

차세대 리소그래피 시스템을 위한 2축 나노스테이지의 시뮬레이션 툴 구축

유건모* · 정종철* · 정정주** · 허건수†

(2004년 3월 30일 접수, 2004년 8월 3일 심사완료)

Development of a Simulation Tool of a Two-Axis Nano Stage for a New Generation Lithography System

Gunmo Yoo, Jongchul Jung, Chung Choo Chung and Kunsoo Huh

Key Words : Lithography System(노광장치), Piezo-Actuator(압전구동기), Hysteresis(히스테리시스), Creep(크리프), Nano Stage(나노 스테이지), Simulation Tool(시뮬레이션 툴)

Abstract

A nano-stage simulation tool is developed for an advanced E-beam lithography system. Even if piezo-actuators are believed to be compatible for the E-beam lithography system, it is difficult to predict their characteristics due to their nonlinearities such as hysteresis and creep. In this paper, the nonlinear properties are modeled for a piezo-actuator by considering the voltage range and speed variations. The hysteresis is described as the first order differential equation with 24 sets of parameters and the creep is modeled as a time-dependent logarithmic function with 2 sets of a parameter. A two-axis nano stage with piezo-actuators are investigated for realizing nano scale motions. The characteristics of flexure guide mechanisms are analyzed based on the finite element method using the ANSYS software. The simulation tool for the nano stage is constructed by using the RecurDyn software. The dynamic response of the nano stage is obtained in simulations and compared with the experimental data.

1. 서론

반도체의 집적도를 좌우하는 핵심 공정기술로서 차세대 대체 기술 중의 하나인 전자빔(E-beam) 노광장치는 웨이퍼에 회로 패턴을 새기는 공정으로 광원을 기존의 빛 대신 전자빔으로 대체함으로써 빔의 크기를 줄여 패턴의 미세화를 가져올 수 있는 방식이다. 이러한 전자빔 노광장치는 초고진공의 환경이 필요하기 때문에 이러한 환경에서 구동할 수 있는 액추에이터와 스테이지의 개발이 필수적이며 이 분야에서 폭넓은 연구가 진행되고 있다.

초정밀 전자빔 노광장치에 사용될 수 있는 스테이지는 마이크로 컬럼 소스 팁의 정밀 정렬을 위한 2축 나노구동 스테이지와 웨이퍼의 마스크 라이터(mask writer)를 위한 스테이지로 분류할 수 있다. 마이크로 컬럼에서의 소스 팁 정렬을 위한 나노 스테이지는 컬럼의 상단에 위치하여 소스 팁을 2축 방향으로 정렬 시켜주는 역할을 하며 수십 나노의 분해능과 수 나노의 반복도 오차를 가지고 있어야 한다. Muray⁽¹⁾ 등은 마이크로 컬럼 전자빔 리소그래피 시스템에서 1.5 cm × 1.5 cm 크기의 플렉서 타입 2축 스테이지를 개발하였는데, 2축 방향의 압전구동기에 의해 최대 100 μm 까지 팁을 이동시킬 수 있다. 웨이퍼의 초정밀 위치 결정을 위한 스테이지의 연구에서는 Akeno⁽²⁾ 등은 100 nm의 정확도를 가지는 전자빔 마스크 라이터를 위한 스테이지를 설계하였는데, 마찰 구동 타입의 구동장치를 이용하였다. 또한 Kunioka⁽³⁾ 등은 울트라소닉 리니어 모터를 이용한 스테이지를 설계하였다.

* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

** 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : khuh2@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2290-0437 FAX : (02)2295-4584

초정밀 스테이지를 위한 모델링 연구에서 압전 구동기로 구동되는 스테이지는 히스테리시스와 크리프 등의 비선형성이 상당히 강하기 때문에 이를 모델링하는데 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하고자 압전구동기의 모델링에 대한 많은 연구가 진행되었다.⁽⁴⁻¹⁰⁾ 히스테리시스의 모델링에서 널리 알려진 방법으로는 실험데이터로부터 수치적으로 계산된 함수를 적용하는 Preisach 모델,^(4,5) 입출력 간의 매핑으로 히스테리시스의 특성을 묘사하는 오퍼레이터를 정의하는 방법^(6,7)과 히스테리시스를 1차 비선형 미분방정식으로 모델링 하는 방법^(8,9) 등이 있다. 크리프는 입력이 증가하지 않는 상태에서 시간에 따라 변위가 증가하는 특성을 의미하며 시간에 대한 로그함수로 모델링 할 수 있다.⁽¹¹⁾ 또한, Jung and Gweon⁽¹²⁾은 크리프 계수의 결정시 히스테리시스의 특성을 고려해야 하며, 파라미터의 스케줄링 방법을 제시하였다. 또한, Park⁽¹³⁾ 등은 1축 나노 스테이지의 모델링을 수행하였는데, 히스테리시스는 Banning⁽⁹⁾ 등이 제안한 1차 미분방정식으로 크리프는 시간에 대한 로그함수로 모델링하였으며, 스테이지는 2차 질량-스프링-댐퍼의 1축 시스템으로 모델링하였다. 그러나 이 연구에서는 압전구동기를 모델링할 때, 고정된 파라미터를 이용하였기 때문에, 동작되는 영역에 따라 잘 맞지 않는 구간이 발생하는 단점이 있었다.

