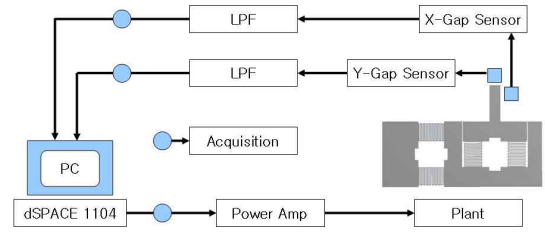


Fig. 2 Schematic diagram of experimental device

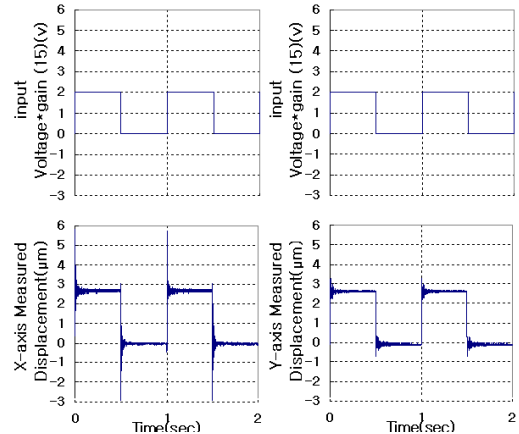


Fig. 3 Measured response of the uncontrolled stage to step reference input

Fig. 4는 백색 잡음 입력신호에 대한 스테이지의 출력응답을 측정하여 얻어진 주파수응답 및 커브피팅을 통해 규명된 스테이지 모델의 주파수 응답 곡선을 보인 것이다. Fig. 4(a)는 X축 방향 가진에 대한 X축 방향 변위응답에 관한 주파수 응답을 보인 것이고 규명된 모델의 차수는 3차로 정하였다. Fig. 4(b)는 Y축 방향 가진에 대한 Y축 방향 변위응답에 관한 주파수 응답을 보인 것이고, 모델의 차수는 6차로 정하였다. 관심주파수 대역은 유한요소해석으로 예측한 공진주파수(X축: 322Hz, Y축:100Hz, 349Hz)들이 포함되도록 700Hz이하로 설정하였다.

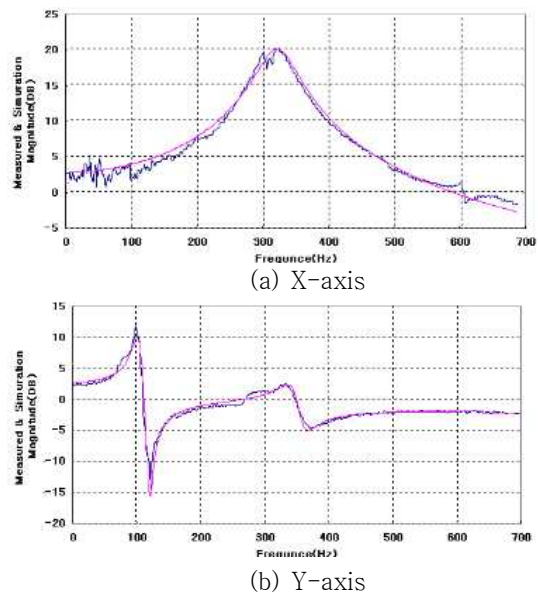


Fig. 4 Measured and identified FRF of the stage

Fig. 4로부터 실험을 통해 얻어진 주파수응답과 커브피팅을 통해 규명된 주파수 응답 사이의 오차는 미미함을 확인할 수 있다. 유한요소해석으로 예측된한 공진주파수와 커브피팅을 통해 규명된 주파수응답에서의 공진주파수(X축:328Hz, Y축:99Hz, 342Hz)를 비교해보면 1~7Hz 차이를 보이고 있으며 이 차이는 유연 힌지의 와이어 커팅 가공 시의 오차로 인해 유연 힌지의 스프링 특성의 불균일로부터 발생된 것으로 사료된다.

