

차세대 리소그래피 시스템을 위한 압전구동기의 동적 해석

박재학*, 정종철*, 허건수†, 정정주**

(2002년 11월 18일 접수, 2003년 2월 4일 심사완료)

Dynamic Analysis of the Piezo-Actuator for a New Generation Lithography System

Jaehak Park, Jongchul Jung, Kunsoo Huh and Chung Choo Chung

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

Abstract

A piezo-actuator is an important component for an E-beam lithography system. But it is very difficult to model its characteristics due to nonlinearities such as hysteresis and creep, to the input voltage. In this paper, one-axis micro stage with a piezo-actuator is modeled including the nonlinear properties. Hysteresis and creep are modeled as the first order differential equation and a time-dependent logarithmic function, respectively. The dynamic motion of the stage is also modeled as a mass-spring-damper system and the parameters are determined by utilizing the system identification technique. The simulation tool for a micro stage is constructed using the commercial software and its simulation results are compared with the experimental data.

1. 서론

반도체의 집적도를 좌우하는 핵심 공정기술로서 노광기술의 발달은 반도체 회로 선폭의 미세화를 통해 초고집적 생산을 주도하고 있으며 그 중 현재 가장 각광받는 차세대 대체 기술 중의 하나가 전자빔(E-beam) 노광장치이다. 노광공정은 웨이퍼에 회로 패턴을 새기는 공정으로 전자빔 노광장치는 광원(light source)을 기존의 빛(optics) 대신에 전자빔으로 대체함으로써 빔의 크기를 줄여 패턴의 미세화를 가져올 수 있는 방식이다. 이러한 전자빔 노광장치는 초고진공의 환경이 필요하기 때문에 이러한 환경에서 구동할 수 있는 액츄에이터와 스테이지의 개발이 필수적이며 이 분야에서 폭넓은 연구가 진행되고 있다.

초정밀 리소그래피에 사용될 수 있는 스테이지

는 수십 나노의 분해능과 수 나노의 반복도 오차를 가지고 있어야 한다. 이를 구현하기 위해서 현재 탄성 힌지 가이드를 사용하는 스테이지들이 많이 개발되고 있는 추세이다. 이는 기존의 볼-스크류 등의 가이드 방식과는 달리 마찰이나 미끄럼이 전혀 없이 힌지의 탄성 변형을 이용하여 가이드하는 방식으로 백래쉬나 스틱 슬립 등의 문제를 만들지 않는 장점이 있다. 압전구동기는 빠른 반응 시간과 빠른 응답속도를 가지며 구동기에 가해지는 입력전압의 높은 분해능으로 서브나노급의 위치제어가 가능하다. 또한 전자빔 노광장치의 환경인 진공이나 클린룸에 적합한 특성을 가진다.

전자빔 노광장치를 위한 연구에서 Akeno⁽¹⁾ 등은 100 nm의 정확도를 가지는 웨이퍼의 전자빔 마스크 라이터(mask writer)를 위한 스테이지를 설계하였는데, 마찰 구동 타입의 구동장치를 이용하였다. 또한 Kunioka⁽²⁾ 등은 압전구동기로 구성된 울트라소닉(ultrasonic) 리니어 모터를 이용한 스테이지를 설계하였다. 그러나 이러한 단일 스테이지 타입의 구동장치로는 수 혹은 수십 nm의 초정밀 구동에 한계가 있다.

초정밀 위치 결정을 위해 압전구동기를 이용한

* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

** 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : khuh2@hanyang.ac.kr

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

마이크로 스테이지 혹은 이중구조의 스테이지 개발에 대한 연구도 진행되었다.^(3~5) 특히, Kim⁽⁴⁾ 등과 Kwon⁽⁵⁾ 등은 볼-스크류 타입의 글로벌 스테이지와 압전구동기와 탄성 힌지 가이드로 구성된 마이크로 스테이지의 이중구조 스테이지를 개발하였으며 이는 수 나노의 정밀도로 위치 제어가 가능하다. 그러나 보다 정확한 구동성능을 해석하기 위해서는 압전구동기의 비선형적인 특성이 고려되어야 한다. 그런데, 압전구동기는 특히 히스테리시스와 크리프 등의 비선형성이 상당히 강하기 때문에 이를 모델링하는데 어려움이 있다.