본 논문에서는 전자빔 노광장치에 필요한 2축 나노 스테이지를 위한 모의실험 환경을 구축하고자 한다. 2축 나노 스테이지는 압전구동기, 탄성 가이드와 강체로 구성되어 있으므로 모델링 과정을 압전구동기의 모델링, 탄성 가이드의 모델링과 스테이지의 바디 부분 모델링으로 구분할 수 있다. 첫째, 압전구동기에서의 비선형 특성을 모델링하기 위하여 Park⁽¹³⁾ 등이 제안한 방법을 개선하여 전압 입력의 범위와 속도의 변화에 따른 각각의 파라미터 세트를 실험을 통하여 구하였으며, 시뮬레이션 틀에서 입력 전압의 영역과 속도에 따라 히스테리시스와 크리프의 파라미터를 업데이트하는 방법을 취하여 보다 정확한 거동을 구현해내도록 하였다. 둘째, 탄성 가이드의 모델링은 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS⁽¹⁴⁾를 이용해서 힘과 변형 관계를 해석한 후에 진동 해석을 수행하여 추출된 진동 모드를 상용 동역학 해석 프로그램인 RecurDyn⁽¹⁵⁾과의 인터페이스를 통해서 링크 구조로 스테이지와 연결하였다. 셋째, 스테이지의 바디 부분은 RecurDyn에서 강체로 모델링하여 탄성 가이드와 결합될 수 있도록 하였다. 또한, 이렇게 구축된 시뮬레이션 틀을 실험 결과와 비교하였으며 제시한 모델링 방법의 타당성을 확인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 압전 구동기를 모델링하였으며, 3장에서는 RecurDyn을 이용한 시뮬레이션 틀을 구축하였고, 4장에서 실험과의 비교를 통하여 그 타당성을 검증하였다. 마지막으로 5장에서 결론을 맺었다.

2. 압전구동기의 모델링

2.1 히스테리시스 모델링

압전구동기는 히스테리시스와 크리프로 인하여 비선형 특성이 크게 나타나므로 이에 대한 고려가 필수적이다. Banning⁽⁹⁾ 등은 히스테리시스를 다음의 1차 미분방정식으로 모델링하였다.

$$\dot{w}(t) = -\alpha w(t)|\dot{v}(t)| + \alpha a|\dot{v}(t)|v(t) + b\dot{v}(t) \quad (1)$$

여기서 $w(t)$ 는 히스테리시스로 인한 변위이고, $v(t)$ 는 입력전압이다. 식 (1)에서 a , b , α 는 히스테리시스의 특성을 나타내는 계수로서, Banning⁽⁹⁾ 등과 Park⁽¹³⁾ 등은 압전구동기의 전체 거동 영역에서 구한 고정된 파라미터 값을 취하여 히스테리시스의 비선형성을 모델링하였다. 그러나, 히스테리시스 루프는 Fig. 1에서 보여지는 것처럼 전체 거동 영역에서 그 특성이 다르게 나타나며, 입력 전압의 범위와 변화율에 따라 각각 다른 특성을 가진다. 따라서 각각의 영역별로 모델링을 수행하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 입력전압의 범위에서는 0~20V, 20~40V, 40~60V, 60V 이상의 4구간으로 나누고, 속도에서는 0~20V/sec, 20~40V/sec, 40~60V/sec, 60~80V/sec, 80~100V/sec, 100V/sec 이상의 6구간으로 나누어 총 24-set의 파라미터를 구하였다 즉, 압전구동기는 입력전압의 범위와 속도에 따라 각각 24-set의 파라미터가 선택되어진다.