식(1)은 X축과 Y축에 대해 규명된 상태 공간 모델을 보인 것이다.

$$\begin{aligned}
 A_x &= \begin{bmatrix} 2.77 & -2.70 & 0.93 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} & B_x &= \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 C_x &= [0.34 \quad -0.74 \quad 0.18] & D_x &= [0.19] \\
 A_y &= \begin{bmatrix} 5.01 & -10.46 & 11.54 & -7.02 & 2.17 & -0.25 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} & B_y &= \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 C_y &= [-0.690 \quad 2.587 \quad -3.778 \quad 2.556 \quad -0.683 \quad 0.00573] \\
 D_y &= [-0.0226]
 \end{aligned} \quad (1)$$

### 2.3 스테이지 2축 운동의 연계(coupling) 특성

본 연구의 스테이지는 기계적 구조 상 X축과 Y축 운동 과정에서 어느 정도의 상호 연계 작용이 야기되는 것은 불가피하다. Fig. 5는 스테이지의 연계 운동과 관련된 주파수 응답함수의 실험적 측정결과와 이들의 커브 피팅 결과를 보인 것이다. Fig. 5에서 보이는 것과 같이 Y축 가진에 대한 X축 변위 응답이 X축 가진에 대한 Y축 응답에 비해 상대적으로 크게 나타나고 있음을 알 수있다.

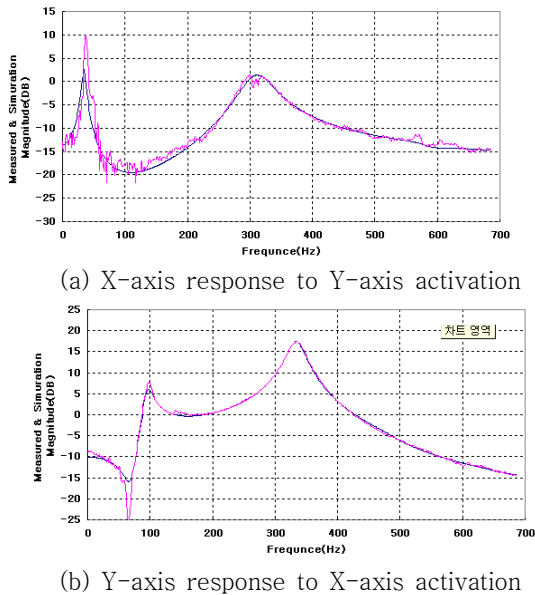


Fig. 5 Measured and identified FRF of the coupling effect of stage

## 3. 제어기 설계

### 3.1 슬라이딩 모드 제어

상태 공간 가변구조 제어이론 중에서 체계화 되어 있는 것 중의 하나가 슬라이딩 모드 제어법이며 현재 다양한 형태의 서보계 설계에 널리 이용되고 있다. 슬라이딩 모드 제어에서 가변구조는 시스템 상태변수가 전환함수의 경계지역 안에서 놓이도록 설계된다. 따라서 제어계의 동적특성은 전환함수의 선택에 의해서 결정되고 상태 모델의 불확실성에도 제어계가 강건하게 유지될 수 있다. 식(2)는 시스템의 상태공간 모델이다.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (2)$$

(A,B)는 가제어형 시스템 행렬이고 B는 전계수(full rank)이다. 전환함수(switching function)를 다음과 같이 가정한다.

$$s(k) = Sx(k) \quad (3)$$

여기서  $S \in R^{m \times n}$ 는 전계수이며 초평면(hyperplane)은  $Sx = 0$ 로 정의 된다. 또한 직교행렬  $T^r \in R^{m \times n}$ 을 이용하여 새로운 상태변수  $z(k) = T_r x(k)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$z_1(k+1) = A_1 z_1(k) + A_{12} z_2(k) \quad (4)$$

$$z_2(k+1) = A_{21} z_1(k) + A_{22} z_2(k) + B_2 u(k)$$

$$s(k) = S_1 z_1(k) + S_2 z_2(k) \quad (5)$$

식 (4)에서의 행렬들은 다음의 관계가 있다.