히스테리시스의 존재는 어떤 입력에 대하여 출력이 유일하지 않고 입력 히스토리에 의존한다는 의미이며, 크리프는 입력이 증가하지 않아도 시간이 지나면서 출력이 서서히 증가하는 특성으로 정의된다. 이러한 특성을 갖는 압전구동기에 대한 모델링에 많은 연구가 있었다.^(6~12) 널리 알려진 방법으로는 Preisach 모델을^(7,8) 들 수 있는데, 실험데이터로부터 수치적으로 계산된 함수를 적용하여 히스테리시스 특성을 모델링 하는 방법이며 비교적 정확하게 모델링 할 수 있는 장점을 있으나, 많은 실험데이터를 요구하며 하중의 변화에 민감하고 입력전압의 주파수에 제한이 있다는 단점이 있다. 다른 접근 방법은 히스테리시스 오퍼레이터를 정의하는 것이다.^(9,10) 이것은 임출력간의 매핑으로 히스테리시스 특성을 묘사하는 방법인데, 히스테리시스를 질량-스프링-마찰을 가진 기계시스템으로 모델링하는 방법으로 에너지 관점의 접근 방법이다. 이것은 압전구동기를 모델링할 때 선형/히스테리시스/크리프 오퍼레이터를 각각 정의할 수 있고 비선형 오퍼레이터들을 제거하기 위한 역제어기를 설계할 수 있는 장점이 있다. 이 방법은 다른 방법에 비해 상대적으로 간단하게 모델링 할 수 있으나 모델링 오차가 상대적으로 큰 단점이 있다. 또 다른 모델링 방법을 Adrianaens⁽¹¹⁾ 등과 Banning⁽¹²⁾ 등이 제시하였는데, 히스테리시스가 존재하는 시스템에서 임출력의 선형 계인과 비선형 계인을 각각 모델링 하였다. 즉, 시스템을 선형 부분과 비선형 부분으로 분리한 후 비선형 부분인 히스테리시스를 1차 비선형 미분방정식으로 모델링 하고 이를 선형 부분의 모델링과 결합하는 방식을 제안하였다. 그러나 압전구동기의 모델링에서 히스테리시스만을 모델링 함으로써 크리프로 인한 영향을 제외한 단점이 있다.

본 논문에서는 전자빔 노광장치를 구성하는 압전구동기로 구동되는 마이크로 스테이지를 모델링하고자 하며 히스테리시스와 크리프의 특성을 모두 포함하여 보다 정확한 모델링을 수행하였다.

히스테리시스는 Banning⁽¹²⁾ 등이 모델링한 1차 미분방정식을 이용하였고 크리프의 영향을 추가하여 보다 정확한 비선형 특성이 구현되도록 하였다. 스테이지는 질량-스프링-댐퍼 시스템으로 모델링 하였다. 실험데이터를 이용하여 모델링의 파라미터들을 결정하였으며 이러한 모델링을 바탕으로 1축 마이크로 스테이지를 모델링 하였다. 또한 상용 동역학 해석 프로그램인 RecurDyn⁽¹³⁾을 이용하여 마이크로 스테이지의 시뮬레이션 툴을 구축하였고, 실험 결과와 비교하였으며 제시한 모델링의 타당성을 확인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 압전구동기의 히스테리시스와 크리프를 모델링하였고, 압전구동기와 연결된 스테이지를 모델링 하였다. 3장에서는 RecurDyn을 통해 시뮬레이션 툴을 구축하였으며, 4장에서 실험을 통하여 모델링의 타당성을 검증하였다. 그리고 5장에서 결론을 맺었다.

2. 압전구동기의 모델링

2.1 히스테리시스 모델링

압전구동기는 히스테리시스와 크리프로 인하여 비선형 특성이 크게 나타나므로 이에 대한 고려가 필수적이다. Banning⁽¹²⁾ 등은 히스테리시스를 다음의 1차 미분방정식으로 모델링하였다.

$$\dot{w}(t) = f(v(t), w(t))\dot{v}(t) + g(v(t), w(t))\dot{v}(t) \quad (1)$$

여기서 $w(t)$ 는 히스테리시스로 인한 변위이며, $v(t)$ 는 입력전압이다. 함수 f 에서 $w(t)$ 가 분리될 수 있고 g 는 $w(t)$ 에 일정하다고 가정하면 식 (1)은 다음의 관계를 만족한다.