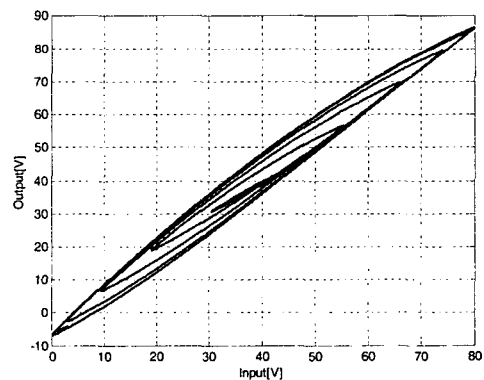


Fig. 1 Hysteresis loop w.r.t. sine inputs

2.2 크리프 모델링

크리프는 식 (2)와 같이 시간에 대한 로그함수로 모델링 할 수 있다.⁽¹¹⁾

$$\delta L(t) = \delta L_{t_0=0.1} (1 + \gamma \log(t/0.1)) \quad (2)$$

여기서 γ 는 크리프 파라미터이며 $\delta L_{t_0=0.1}$ 은 입력전압이 멈춘 후 0.1초 후의 변위량을 의미한다.

크리프 파라미터도 히스테리시스 파라미터와 같이 입력에 영향을 받으며⁽¹²⁾ 보다 정확한 모델링을 위하여 다음과 같이 압전구동기의 상승과 하강 구간에서 γ 를 각각 입력전압의 1차함수와 2차함수로 모델링하였다.

$$\text{상승시: } \gamma = \varepsilon_1 v + \varepsilon_2 \quad (3)$$

$$\text{하강시: } \gamma = \varepsilon_3 v^2 + \varepsilon_4 v + \varepsilon_5 \quad (4)$$

여기서 v 는 입력전압이며 ε_i ($i=1\sim 5$)는 상수이다.

히스테리시스와 크리프는 서로 독립적이므로 식 (1)와 식 (2)를 이용하여 히스테리시스와 크리프에 의한 비선형 변위에 대한 관계식을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$U = w + \delta L \quad (5)$$

여기서 U 은 비선형성으로 인한 변위이며 w 와 δL 은 각각 히스테리시스와 크리프로 인하여 발생하는 압전구동기에서의 변위이다.

2.3 2축 스테이지의 동적 모델링

압전구동기와 2축 나노 스테이지가 일체형이기 때문에 압전구동기의 변위가 탄성가이드를 따라 그대로 전달된다. 따라서 2축 스테이지를 다음과 같이 질량-스프링-댐퍼 시스템으로 모델링 할 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad y = Cx \quad (6)$$

여기서,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -k_x/M & -c_x/M & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -k_y/M & -c_y/M \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ k_x/M & c_1/M \\ 0 & 0 \\ c_2/M & k_x/M \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$x = [X \quad \dot{X} \quad Y \quad \dot{Y}]^T, \quad u = [U_x \quad U_y]^T$$

이며, m , k_x , k_y , c_x 와 c_y 는 각각 질량, x 축 스프링상수,

y 축 스프링상수, x 축 댐핑계수와 y 축 댐핑계수를 나타내며, X , Y , U_x 와 U_y 는 각각 스테이지의 X 축 변위, 스테이지의 Y 축 변위, x 축 압전구동기의 변위와 Y 축 압전구동기의 변위를 나타낸다. c_1 과 c_2 는 커플링 정도를 나타내는 축간 커플링 계수이다.

3. 시뮬레이션 툴 구축

3장에서는 상용 동역학 프로그램인 RecurDyn⁽¹⁵⁾을 이용하여 2축 나노 스테이지의 시뮬레이션 툴을 구축하고자 한다. RecurDyn으로 구성된 시뮬레이션 툴은 동역학적 지배방정식 없이 실제 스테이지와 거의 유사한 상세 모델링이 가능하다.

RecurDyn을 이용한 나노 스테이지의 시뮬레이션 툴 구축 과정은 크게 세 파트로 나뉜다. 첫째, 압전구동기 파트에서는 모델링된 압전구동기의 비선형적 거동이 RecurDyn에서 텍스트 기반으로 코딩이 가능한 user subroutine을 이용하여 코드화되었으며, 이 거동은 등가의 비선형 힘으로 변환되어 RecurDyn에서 구축된 2축 나노 구동 스테이지에 비선형 힘으로 전달된다. 둘째, 탄성 가이드 모델링은 ANSYS-RecurDyn Interface를 통해서 수행된다. 즉, 탄성 가이드 구조는 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용해서 힘과 변형 관계를 해석한 후에 진동 해석을 수행하여 추출된 진동 모드를 RecurDyn과의 인터페이스를 통해서 RecurDyn의 'Flexible Body'로 모델링 된다. 셋째, 스테이지의 바디 부분은 강체로 모델링하게 되며 RecurDyn의 'linkage' 모듈에 의해 탄성 가이드와 링크 구조로 연결된다.

3.1 유한요소해석을 통한 탄성 가이드 모델링

탄성 가이드는 스테이지의 움직임에 의한 하중을 받고, 이에 따라 탄성 변형을 일으켜 스테이지를 가이드한다. 이를 구현하기 위해 Fig. 2와 같이 얇은 판스프링 형태의 'ㄱ'자 형으로 모델링 하였다. 사각형 안의 진한 부분이 탄성 가이드로서 유한요소 해석을 통하여 모델링 되었다.