$$T_r A T_r^T = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \quad T_r B = \begin{pmatrix} 0 \\ B_2 \end{pmatrix} \quad (6)$$

상태변수가 슬라이딩면에 유지되고 있는 동안 ( $k \geq k_s$ )  $s(k) = 0$ 이고 다음 식이 성립된다.

$$z_1(k+1) = (A_{11} - A_{12}M)z_1(k) \quad (7)$$

제어계가 점근적으로 안정(asymptotically stable)하기 위한 조건은  $k \rightarrow \infty$ 일때  $z_1(k) \rightarrow 0$ 이 만족 되어야 한다. 이에 따라  $M = S_2^{-1}S_1$ 로부터 설계된 초평면에서  $(n-m)$ 개의 극점들은 단위 원안에 존재해야 한다.  $M$ 을 저차원화된 식의 극점이라 하고, 일반적으로 초평면 행렬  $S$ 는  $S_2 = I_m$  으로 놓고 다음 관계로부터 결정한다.

$$S T_r^T = [M \quad I_m] \quad (8)$$

최적 초평면은 다음과 같은 성능지수의 도입으로 결정할 수 있다.

$$J = 1/2 \sum_{K=K_s}^{\infty} x^T(k) Q x(k) \quad (9)$$

여기서 Q는 양의 한정 대각행렬이며,  $k_s$ 는 슬라이딩 거동이 시작되는 순간이며 Q는 다음과 같은 좌표변환에 의해 구성된다.

$$T_r Q T_r^T = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} \\ Q_{21} & Q_{22} \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서  $Q_{21} = Q_{12}^T$ 이며 식 (9)는 다음과 같이 표현된다.

$$J = 1/2 \int_{k_s}^{\infty} z_1^T Q_{11} z_1 + 2z_1^T Q_{12} z_2 + z_2^T Q_{22} z_2 dt \quad (11)$$

이제 리카티(Riccati) 방정식의 해  $P_1$ 를 고려하여 최적 제어 문제를 풀면 다음과 같다.

$$z_2 = -Q_{22}^{-1}(A_{12}^T P_1 + Q_{21}) z_1 \quad (12)$$

$$M = -Q_{22}^{-1}(A_{12}^T P_1 + Q_{21}) \quad (13)$$

초평면을 설계한 후에는 슬라이딩 모드의 존재를 보장하기 위한 제어를 설계해야 한다. 기저(known)의 불확실 성분  $f(t, x, u)$ 를 포함하는 다음의 시스템을 가정하기로 하자.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + f(t, x, u) \quad (14)$$

여기서  $f: R \times R^n \times R^m \rightarrow R^m$ 이고 불확실 성분  $f(t, x, u)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$f(t, x, u) = B\xi(t, x, u) \quad (15)$$

여기서  $\xi$ 는 불확실성 또는 비선형성이다. 제어법칙은 선형 제어부  $u_l(k)$ 와 비선형 제어부  $u_n(k)$ 의 조합으로 식 (16)과 같이 표현된다. 채터링(chattering) 문제를 고려하여 평활함수(signum)  $\frac{s(k)}{|s(k)| + \delta}$ 를 사용하면 비선형 제어부는 식(17)과 같이 표현된다.

$$u(k) = u_l(k) + u_n(k) \quad (16)$$

$$u_l(k) = -\Lambda^{-1}(SB - \Phi S)x(k)$$

$$u_n(k) = -(\eta \|\Lambda^{-1}\| |s(k)| + \beta) \frac{s(k)}{|s(k)| + \delta} \quad (17)$$

여기서  $\Lambda = SB$ 이고  $\Phi$ 는 초평면의 고유값이다.  $\eta$ 와  $\beta$ 는 양의 비선형 제어계수이다.  $\delta$ 는 전환시간의 완급을 조절하는 평활함수의 계수이다.

