진동 실험을 바탕으로 한 정렬 스테이지 등가 모델링

Equivalent Modeling of an Alignment Stage Based on the Vibration Tests

임 홍 재*, 이 정 석**, 이 성 훈**, 정 재 일†

Hong Jae Yim, Jung Suk Lee, Sung Hoon Lee and Jay I. Jeong

(2009년 12월 1일 접수 ; 2010년 3월 19일 심사완료)

Key Words : Equivalent Modeling(등가 모델링), Vibration Test(진동 실험)

ABSTRACT

In this study, a modeling process of a 3-axis planar alignment stage is suggested. Vibration tests using a laser vibro-meter is performed to find the modeling parameters of the stage. By analyzing the result of the test, the stiffness of prismatic joints and revolute joints, as well as the contact conditions of the thrust bearings, can be calculated. The modeling of the stage was validated by comparing six normal mode shapes, which are acquired from experiments and simulations.

1. 서 론

최근들어 반도체, 초정밀 가공, 정보기기 분야의 발달로 인하여 1미크론 미만의 위치 정밀도를 가지는 초정밀 위치 결정기구의 요구가 급격히 증가하고 있으며, 미세한 부위의 고정밀도 작업에 대한 필요성이 대두되고 있다.

나노급 반도체 생산에 이용되는 스테이지 장비의 경우, 패터닝이 이루어지는 상/하판 사이의 정확한 정렬(alignment)을 위해 더욱 정밀하고 신뢰성이 높은 스테이지 기구시스템 개발이 절실하다^(1,5). UV 나노임프린트 리소그래피 공정에서는 스테이지의 정렬 및 레진의 경화 과정에서 몰드와 기관 사이에서 힘이 발생하여 스테이지의 변위가 발생한다⁽²⁾. 이때, 정밀한 위치 제어 공정을 위해 이러한 스테이지의 외력에 의한 변위를 억제하여야 하며, 변위를

발생시키는 힘에 대한 연구가 필요하다. 따라서, 이와 같은 변위와 외력사이의 관계에 관한 모델링 및 실험은 정확한 스테이지의 모델을 구성하는데 필수적인 요소이다.

이전 연구로 스테이지의 스크류 조인트의 강성을 측정하고, 그에 따른 등가 스테이지 모델링을 하는 연구가 진행되었다^(3,4). 앞선 연구에 이어 이번 연구에서는 레이저 바이브로미터를 이용한 스테이지의 진동 실험을 통하여 스테이지의 이동 결합부의 상하 방향의 강성을 모델링하는 것을 목적으로 하였다. 레이저 바이브로미터를 이용한 진동실험으로부터 얻어진 주요 정규모드 형태(normal mode shape)와 특성 주파수의 데이터를 바탕으로 상용 다물체동역학 프로그램을 이용하여 스테이지의 동적 특성을 분석하기 위한 모델을 만들었으며, 실험값과 해석값을 비교하여 가상 모델의 신뢰성을 검증하였다.

2. 스테이지 진동실험

2.1 실험 환경

진동 실험은 측정을 하려는 대상에 일정 영역의 가진을 가하고 그 가진에 따른 진동 특성을 측정하는 것이다. 따라서 이 연구에서 다루는 결합부의 z방

† 교신저자; 정회원, 국민대학교 기계자동차공학부
E-mail : jayjeong@kookmin.ac.kr
Tel : (02) 910-4419

* 정회원, 국민대학교 기계자동차공학부

** 국민대학교 자동차공학 전문대학원

이 논문은 2009 추계 소음진동 학술대회에서 우수논문으로 추천되었음.

향 강성을 측정하기 위하여 상판의 z축 변위를 측정할 필요가 있으며, 이를 위하여 z축으로 가진을 가하고 레이저 바이브로미터를 이용하여 같은 방향 변위를 측정하여야 한다.

그러나, 다른 방향으로 가진을 주는 경우에도 주요방향의 진동모드 측정이 가능하며, 이 연구에서는 기 설치되어 프레임에 구축되어 있는 스테이지를 고려하여 y축 방향으로 가진을 주고, 관련 응답을 측정하였다.

Fig. 1은 3축스테이지의 진동실험 모습이다. 스테이지의 상단에 설치한 레이저 바이브로미터를 이용하여 상판의 41점의 위치를 측정하였다. 여기에서 스테이지 상판위에서 변위를 나타내는 흰색의 노드 점들이 각 측정점이다. 스테이지의 좌측에서 스테이지의 상판에 가진을 주었다. 한 곳당 5번을 측정하여 평균을 내는 방식으로 측정하였다. 이때의 가진 주파수 대역폭은 0~2000 Hz이었다. 이때의 실험 장비는 폴리텍의 PSV-400 레이저 바이브로 미터이며, 가진기는 MB 다이나 믹스의 모달 50A 익스াই터를 사용하여 실험을 진행하였다.