ANSYS를 이용하여 탄성 가이드를 모델링 하기 위하여 ANSYS의 'SHELL 63' 요소⁽¹⁴⁾를 이용하였다. SHELL 63 요소는 굽힘 특성과 막의 특성을 묘사할 수 있어서 탄성 가이드 같은 얇은 판을 모델링하기 적합한 요소이다. 얇은 판을 사각형 메쉬(mesh)로 나누고, 각각의 메쉬에 4개의 절점(node)을 생성한다. 각각의 절점은 두께 성분을 가지며 XY 평면의 Z축 방향 구부러짐과 비틀림 해석이 가능하다.

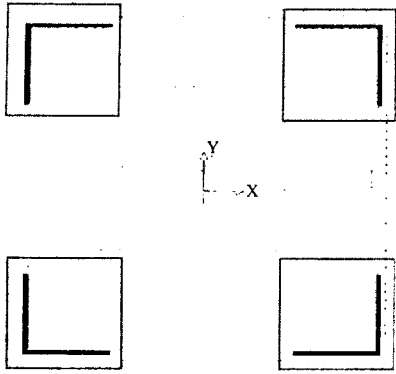


Fig. 2 Flexure guide model of XY stage

또한 진동 해석 결과를 RecurDyn에서 사용하기 위하여 ANSYS-RecurDyn Interface 방식을 이용하였으며 그 과정을 Fig. 3에서 간략히 나타내었다. 먼저, ANSYS에서 SHELL 63 요소를 사용하여 탄성 가이드의 형상을 모델링 한다. 이 요소에 메쉬를 생성한 후, 진동 해석을 통해 진동 모드를 추출한다. 이를 위하여 Fig. 2에서의 스테이지의 바깥쪽에 해당하는 부분은 X, Y, Z축의 자유도를 구속시켰으며 끝단은 XY 평면에서 변형을 일으키도록 Z 방향의 자유도를 구속하였다. 본 논문에서 Table 1의 물성치를 이용하여 탄성 가이드의 진동해석을 수행한 결과 1 Hz 부터 1000 kHz 사이에서 총 10 개의 진동모드가 추출되었다. 추출된 진동모드를 RecurDyn의 Flexible Body Import⁽¹⁵⁾에 전달하여 탄성 가이드의 역할을 대신할 Flexible Body를 생성한다. 생성된 Flexible Body는 강체로 모델링되는 스테이지의 바디와 링크 구조로 결합된다. 즉, 스테이지의 외측 바디는 ground와 접촉하고 있으며, 외측 스테이지의 안쪽과 내측 스테이지는 Flexible Body와 링크 결합되어 있다. 이러한 방법은 ANSYS에서 해석된 탄성 해석을 RecurDyn의 Flexible Body에서 사용할 수 있어서, 탄성 한계 내에서의 탄성 가이드의 움직임을 구현하게 된다.

3.2 RecurDyn 을 이용한 시뮬레이션 틀 구축

위의 모델링 과정을 기반으로 RecurDyn을 이용하여 XY 나노 스테이지에 관한 모델링을 수행하였으며 구축된 스테이지의 시뮬레이션 틀은 Fig. 4와 같다. 압전구동기의 비선형 변위는 등가의 힘으로 변환되어 스테이지의 X축과 Y축에 전달되며, 탄성 가이드 부분은 ANSYS에서 modal analysis를