$$\dot{w}(t) = -aw(t)\dot{v}(t) + \alpha \dot{v}(t) f(v(t)) + \dot{v}(t)g(v(t)) \quad (2)$$

여기서 $\alpha > 0$ 이다. 또한 저주파수의 입력신호에서는 $f(v)$ 가 v 에 비례하고 $g(v)$ 가 v 에 일정하므로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} f(v(t)) &= av(t) \\ g(v(t)) &= b \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $0 < 0.5a \leq b < a$ 의 관계가 있으며 식 (3)을 식 (2)에 대입하면 다음과 같다.

$$\dot{w}(t) = -aw(t)\dot{v}(t) + aav(t)\dot{v}(t) + b\dot{v}(t) \quad (4)$$

2.2 크리프 모델링

크리프는 입력이 증가하지 않는 상태에서도 시간에 따라 변위의 증가하는 특성을 의미하며 다음

과 같이 시간에 대한 로그함수로 모델링 할 수 있다.⁽¹⁴⁾

$$\delta L(t) = \delta L_{t_0=0.1}(1 + \gamma \log(t/0.1)) \quad (5)$$

여기서 γ 는 크리프 요소로서 압전구동기의 특성치이며 $\delta L_{t_0=0.1}$ 은 입력전압의 입력이 끝난 후 0.1초 후의 변위량을 의미한다.

히스테리시스와 크리프는 서로 독립적이므로 식 (4)와 식 (5)를 이용하여 히스테리시스와 크리프에 의한 비선형 변위에 대한 관계식을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$y_{NL} = w + \delta L \quad (6)$$

여기서 y_{NL} 은 비선형성으로 인한 변위이며 w 와 δL 은 각각 히스테리시스와 크리프로 인하여 발생하는 압전구동기에서의 변위이다.

2.3 1축 스테이지 모델링

압전구동기와 마이크로 스테이지가 일체형이기 때문에 압전구동기의 변위가 탄성힌지를 따라 그대로 전달된다. 따라서 1축 스테이지의 모델링은 다음의 질량-스프링-댐퍼의 2차 시스템으로 모델링 할 수 있다. 이때, 입력은 압전구동기의 히스테리시스와 크리프에 의한 변위(y_{NL})이며 여기에 스프링상수를 곱하면 힘이 된다. 출력은 스테이지의 변위이다. 그러므로, 스테이지의 상태방정식을 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_L &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k/m & -c/m \end{bmatrix} x_L + \begin{bmatrix} 0 \\ k/m \end{bmatrix} u \\ y &= [1 \ 0] x_L \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 m , k 와 c 는 각각 질량, 스프링상수, 댐핑계수이며, 입력은 스테이지에 가해지는 압전구동기의 변위이고 출력은 스테이지의 변위이다.

3. 시뮬레이션 툴 구축

3장에서는 상용 동역학 프로그램인 RecurDyn을 이용하여 마이크로 스테이지의 동적 해석을 수행하였으며, 이를 이용하여 시뮬레이션 툴을 구축하였다. RecurDyn으로 구성된 시뮬레이션 툴은 동역학적 지배방정식 없이 링크 구조로 연결되어 있으며 실제 스테이지와 거의 유사한 상세 모델링이 가능하다. RecurDyn을 통한 모델링의 장점은 스테이지 구성의 변화에 따른 동역학적 특성 변화를 쉽게 확인할 수 있다는 것이다. 특히, 다축 운동이 가능한 위치 제어시스템을 설계하는 경우, 압전구

동기의 위치, 스테이지의 평상 그리고 힌지 가이드의 위치 및 물성을 변화시킬 경우에도, 전체 시스템의 지배방정식을 유도하지 않고, RecurDyn 모델의 기하학적 특성만을 변화시켜 동적 응답을 확인할 수 있어서 설계 시간을 단축할 수 있다. 또한 마이크로 스테이지를 하나의 모듈로 생성시켜 MATLAB과의 상호 인터페이스를 가능하게 한다.