### 3.2 관측기 설계

상태 되먹임 제어를 구현하기 위해서는 시스템의 모든 상태 변수를 측정할 수 있어야 한다. 그러나 실제 상황에서는 시스템의 모든 상태를 정확히 알 수 없으며 대부분의 경우에 잡음이 섞인 측정값을 이용하게 된다. 이에 따라 잡음을 확률변수로 취급하여 상태 추정오차의 기대값이 최소가 되도록 상태변수를 추정하는 관측기가 필요하게 된다.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + Gw(k) \\ y(k) &= Cx(k) + Du(k) + v(k) \end{aligned} \quad (18)$$

$w(k)$ 는 외란(process disturbance),  $v(k)$ 는 측정잡음(measurement noise)을 의미하며 이것들은 평균이 0이

고 상호분산(covariance)이 각각  $Q_0$ 와  $R_0$ 인 확률 변수로 나타낸다. 상태변수의 추정치를  $\hat{x}$ 라 하면 추정오차  $x_e(k)$ 는 다음과 같이 정의 된다.

$$x_e(k) = x(k) - \hat{x}(k) \quad (19)$$

이 추정오차의 분산을 성능지수로 사용하고 이를 최소화 시키는 관측기 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + Bu(k) + L(y(k) - C\hat{x}(k) - Du(k)) \quad (20)$$

여기서  $L$ 은 관측기 이득행렬로서 다음과 같이 결정된다.

$$L = APC^T(R_0 + CPC^T)^{-1} \quad (21)$$

여기서  $P$ 는 관측기 리카티 방정식의 해이고, 다음과 같이 표현된다.

$$P = APA^T - APC^T(R_0 + CPC^T)^{-1}CPA^T + LQ_0L^T \quad (22)$$

## 4. 스테이지 운동제어 실험

Fig. 6은 스테이지의 위치 제어를 위한 적분기가 포함된 슬라이딩 모드 제어계의 블록선도를 보인 것이다. 제어계에서 적분기는 기준 입력신호에 대한 스테이지의 추종능력을 향상시키며 히스테리시스를 보완하기 위하여 포함하였다. 3.1절에서 언급된 슬라이딩 모드 제어기 설계 시에 필요한 계수들은 시행오차법을 사용하여 Table. 1과 같이 정하였다.

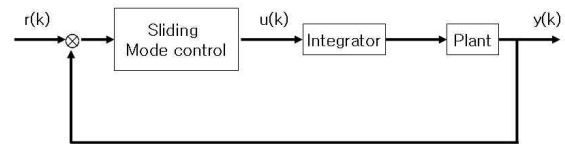


Fig. 6 Schematic diagram of the servo system with sliding mode controller

Table. 1 Design parameters used for the sliding mode controller

symbol	description	X-axis	Y-axis
$\eta$	nonlinear coefficient I	0.001	0.0001
$\beta$	nonlinear coefficient II	0.0001	0.00001
$\delta$	Signum function coefficient	0.035	0.015
$R_0$	Observer Gain	0.14	0.9
$Q_0$	Observer Gain	0.0084	0.00001
S	switching function	[1,0,11,0]	[1,1.011*10 <sup>-3</sup> , -1.092*10 <sup>-19</sup> , 3.0325*10 <sup>-36</sup> , 0,0]