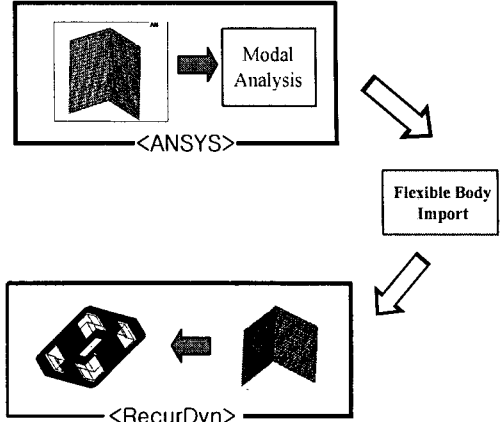


Fig. 3 Schematic diagram of the ANSYS-RecurDyn Interface

Table 1 Properties of the flexure guide

Material	STEEL
Young's Modulus	200 GPa
Poisson's ratio	0.33
Density	7850 kg/m ³

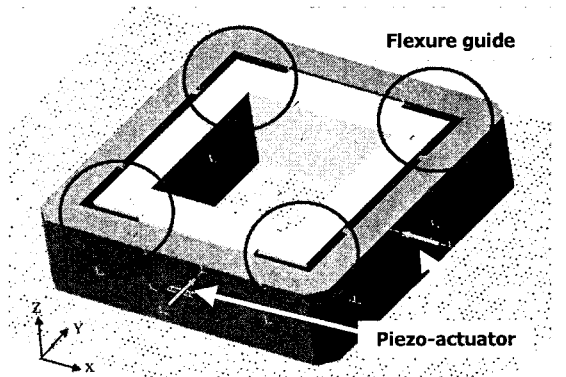


Fig. 4 RecurDyn Modeling of the XY Stage

통하여 얻어진 10개의 진동 모드로부터 RecurDyn의 Flexible Body로 모델링 되었으며, RecurDyn에 바디로 삽입되어 동적 하중에 의한 변형을 나타낼 수 있게 된다. 스테이지의 바디 부분은 2개의 강체로 모델링 되었으며 외측 스테이지의 내부와 내측 스테이지의 외부가 Flexible Body와 링크 결합되어 있다. 이렇게 구축된 틀은 실제 시스템에 근접한 상세 모델링이며 스테이지에서의 기구학적 변화를 손쉽게 고려할 수 있는 장점이 있다.

4. 실험 결과

4.1 실험장치 구성

실험장치는 Fig. 5와 같이 구성하였다. 2축 스테이지는 Physik Instrumente 사의 P-733 모델⁽¹¹⁾이며 X축과 Y축의 최대 거동은 각각 100 μ m이다. 변위 측정센서로는 스테이지에 부착되어있는 정전용량형 센서를 사용하였다. DAQ 카드로는 NI-6036E를 사용하였으며 최대 0~10V 사이의 전압 신호를 필요한 형상으로 프로그램 할 수 있다. 전압 증폭기는 Physik Instrumente⁽¹¹⁾ 사의 E-509 Control Module을 사용하였으며 입력 전압을 10배 증폭시켜 스테이지에 인가시켜준다. 즉, PC와 DAQ 카드를 이용해서 실험에 필요한 신호를 만들어 주고 압전구동기의 입력으로 사용할 수 있도록 전압 증폭기를 통해 전압을 증폭시켜 압전구동기에 입력을 주면 압전구동기가 변위를 일으키게 되고 이를 통해 스테이지도 같이 움직이게 된다.

4.2 실험 결과

2장과 3장에서 수행한 압전구동기의 모델링과 RecurDyn을 이용한 나노스테이지의 시뮬레이션 톨을 실험 데이터와의 비교를 통하여 검증하고자 한다.

4.2.1 압전구동기 모델링의 실험적 검증
실험값과의 비교를 통하여 압전구동기의 비선형 특성인 히스테리시스와 크리프에 대한 모델링을 검증하였다. 먼저, 압전구동기의 히스테리시스 모델을 위한 파라미터 24-set⁽¹⁷⁾를 Table 2와 3에 나타내었고, 식 (3)과 (4)의 크리프 2-set에 대한 파라미터를 다음과 같이 구하였다.

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= -1.8173 \times 10^{-4}, \epsilon_2 = 0.0262 \\ \epsilon_3 &= -5.0298 \times 10^{-6}, \epsilon_4 = 2.1244 \times 10^{-4} \\ \epsilon_5 &= 0.0123 \end{aligned}$$

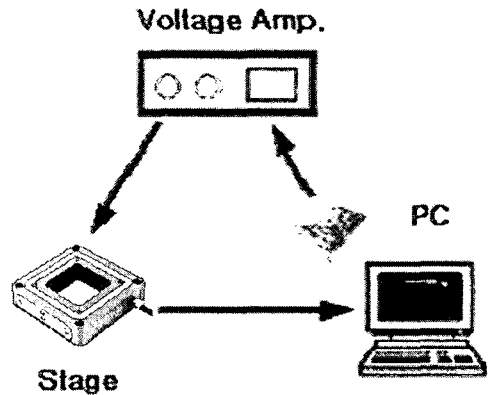


Fig. 5 Schematic diagram of the experimental system

Table 2 Hysteresis 24-set parameters for the X-axis piezo-actuator

전압[V]	0~20			20~40			40~60			60 이상		
	a [μ m/V]	b [μ m/V]	α [1/V]	a [μ m/V]	b [μ m/V]	α [1/V]	a [μ m/V]	b [μ m/V]	α [1/V]	a [μ m/V]	b [μ m/V]	α [1/V]
속도[V/s]												
0~20	0.160	0.120	0.034	0.095	0.083	0.020	0.105	0.068	0.030	0.104	0.060	0.030
20~40	0.162	0.120	0.030	0.099	0.080	0.018	0.100	0.068	0.060	0.105	0.068	0.025
40~60	0.130	0.120	0.050	0.091	0.067	0.074	0.104	0.070	0.035	0.107	0.065	0.040
60~80	0.140	0.100	0.030	0.094	0.065	0.065	0.102	0.065	0.050	0.106	0.066	0.035
80~100	0.082	0.065	0.110	0.094	0.068	0.050	0.101	0.068	0.036	0.105	0.066	0.036
100 이상	0.080	0.065	0.100	0.094	0.068	0.050	0.101	0.068	0.040	0.106	0.065	0.030