2.2 실험 결과

Fig. 2는 3축 스테이지의 주파수 응답 실험 결과를

Fig. 1 Vibration test about a 3-axis stage

(a) 13.75 Hz

(b) 61.25 Hz

(c) 108.75 Hz

Fig. 3 Rigid mode shapes of 3-axis stage

Fig. 2 Frequency response of a vibration test

하며 547.5 Hz에서 비틀림 형상을 뚜렷하게 보인다. 767.5 Hz에서 작게 응답이 커지고, 951.3 Hz에서 응답이 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 897.5 Hz에서 응답이 분리 되는 것을 볼 수 있지만 뚜렷한 모드를 나타내지는 않는다.

Fig. 3은 강체 모드중 앞에서 3개의 모드 형상과 주파수를 표시하였다. 13.7 Hz에서 위아래로 움직이는 모드 형상이 나타나고, 61.25 Hz에서 좌·우로 기울어지는 모드가 108.75 Hz에서 전·후로 기울어지는 모드가 나타났다.

Fig. 4는 유연체 모드에서 뚜렷하게 나타나는 3개의 모드 형상과 주파수를 표시하였다. 547.5 Hz에서 비틀림 모드가 나타나고, 767.5 Hz와 951.3 Hz에서 굽힘 모드가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

(a) 547.5 Hz

(b) 767.5 Hz

(c) 951.3 Hz

Fig. 4 Flexible mode shapes of 3-axis stage

3. 등가 스테이지 모델링

3.1 스테이지 모델링

스테이지 모델링은 CAD Tool을 이용하여 모델링 하였다. 실제 모델과 흡사하게 만들기 위해 노력하였고 외형 치수는 설계 도면과 측정을 통하여 결정되었다.

Fig. 5는 3D CAD Tool을 이용하여 만든 스테이지의 모습이다. 스테이지는 상판과 베어링, 모터, 트랜슬레이터, 로터 등으로 구성되어 있으며, 3개의 구동기가 스테이지의 외각에 위치하고 있다. 스테이지

Fig. 5 3-axis stage model

Fig. 6 Spring and joint of a 3-axis stage model

Fig. 7 FEM model of upper plate

중량부에 설치되어 있는 스러스트 베어링에 의해서 상판이 지지되고 있다. 시뮬레이션을 위한 프로그램은 MSC ADAMS를 이용하였으며, 실제 움직임을 구현할 수 있도록 모델링 하였다.

Fig. 8 3-axis stage model

유연체 모드에서의 모드 형상을 보기 위하여 어퍼 플레이트를 유연체 모델로 만들어 스테이지에 적용 시켰었다. 다른 부품들은 강체로 설정하였다.

스테이지를 이루고 있는 모터 및 각 조인트들은 각각의 강성을 가지고 있다. 또한, 주요부품의 형상에 따라 접합하는 플레이트 사이의 구속조건 또한 달라지게 된다. 이 연구에서는 어퍼플레이트를 제외한 다른 부품들은 강체로 모델링되었기 때문에 그 각각의 강성을 확인할 수 없으므로 실험값을 바탕으로 하는 등가강성모델을 사용하였다.

Fig. 6은 3축 스테이지의 조인트들과 등가 스프링을 나타낸 것이다. 이전 연구에서 정렬 스테이지에 정적 하중을 가하여 스테이지에 발생하는 변위를

(a) 13.72 Hz

(b) 68.38 Hz

(c) 96.17 Hz

Fig. 9 Rigid mode shape of 3-axis stage

(a) 561.99 Hz

(b) 740.64 Hz

(c) 903.40 Hz

Fig. 10 Flexible mode shape of 3-axis stage

측정하고 이를 시뮬레이션하여 트랜슬레이터의 스크류 조인트의 축방향 강성을 알아내었다⁽³⁾, 그 연구를 바탕으로 트랜슬레이터의 스크류 조인트 대신 스프링으로 모델링을 하였다. 각 모드의 형상이 나타나도록 하기 위해 로터와 상판 사이에 병진운동과 회전운동이 가능하도록 하기 위해서 원통형 조인트(cylindrical joint)를 설치하고 회전운동을 조절하기 위해 토션 스프링을 설치하였다. 마지막으로 트랜슬레이터와 로터 사이에 회전 운동뿐만 아니라 수직축으로 병진운동도 일어날 수 있게 하기 위해 실린더리얼 조인트를 설치하고 병진운동을 조절하기 위한 스프링을 설치하였다.