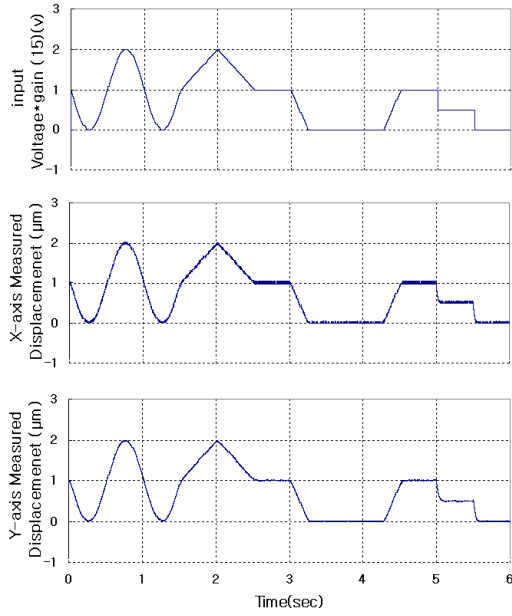


Fig. 7 Response of sliding mode control system to the complex reference input

Fig. 7은 정현파, 램프(ramp), 계단 함수 등이 포함된 복잡한 형태의 기준입력에 대한 슬라이딩 모드 제어기를 통해 제어된 스테이지 응답을 보인 것이다. 기준 입력 신호와 응답 출력 신호들이 급격한 변곡점 들을 제외하고는 완벽히 일치하고 있음을 알 수 있다. 즉, 기준 입력에 대한 명령 추종기능이 X축과 Y축 모두 매우 우수하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 X축과 Y축 운동사이의 스테이지 연계 특성을 외란부로 간주하여 2축 변위 제어를 위한 슬라이딩 모드 제어기를 설계하였고 이 같은 제어계의 블록선도는 Fig. 8과 같다. Fig. 9는 원형의 기준 입력 운동궤적에 대한 Table. 1의 제어 계수를 이용하여 설계된 2축 슬라이딩 모드 제어계의 응답을 보인 것이다. 원형의 기준입력 운동 궤적은 60V 진폭의 1Hz 사인신호와 코사인신호를 각각 X축과 Y축에 인가함으로써 발생시켰다. Fig. 9로 부터 원형의 기준 입력 운동궤적에 대한 응답이 타원형으로 나타나는 것을 알 수 있으며 이는 X축과 Y축 제어계의 응답속도의 차이로부터 발생된 것이다.

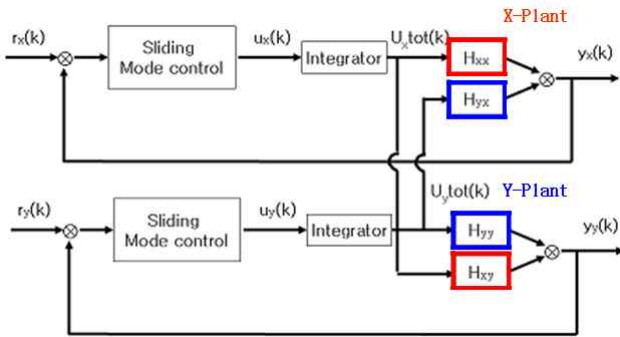


Fig. 8 Schematic diagram of the sliding mode control system for two axes displacement

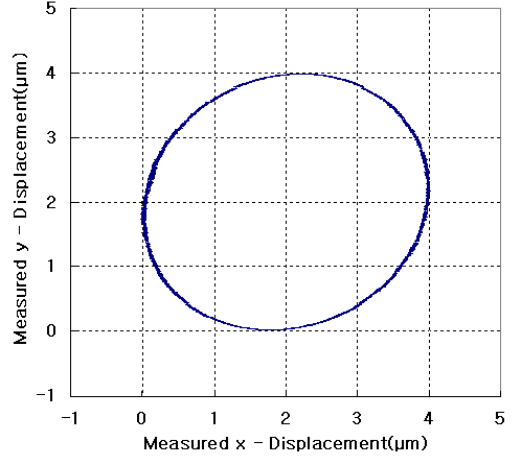


Fig. 9 Measured response of the sliding mode control system to reference circular motion input

Table. 2 Design parameters used for the 2-axes controller

symbol	description	X-axis	Y-axis
$\eta$	nonlinear coefficient I	0.0001	0.00001
$\beta$	nonlinear coefficient II	0.0001	0.00001
$\delta$	Signum function coefficient	0.035	0.035
$R_0$	Observer Gain	0.44	0.98
$Q_0$	Observer Gain	0.0084	0.00001
$s$	switching function	[1,0,11,0]	[1,1.011*10 <sup>-3</sup> , -1.092*10 <sup>-19</sup> , 3.0325*10 <sup>-36</sup> , 0, 0]

2축 슬라이딩 모드 제어계의 이 같은 문제점을 보완하기 위해 X축과 Y축 제어계의 응답속도가 일치되도록 시행오차법을 통하여 Table. 2와 같은 제어계수를 선정하여 제어계를 재설계하였다. Fig. 10은 원형의 기준 입력 운동궤적에 대한 이 같이 설계된 2축 슬라이딩 모드 제어계의 응답을 보인 것으로서 2축 제어계 사이의 응답속도가 일치됨으로 인해 응답궤적이 기준입력과 같이 원형을 이루는 것을 알 수 있다.