Table 3 Hysteresis 24-set parameters for the Y-axis piezo-actuator

전압[V]	0~20			20~40			40~60			60 이상		
	a [μ m/V]	b [μ m/V]	α [1/V]	a [μ m/V]	b [μ m/V]	α [1/V]	a [μ m/V]	b [μ m/V]	α [1/V]	a [μ m/V]	b [μ m/V]	α [1/V]
속도[V/s]												
0~20	0.090	0.060	0.040	0.097	0.070	0.050	0.095	0.065	0.045	0.095	0.069	0.038
20~40	0.012	0.115	0.035	0.096	0.069	0.050	0.092	0.070	0.040	0.100	0.068	0.033
40~60	0.147	0.120	0.150	0.093	0.068	0.070	0.102	0.068	0.040	0.090	0.067	0.030
60~80	0.152	0.067	0.100	0.946	0.067	0.060	0.103	0.068	0.045	0.106	0.068	0.037
80~100	0.155	0.115	0.120	0.095	0.067	0.060	0.103	0.069	0.035	0.106	0.067	0.033
100 이상	0.081	0.065	0.120	0.094	0.067	0.060	0.102	0.068	0.040	0.105	0.068	0.031

히스테리시스의 24-set 파라미터의 선정은 입력값의 범위와 변화율을 고려하여 실험에 의해서 결정된 값이며, 그 값의 선정은 히스테리시스의 루프에 대한 특성을 결정짓는 히스테리시스 루프의 기울기 (slope), 루프의 전환점 (turning points)과 히스테리시스의 양 (aperture)에 대한 정보로부터 선정된다.⁽⁹⁾ Table 2 and 3의 파라미터는 look-up table 방식에 의해서 업데이트되며, 영역 경계에서의 switching에 의한 출력에서의 jumping 현상이 무시할 정도로 작아서 편의상 이 방식을 택하였다. 크리프의 2-set 파라미터의 선정은 다양한 스텝 입력 실험을 수행하여 크리프 계수에 대한 커브 피팅 (curve fitting)을 통하여 식 (3)과 (4)의 계수를 선정하였다.

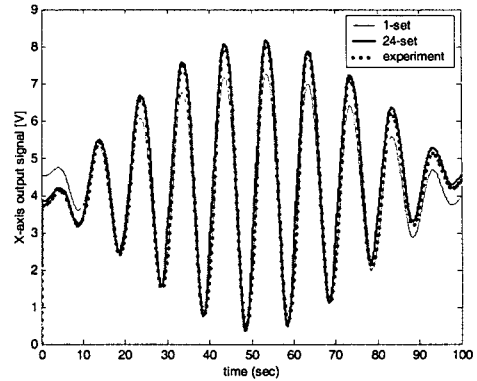
스테이지의 동적 모델링을 위하여 식 (6)의 모델을 이용하였다. MATLAB의 System Identification Toolbox⁽¹⁶⁾를 이용하여 실험 데이터와의 비교를 통하여 그 파라미터를 결정할 수 있으며, 본 논문에서는 스텝 입력에 의한 스테이지의 출력값을 이용하여 다음과 같이 파라미터를 결정하였다.

$$k_x/M = 5.471 \times 10^5, \quad c_x/M = 1480$$

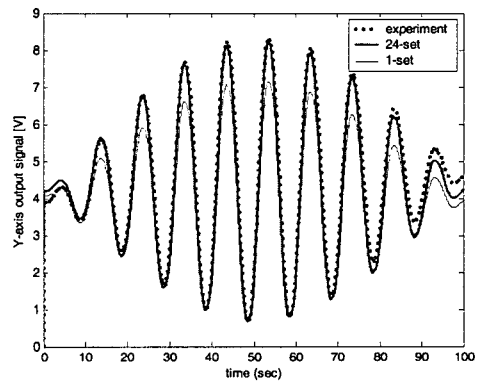
$$k_y/M = 3.146 \times 10^5, \quad c_y/M = 1229$$

또한, 커플링 계수인 c_1 과 c_2 는 실험을 통하여 파악한 스테이지의 커플링 정도에 따라 각각 k_x 와 k_y 의 1/150배의 값으로 결정하였다.