MATLAB-RecurDyn 인터페이스이란 MATLAB의 SIMULINK에서 설계된 제어기와 RecurDyn에서 모델링된 플랜트 사이에서의 상호 정보가 교환되면서 동시에 시뮬레이션 되게 하는 기술이다. 이 기술은 플랜트의 모델링이 이루어진 후, 이에 적용될 제어기의 설계 및 검증을 위한 시뮬레이션에 응용될 수 있다.

3.1 마이크로 스테이지 모델링

RecurDyn을 이용한 마이크로 스테이지의 동역학 해석의 구조는 Fig. 1과 같다. 마이크로 스테이지의 구동원인 압전구동기에 입력전압 신호를 가하면 히스테리시스와 크리프의 영향이 고려되어 압전구동기를 통해서 힘으로 변환한다. 그러면 Micro Stage 블록에 이 비선형 힘이 가해진다. RecurDyn을 이용하여 비선형 힘을 입력으로하는 마이크로 스테이지의 동적 특성 해석을 수행한다. 그러면 최종 출력에 압전구동기의 특성인 히스테리시스와 크리프의 영향이 나타나게된다.

3.2 시뮬레이션 툴 구축

RecurDyn을 이용하여 마이크로 스테이지의 동역학적 해석을 위한 시뮬레이션 툴을 구축하고자 한다. RecurDyn 모델은 크게 바디(Body part), 구속조인트(Constraint joint)와 힘 요소(Force elements)로 구성될 수 있다. 바디는 강체들로 구성하였으며 구속조인트는 탄성 힌지 가이드의 모델링을 위해 회전조인트와 병진조인트로 구성하였다. 즉, 힌지의 각 변위에 비례하는 토크를 발생시켜 이 힘을 통해 스테이지의 움직임을 구현하기 위해 회전 조인트에 회전스프링을 부착하여 힌지의 각 변위에 따른 굽힘 모멘트를 구현하였다. 또한 탄성 힌지의 축 방향 변위를 나타내기 위해 병진조인트를 사용하였으며 이로인해 각각의 힌지 가이드가 회전과 축방향의 2자유도 운동이 가능하도록 구현하였다. 힘 요소는 히스테리시스와 크리프로 인하여 발생하는 변위를 고려한 함수를 생성하여 스테이지에 입력으로 전환하였다. 이를 바탕으로 RecurDyn을 이용한 마이크로 스테이지의 시뮬레이션 툴을 Fig. 2와 같이 구축하였다.

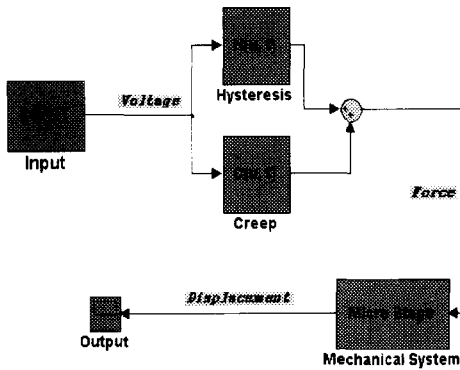


Fig. 1 Schematic diagram of the positioning stage

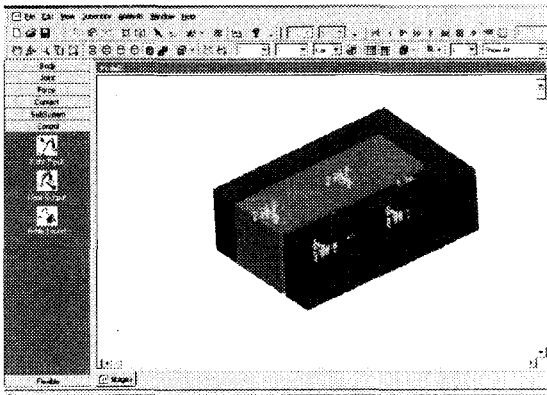


Fig. 2 RecurDyn modeling of the micro stage

4. 실험

4.1 실험 장치 구성

실험 장치의 구성은 Fig. 3과 같다. 압전구동기와 스테이지는 Physik Instrumente 사의 P-753.11C를 사용하였다.⁽¹⁴⁾ P-753.11C는 최대 12 μm 의 변위를 발생시킬 수 있고, 2 nm 정도의 반복도 오차를 가지고 있다. 스테이지의 변위 측정센서로는 스테이지에 부착되어있는 정전용량형 센서를 사용하였다. DAQ 카드로는 NI-6036E를 사용하였으며 최대 0~12 V 사이의 전압 신호를 필요한 형상으로 프로그램 할 수 있다. 전압 증폭기는 Physik Instrumente 사의 E-509 Control Module을 사용하였다.