Fig. 7은 어퍼 플레이트의 유한요소 모델을 나타낸 것이며, 이때 요소의 크기는 5 mm이고 요소의 수는 26,989개이다. 물성치는 강철의 물성치를 사용하였다.

Fig. 8은 조인트 강성 및 유연체 모델을 적용한 동역학 해석용 모델이다. 이때, 상판의 스러스트 베어링과 하판의 접촉부에는 접촉 조건을 주었다.

3.2 모델링 검증

3축 스테이지 모델링의 검증을 위해서 레이저 마이크로 미터를 통한 실험값과 비교를 해보았다. 실험값과 해석값의 비교로는 강체 모드의 3가지 모드와 유연체 모드의 3가지 모드를 선정하였다.

Fig. 9는 강체 모드를 보이는 해석결과를 나타낸 그림이다. 시뮬레이션을 통하여 결정되어진 매개변수를 사용한 경우 13.72 Hz에서 위, 아래로 움직이는 모드가 나타났다. 68.38 Hz에서 좌, 우로 기울어지는 모드가 나타나고, 96.17 Hz에서 전, 후로 기울어지는 모드가 나타났다.

Fig. 10은 유연체 모드에서 뚜렷하게 나타나는 3개의 모드 형상과 주파수를 표시한 것이다. 561.99 Hz에서 비틀림 모드가 나타났다. 740.6 Hz와 903.4 Hz에서 굽힘 모드가 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 실험값과 같은 모드 형상이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Table 1은 실험값과 해석값을 비교한 것을 나타낸 것으로 강체모드에서 위아래로 움직이는 모드의 경우 0.22 %의 오차가 발생하고, 전·후·좌·우로 기울어지는 모드의 경우 약 12 %정도의 오차가 발생하였다. 이는 중앙의 스러스트 베어링 모델링의 개선이 이루어지면 줄어든 것으로 예상된다. 유연체 모드에선 실험과 같은 모드 형상과 오차는 2.6 %에서 5 %가 발생하며 이는 상당히 유사한 결과 값이다. 전체적으로 오차가 발생하지만 그 범위가 크지 않고 모드 형상 또한 흡사한 형태를 보여주기 때문에 등가모델의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

이 연구에서는 3축 스테이지의 진동 실험과 그 결과를 바탕으로 등가 스테이지 모델을 만들었다. 실제 나노 임프린트에 사용되는 정렬스테이지의 진동 특성을 파악하고 3D 가상 모델의 진동 특성을 해석한 실험값과 해석값을 비교하여 가상모델의 신뢰성을 검증하였다.

오차가 최대 11.6 %, 최소 0.22 %가 발생하였으며, 이 오차를 줄이기 위해서 앞으로 스러스트 베어링의 모델링 조건 및 이 모델을 이용하여 스테이지의 거동 시 스테이지에 발생하는 진동과 외부의 힘이 스테이지에 미치는 영향들을 연구할 계획이다.

후 기

이 논문은 서울시 산학연 협력사업의 지원으로 작성되었음(과제번호 10583)

참 고 문 헌

- (1) Lee, S. H., Lee, Y. H., Lee, K. W., Lee, S. B. and Yim, H. J., 2008, "Analysis of Z-axis Displacement for Precision of a Nano Imprinting

Table 1 Comparison between test and simulation

	Experiment (Hz)	Simulation (Hz)	Error (%)
Rigid mode	13.75	13.72	- 0.22
	61.25	68.38	+ 11.6
	108.80	96.17	- 11.6
Flexible mode	547.50	561.99	+ 2.6
	767.50	740.64	- 3.5
	951.30	903.40	- 5.0

Stage,” Proc. of the KSME 2008 Spring annual Meeting. p.100.

(2) Park, I. S., Won, J. J., Yim, H. J. and Jeong, J. I., 2008, “Deformation of a Mold for Large Area UV- nanoimprint Lithography in Alignment and Curing Processes,” Proc. of the KSME 2008 Fall Annual Meeting, pp. 1939~1943.

(3) Lee, J. S., Lee, S. H., Jeong, J. I. and Yim, H. J., 2009, “Analysis of Displacement by External Force of Nano Imprinting Stage,” Proc. of the KSME 2009 Spring Annual Meeting, pp. 96~100.

(4) Lee, K. W., Lee, J. W., Lee, S. H., Lim, S. H., Jeong, J. I. and Yim, H. J., 2008, “Vibration Analysis of a Nano Imprinting Stage Using CAE,” Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference. pp. 579~584.

(5) Lee, S. Y., Kim, S. R., Jeong, J. I. and Yim, H. J., 2009, “A Study on the Improvement of Vibration Analysis of Visual Alignment System Using CAE Method,” Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 8, pp. 838~842.