Fig. 6은 X축과 Y축의 압전구동기에 각각 맥놀이 형태의 입력전압을 인가했을 때 히스테리시스의 1-set과 24-set 파라미터의 모델링 결과를 비교한 그림이다. 입력은 10초와 200초 주기의 정현파의 곱에 의해 생성되었고, 출력 전압 1V는 1.2 μ m의 변위를 의미한다. 1-set 파라미터는 큰 거동으로 움직이는 경우의 데이터로부터 결정된 1개의 파라미터 set를 의미한다. 결과를 살펴보면 1-set 파라미터를 사용한 경우에 스테이지의 출력은 저영역에서는 거의 일치하지만 고영역에서는 실제값과 큰 차이를 보여주고 있음을 볼 수 있다. 그러나 24-set 파라미터를 가진 압전구동기 모델은 거의 모든 영역에서 실험값과 잘 일치함을 볼 수 있다. 즉, 24-set 파라미터를 가지는 모델링 방법이 실제에 가까운 거동을 보이는 것을 보여준다. 이는 고정된 파라미터를 이용한 압전구동기의 모델링은 실제와 다른 거동을 보여줄 수 있으며 본 논문에서 수행한 24-set 파라미터와 같이 각각의 영역과 속도에 따라 파라미터를 변경해 줄 필요가 있음을 보여주며 본 논문에서 제시하는 방법의 타당성을 뒷받침해 준다.



(a) X-axis displacement (1V = 1.2 μ m)

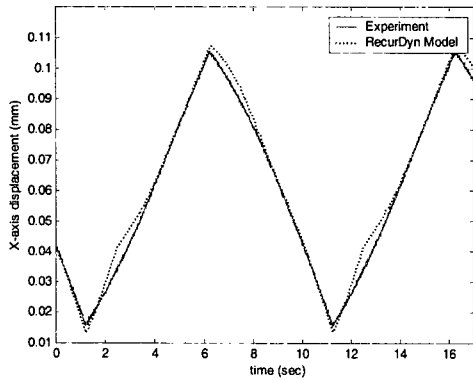


(b) Y-axis displacement (1V = 1.2 μ m)

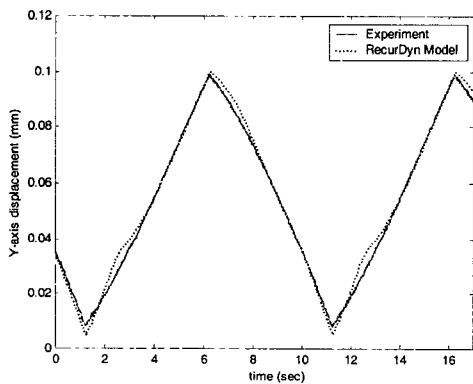
Fig. 6 Stage output w.r.t. pulsatory input

4.2.2 RecurDyn 시뮬레이션 틀의 실험적 검증

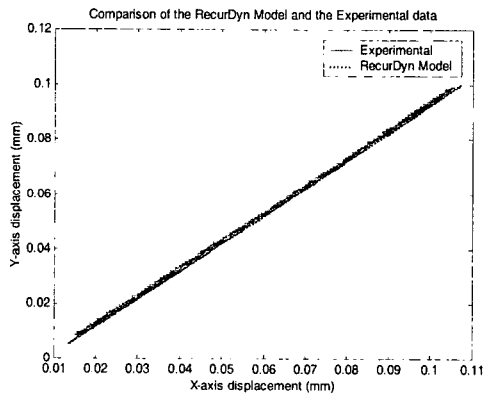
앞서 검증된 압전구동기 모델을 바탕으로 RecurDyn 모델과 실험값과의 비교를 통하여 시뮬레이션 틀의 타당성을 검증하고자 한다. 입력 전압이 0.1 Hz이며 크기가 8 V인 삼각파를 X축과 Y축에 동시에 인가한 경우에 대하여 실험값과 RecurDyn 모델에서의 출력값의 비교를 Fig. 7에서 수행하였다. 이 입력 전압은 증폭기를 통해 10배 증폭되어 압전구동기에 인가된다. Fig. 7을 살펴보면 RecurDyn으로 모델링된 시뮬레이션 틀이 X축의 거동과 Y축의 거동 및 XY 궤적에서 실제 스테이지와 거의 유사한 거동을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 따라서, 본 논문에서 구축한 RecurDyn을 이용한 2축 나노 스테이지의 시뮬레이션 틀의 타당성을 어느 정도 확인할 수 있으며, 향후 보다 다양한 환경에서의 실험적 검증 절차를 통하여 본 논문에서 제시하고 있는 시뮬레이션 틀의 타당성을 확인하고자 한다.