시스템의 구동 방식은 다음과 같다. PC와 DAQ 카드를 이용해서 입력 신호를 만들고 전압 증폭기를 통해 10배 증폭시켜 압전구동기에 입력을 주면 압전구동기가 변위를 일으키게 되고 이를 통하여 스테이지도 같이 운동을 하게 된다.

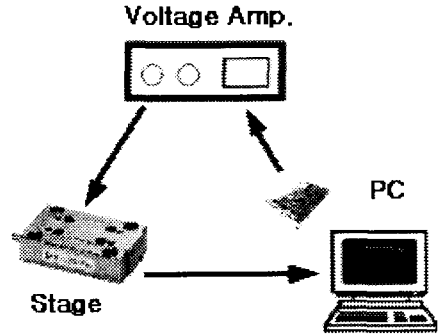


Fig. 3 Schematic diagram of the experiment system

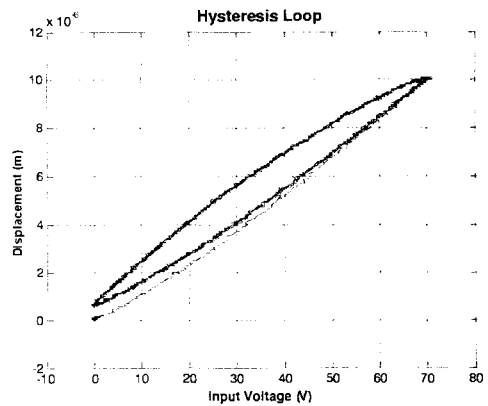


Fig. 4 Hysteresis loop by sine input

4.2 실험 결과

2장에서 수행한 모델링 과정을 통해 압전구동기와 스테이지의 설계 파라미터를 선정하였다. 이 파라미터 값을 얻기 위해서 실험 데이터와 비교하였으며, 시스템 식별 과정을 거쳐 파라미터 값을 결정하였다. 이를 위해서 MATLAB의 System Identification Toolbox⁽¹⁵⁾를 사용하였다. 또한, RecurDyn으로 구축된 시뮬레이션 틀을 이용하여 모델링을 검증하였으며, 실험값과도 비교하였다.

4.2.1 히스테리시스와 크리프의 파라미터 식별

압전구동기의 히스테리시스의 특성을 확인해 보기 위해서 10 Hz의 sine파의 입력을 실험 장치에 가하였다. 그 결과인 입출력의 그래프를 Fig. 4에 나타내었으며 약 17%의 히스테리시스 특성을 가지는 것을 볼 수 있다.

히스테리시스 파라미터는 Fig. 4에 나타나는 루프의 기하학적 특성에서 구할 수 있다.⁽¹²⁾ 식 (4)에 제시되어 있는 히스테리시스 모델에서 파라미터 a 는 루프의 중심점의 변화에 의해서 구해질 수 있다. b 는 sine파의 입력 진폭이 크지 않을 경우 큰

사적으로 히스테리시스 루프의 기울기를 의미한다. 또한 α 는 루프의 내부 면적에 비례해서 구하는 것이 가능하다. 따라서 Fig. 4의 히스테리시스 루프로부터 다음과 같은 파라미터 값을 구하였다.

$$\alpha = 0.023 \text{ (V}^{-1}\text{)}$$

$$a = 165.02 \text{ (nm/V)}$$

$$b = 133.67 \text{ (nm/V)}$$

Fig. 5는 스텝 입력에 따른 압전구동기의 크리프 특성을 보여 준다. 스텝 입력 후 변위가 계속적으로 증가하는 것을 볼 수 있으며 $\Delta L(t)$ 가 크리프의 양이다. 식 (5)와 Fig. 5의 데이터를 이용하여 다음과 같이 크리프 파라미터 γ 를 구할 수 있다.

$$\gamma = 0.019$$

4.2.2 스테이지 파라미터 식별

스테이지는 2장에서 언급한 것처럼 질량-댐퍼-스프링의 2차 선형 시스템으로 모델링을 하였고, 스텝 입력에 대한 스테이지의 응답 곡선으로부터 MATLAB의 System Identification Toolbox를 이용하여 다음과 같이 파라미터 값을 구할 수 있다.