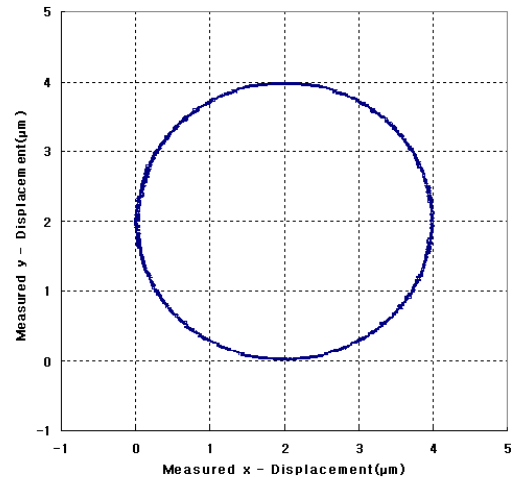


Fig. 10 Measured response of the 2-axes control system to reference circular motion input

Fig. 11은 Table. 2의 제어 계수를 이용하여 설계된 2축 제어계에 X축 기준입력으로 30V 1Hz 사각파를 인가하고 Y축 기준입력으로 0V를 인가한 경우의 응답을 보인 것이다. Fig. 11에 보인 바와 같이 X축 변위 응답은 사각파 입력신호에 별다른 오버슈트(overshoot)와 잔류진동이 발생되지 않고 적절하게 추종하는 것을 알 수 있으며 동시에 Y축 변위는 센서 잡음 정도의 오차를 제외하고는 0에 추종함을 알 수 있다. Fig. 12는 Y축 기준입력으로 30V 1Hz 사각파를 인가하고 X축 기준입력으로 0V를 인가한 경우의 2축 제어계의 응답을 보인 것으로서 Fig.11의 실험결과와 유사하게 Y축 변위는 사각파에, X축 변위는 0에 각각 적절히 추종함을 알 수 있다.

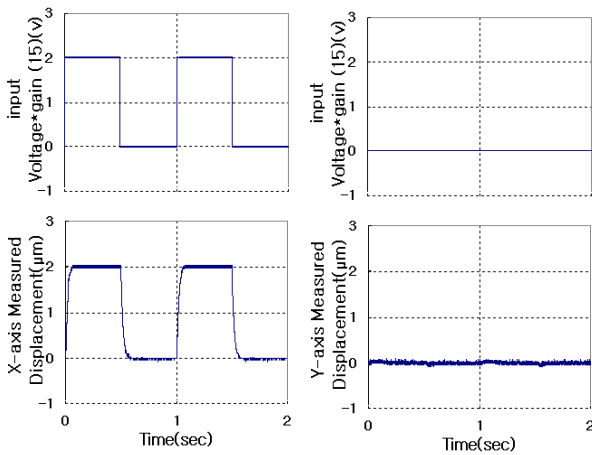


Fig. 11 Measured response of the 2-axes control system to X-axis step reference input