(a) X-axis displacement



(b) Y-axis displacement



(c) XY trajectory of 2-axis stage

Fig. 7 Comparison of the RecurDyn model and the experimental data

5. 결론

본 논문에서는 압전구동기로 구동되고 탄성 가이드에 의해 가이드되는 2축 나노 스테이지를 위

한 시뮬레이션 툴을 구축하였다. 압전구동기의 비선형성인 히스테리시스와 크리프를 보다 정확히 모델링 하기 위하여 입력 전압에 따른 24-set의 히스테리시스 파라미터와 상승과 하강에 따른 2-set의 크리프 파라미터를 구하였다. 상용 동역학 해석 프로그램인 RecurDyn과 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 탄성 가이드를 모델링하였고, 실험을 통하여 모델링의 타당성을 검증하였다. RecurDyn을 통한 모델링은 쉽게 다축 스테이지로 확장이 가능하며, ANSYS를 이용한 탄성 가이드의 모델링은 다양한 형태를 가지는 탄성 기구를 모델링하는데 있어서 보다 실제 시스템에 근접하게 그리고 용이하게 설계할 수 있다. 또한 본 논문에서 구축된 시뮬레이션 툴은 나노 스테이지에 적용될 제어기의 설계 및 검증을 위한 시뮬레이션에 응용될 수 있다.

후 기

본 논문은 한국전자통신연구원의 연구비 지원에 의한 결과입니다.

참고문헌

- (1) Muray, L. P., Spallas, J. P., Stebler, C., Lee, K., Mankos, M., Hsu, Y. and Gmur, M., 2000, "Advances in Arrayed Microcolumn Lithography," *J. of Vac. Sci. Technol.*, B, Vol. 18, No. 6, pp. 3099~3104.
- (2) Akeno, K., Ogasawara, M. and Tojo, T., 2002, "Mechanical System Construction for the EX-11 Electron Beam Mask Writer: A Solution for 100 nm Wafer Lithography," *J. Vac. Sci. Technol.*, B Vol. 20, No. 1, pp. 311~315.
- (3) Kunioka, T., Takeda, Y. and Matsuda, T., 1999, "XY Stage Driven by Ultrasonic Linear Motors for the Electron-Beam X-Ray Mask Writer EB-X3," *J. Vac. Sci. Technol.*, B Vol. 17, No. 6, pp. 2917~2920.
- (4) Hu, H. and Mrad, R. B., 2003, "On the Classical Preisach Model for Hysteresis in Piezoceramic Actuators," *Mechatronics*, Vol. 13, No. 2, pp. 85~94.
- (5) Ge, P. and Jouaneh, M., 1995, "Modeling Hysteresis in Piezoceramic Actuators," *Precision Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 211~221.
- (6) Goldfarb, M. and Celanovic, N., 1997, "Modeling Piezoelectric Stack Actuators for Control of Micromanipulation," *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 17, No. 3, pp. 69~79.
- (7) Krejci, P. and Kuhnen, K., 2001, "Inverse Control of Systems with Hysteresis and Creep," *IEE Proc. Control Theory Appl.*, Vol. 148, No. 3, pp. 185~192.
- (8) Adriaens, H. J. M. T. A., de Koning, W. L. and Banning, R., 2000, "Modeling Piezoelectric Actuators," *IEEE Trans. on Mechatronics*, Vol. 5, pp. 331~341.
- (9) Banning, R., et al., 2001, "State-Space Analysis and

- Identification for a Class of Hysteretic Systems,” *Automatica*, Vol. 37, pp. 1883~1892.
- (10) Jung, S.-B., Park, J.-H. and Kim, S.-W., 1994, “Nonlinear Modeling of Piezoelectric Actuators for Scanning Tunneling Microscopy,” *Transaction of the KSME A*, Vol. 18, No. 9, pp. 2272~2283.
- (11) *Micropositioning, Nanopositioning, Nanoautomation*, Physik Instrumente.
- (12) Jung, H. and Gweon, D.-G., 2000, “Creep Characteristics of Piezoelectric Actuators,” *Review of Scientific Instruments*, Vol. 71, No. 4, pp. 1896~1900.
- (13) Park, J., Jung, J., Huh, K. and Chung, C. C., 2003, “Dynamic Analysis of the Piezo-Actuator for a New Generation Lithography System,” *Transaction of the KSME (A)*, Vol. 27, No. 3, pp. 472~477.
- (14) Lawrence, K. L., 2002, *ANSYS Tutorial*, SDC Publications.
- (15) *RecurDyn User's Manual*, FunctionBay, Inc.
- (16) Ljung, L., 2000, *System Identification Toolbox User's Guide*, The MathWorks, Inc.
- (17) Yoo, G., 2003, *Development of a Nano-Stage Simulation Tool for the Advanced Lithography System*, Master's Thesis, Hanyang University, Seoul, Korea.