$$m = 0.045 \text{ (kg)}$$

$$b = 172.8 \times 10^3 \text{ (N} \cdot \text{s/m)}$$

$$k = 16.587 \times 10^6 \text{ (N/m)}$$

4.2.3 계단형 입력에 대한 실험 결과

계단형 입력에 대해 스테이지의 변위를 확인해 보았다. Fig. 6은 입력 전압이며 Fig. 7은 이에 대한 스테이지의 출력 변위를 보여준다. 결과를 보면 입력의 증가량은 일정하지만 출력의 증가량은 일정하지 않은 것을 볼 수 있었다. 또한 입력이 증가하는 경우와 감소하는 경우를 비교하면, 출력에서 서로 상이한 결과가 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 압전구동기의 비선형적 특성을 명확하게 보여주고 있다. Fig. 6의 입력에 대해 앞에서 구한 파라미터를 이용한 MATLAB 시뮬레이션과 실험 데이터가 Fig. 8에서 비교되었다. 이를 비교해보면 시뮬레이션이 실험값과 거의 유사한 거동을 보이는 것을 볼 수 있으며 총 10 μm 의 스트로크를 구동할 때 최대 0.3 μm 의 오차가 발생하였다. RecurDyn으로 구축한 시뮬레이션 툴의 출력과 실험값이 Fig. 9에서 비교 되었다. 총 10 μm 의 스트로크에서 최대 0.34 μm 의 오차가 발생하였다. Fig. 8과 Fig. 9를 비교해보면 MATLAB과 RecurDyn 모델의 시뮬레이션 결과에서 차이를 보이고 있는데 그 이유는 적분기 등의 차이로 인한 수치적 오차와 모델링 과정의 차이에서 오는 오차로 보여진다.

또한, 실험값과의 오차 발생의 원인은 전압 증폭기 등의 모델링 되지 않은 부분으로 인한 오차로 추정된다. 위의 결과를 보면 스테이지의 시뮬레이션 툴이 어느 정도 타당하게 설계되었지만 보다 정확한 시뮬레이션 툴을 위해서는 모델링 되지 않은 부분의 상세 모델링의 필요성이 요구된다.

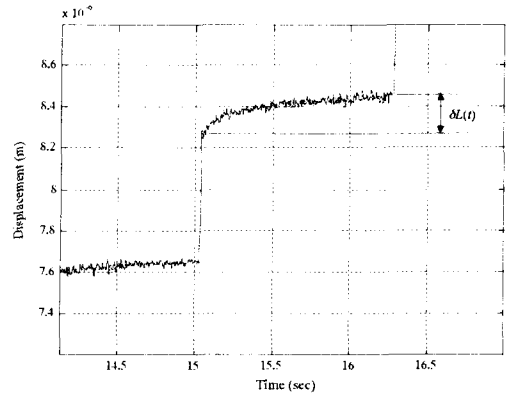


Fig. 5 The stair response which represents a creep

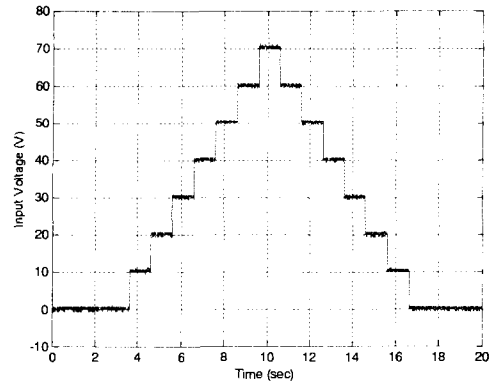


Fig. 6 The stair input

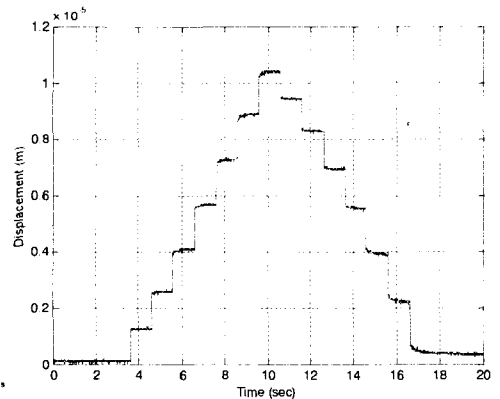


Fig. 7 The response with respect to stair input

후기

본 논문은 한국전자통신연구원의 연구비 지원에 의한 결과입니다.