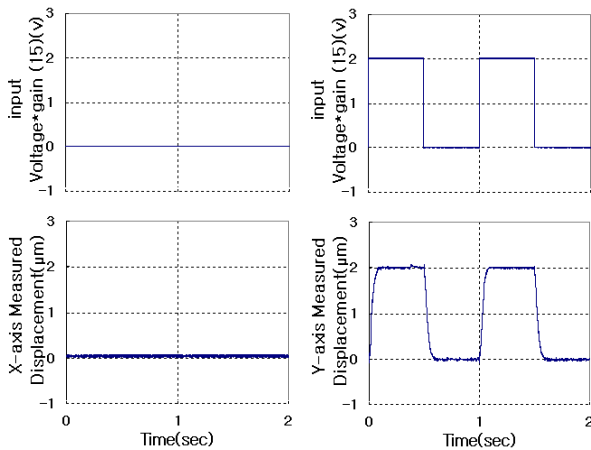


Fig. 12 Measured response of the 2-axes control system to Y-axis step reference input

## 5. 결론

본 논문에서는 압전 구동기와 유연힌지를 이용하여 설계, 제작된 초정밀 2축 스테이지의 운동제어법을 기술하였다. 스테이지의 동적 특성은 유한요소해석법과 실험을 통해 측정된 주파수 응답함수를 이용하여 규명되었다. 2축 스테이지 제어계 구성을 위해 강인제어법의

하나인 슬라이딩 모드 제어법을 적분기가 포함된 스테이지 모델에 적용하였다. 설계된 제어기를 적용하면 정현파, 램프(ramp), 계단 함수 등이 포함된 복잡한 형태의 기준입력에 대한 스테이지 응답의 명령 추종기능이 급격한 변곡점 들을 제외하고는 X축과 Y축 모두 매우 우수하게 나타났다. X축과 Y축 운동사이의 스테이지 연계 특성은 외란부로 간주하여 2축 변위 제어를 위한 슬라이딩 모드 제어기가 설계되었다.

X축과 Y축 각각의 명령 추종 특성이 우수하여도 2축 사이의 응답속도가 다른 경우에는 원형의 기준 입력 운동궤적에 대한 스테이지 제어계의 응답 궤적은 타원형으로 나타나게 된다. 이 같은 문제점을 해결하기 위해서는 시행오차법을 통하여 X축과 Y축에 대한 제어계의 응답속도가 일치되도록 제어기 설계계수를 선정하여야 한다. 2축 스테이지 제어계를 슬라이딩 모드법을 통해 구성하는 경우 제어계에 적분기를 포함시키면 사각파 입력신호에도 별다른 오버슈트(overshoot)와 잔류진동이 발생되지 않고 스테이지의 응답이 적절하게 추종될 수 있다.

## 참고 문헌

- (1) Jeong K. W., 2007, "Modeling and robust control of a nano-stage using the frequency response analysis", 한국공작기계학회, pp.414~419
- (2) Park. J. S., 2006, "Robust Control for a Ultra-Precision Stage System", The Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 344~349
- (3) Lee G. M., 1997 "압전 세라믹스 주파수 소자의 소개와 개발 동향", The journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, pp.172-178
- (4) Kaizuka, H., and Byron, S., May, 1988, "A Simple Way to Reduce Hysteresis and Creep When Using Piezoelectric Actuators", Japanese Journal of Applied Physics, Vol.27, No.5, pp. L773~776
- (5) Ping Ge and Musa Jouaneh, July, 1995, "Modeling hysteresis in piezoceramic actuators", Precision Engineering, Vol. 17 No. 3, pp. 211~212
- (6) M. Goldfarb, N.celanovic, Sep., 1997, "A Lumped parameter Electro-mechanical Model for Describing the Nonlinear Behavior of Piezoelectric Actuators", Transactions of the ASME Vol. 119, pp. 478~485
- (7) Juang J. N., 1994, "Applied System Identification", Prentice Hall, chapter 7, "Frequency-Domain State-Space System Identification"
- (8) Jang J. W., 2008, "Command Generation Method for High-Speed and Precise Positioning of Positioning Stage", The Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 122~129
- (9) C. Edward, S. K. Spurgeon, 1998, "Sliding mod control, Theory and applications", Taylor and Francis Ltd, pp. 1~18
- (10) S. B Park & C.H Park, 1998, "Design of an Optimal Controller with Neural Networks for Non-minimum Phase Systems)", 전자공학회 논문집, pp. 56~66