참고문헌

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) Kim, K. C., Kim, S. H. and Kwak, Y. K., 1998, "Development of a 6 Degrees-of-Freedom Micro Stage for Ultra Precision Positioning," *Trans. of the KSME*, A, Vol. 22, No. 2, pp. 372~379.
- (4) Kim, J. Y., et al., 2002, "Computer Simulation and Control Performance Evaluation for Feedback System of Ultra Positioning by using Laser Interferometer," *Trans. of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 11, No. 1, pp. 17~25.
- (5) Kwon, S., Chung, W. K. and Youm, Y., 2001, "On the Coarse/Fine Dual-Stage Manipulators with Robust Perturbation Compensator," *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 121~126.
- (6) Kim, B. J., Kim, S. H. and Kwak, Y. K., 2000, "Piezoelectric Beam Rotating Actuator for Multiple Beam Disk Drives," *J. of the KSPE*, Vol. 17, No. 5, pp. 154~159.
- (7) 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.
- (8) Ge, P. and Jouanch, M., 1995, "Modeling Hysteresis in Piezoceramic Actuators," *Precision Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 211~221.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) Banning, R., et al., 2001, "State-Space Analysis and Identification for a Class of Hysteretic Systems," *Automatica*, Vol. 37, pp. 1883~1892.
- (13) *RecurDyn User's Manual*, FunctionBay, Inc..
- (14) *Micropositioning, Nanopositioning, Nanoautomation*, Physik Instrumente.
- (15) L. Ljung, 2000, *System Identification Toolbox User's Guide*, The MathWorks, Inc..

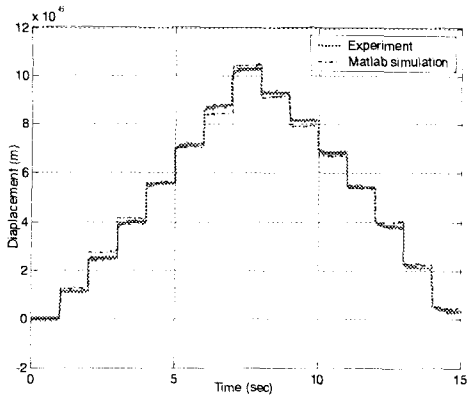


Fig. 8 Comparison of the simulation and the experiment

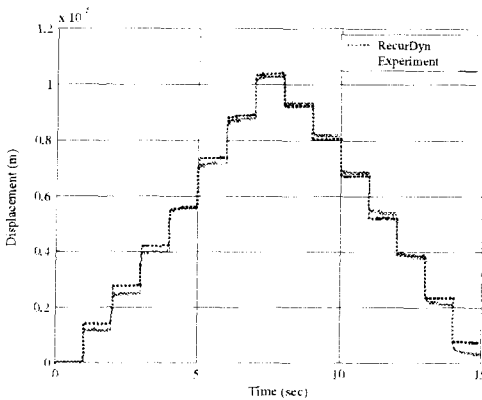


Fig. 9 Comparison of the RecurDyn model and the experiment

5. 결론

전자빔 노광장치를 위해 수십 nm의 위치 정밀도를 갖는 마이크로 스테이지의 모델링을 수행하였다. 마이크로 스테이지는 압전구동기와 탄성힌지 가이드에 의해 구동되며 히스테리시스나 크리프 같은 비선형성이 강하게 나타나므로 보다 정확한 모델링이 필요하다. 본 논문에서는 히스테리시스는 1차 비선형 비분방정식으로 크리프는 시간에 의존하는 로그 함수로 모델링 하였으며 실험을 통해 그 파라미터를 결정하였다. 상용 동역학 해석 프로그램인 RecurDyn을 이용하여 마이크로 스테이지를 위한 시뮬레이션 툴을 구축하였으며, 실험을 통하여 시뮬레이션 툴의 타당성을 검증하였다. RecurDyn을 통한 모델링은 쉽게 다축 스테이지로 확장이 가능하며, 이에 적용될 제어기의 설계 및 검증에 응용될 수 있다.