

유연성을 고려한 4축 나노임프린팅 스테이지의 동적 해석

박성빈[†]·정재일*·임홍재**

Dynamic Analysis of a 4-Axis Nano Imprinting Stage Mechanism considering Flexibility

Sung Bin Park, Jae I. Jeong, Hong Jae Yim

Key Words: Nano Imprinting Stage(나노 임프린팅 스테이지), 4-axis Stage(4축 스테이지), CAE (컴퓨터 응용공학), Flexible Multi-body Dynamics(유연다물체동역학)

Abstract

A nano-imprinting stage has been widely used in various fields of nano-technology. In this study, A 4-axis nano-imprinting stage is modeled with using the 3D-CAD Tool. Structural components such as an upper-plate, bearings and cross-roller-guides are modeled with finite elements to analyze flexibility effect during the precision stage motion. In addition, Dynamic analysis is executed to reproduce actual motion of 4-axis nano imprinting stage.

1. 서 론

최근 반도체 산업의 급속한 성장에 따라 고집적·고효율 반도체 생산기술개발에 대한 중요성이 날로 커지고 있으며, 미국, 일본 등 선진국을 중심으로 다양한 형태의 제조기술이 개발되고 있다. 제조 기술로서 최근 나노 임프린트 공정(nano imprint process)이 각광을 받고 있다. 특히, 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⁾

최근 스테이지 장비의 개발과정에서 CAE 기법을 도입함으로써 개발시간 및 비용을 줄이고, 개발과정에서 예측되는 문제점들을 제품 설계 단계

에서 해결하려는 노력이 많이 이루어지고 있다.

따라서 본 연구에서는 스테이지의 동적 특성을 분석하기 위해 3D CAD Tool을 이용하여 모델링을 하였고 다물체 기구 동역학 해석 프로그램을 이용하여 동역학 모델을 만들었으며, 진동해석에 있어 유연성이 클 것으로 예상되는 상판(upper plate)과 베어링(bearing), 크로스 롤러 가이드(cross roller guide) 그리고 축(shaft) 부분을 유연체 모델로 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 만들었다. 또한 실제 4축 스테이지 구동시 일어날 수 있는 기구학적 오차에 의한 동적 해석을 실시 하였다.



Fig. 1 4-axis nano imprinting stage

[†] 국민대학교 자동차전문대학원 차체 및 샤시 전공
E-mail : xertt@naver.com
TEL : (02)914-8812

* 국민대학교 기계자동차공학부

** 국민대학교 기계자동차공학부

2. 스테이지의 구동 원리

3자유도(x, y, θ) 제어가 가능한 스테이지를 구성하기 위해서는 정확한 구동 원리를 알아야 한다. 실제 구동은 서보모터(servomotor)를 통해 작동 되므로 모터의 적절한 배치와 구동 범위의 설정은 매우 중요하다고 할 수 있다.

2.1 기본 동작 원리

3축 제어를 위해 4개의 모터를 사용하며 각각의 작용에 의해 x, y 축 병진, z 축 회전 운동을 제어한다.

조인트 구성을 나타내는 Fig. 3에서 편의상 X축 모터는 A, B Y축 모터는 C, D로 나타내기로 한다.

·X축 병진 운동: A, B 모터만 작동하며 x 축 방향 병진조인트가 움직이게 된다.

·Y축 병진 운동: C, D 모터가 서로 반대 방향으로 작동을 하며 구동 범위는 서로 같다. X축 구동과 유사하게 y 축 방향 병진조인트가 움직인다.

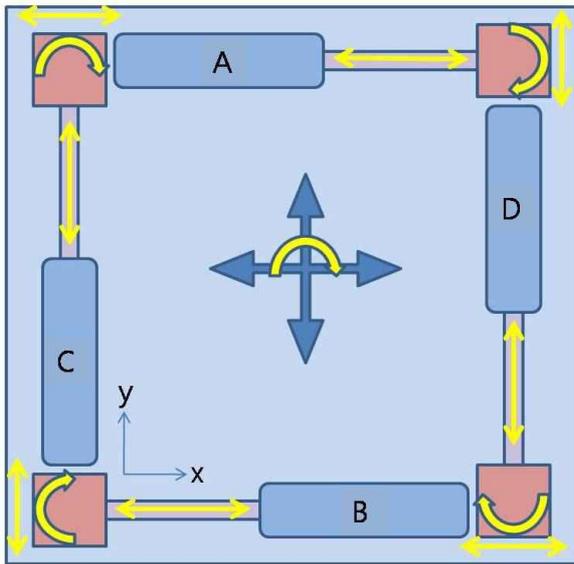


Fig. 2 Mechanical joints of a 4-axis stage

·Z축 회전 운동: Z축 회전 운동을 만들기 위해서는 A, B, C, D 네 종류의 모터가 동시에 작동을 하며 4축의 회전조인트가 작동하게 되어 회전 운동을 만들어 낸다.

이런 기구학적 조인트 구성은 상용 동역학 해석 프로그램을 사용하여 가상 시스템을 구축하고 시뮬레이션 하는데 매우 중요한 정보를 제공한다.⁽²⁾

2.2 스테이지 구동

Fig. 3는 스테이지의 구동에 있어 전반적인 메카니즘을 나타낸 것이다.

하나의 모터셋에서 모터의 회전운동으로 인하여 그 회전력이 축에 전달되고 축과 트랜슬레이터(translator)간의 스크류 조인트(screw joint) 관계로 인하여 트랜슬레이터가 병진운동을 한다. 이때 상판에 부착된 베어링과 크로스 롤러 가이드에 부착된 베어링 간의 회전 조인트(revolute joint)로 스테이지 구동 시 스테이지가 수직 축을 중심으로 회전 운동을 가능하게 되고, 크로스 롤러 가이드들 사이의 병진 조인트(translational joint)로 평면으로 병진운동을 가능하게 한다.

Fig. 4는 축과 트랜슬레이터, 각 크로스 롤러 가이드, 그리고 베어링과 상판과의 메카니즘을 나타내는 것이다.

모터의 회전과 그로 인한 축의 회전, 그리고 축과 트랜슬레이터 간의 스크류 조인트로 트랜슬레이터가 병진 운동을 하게 만들어 주는 병진 조인트 관계를 보여주고 있다.

상판에 부착된 베어링과 크로스 롤러 가이드에 부착된 베어링은 회전 조인트로 연결되어 있고, 베어링이 부착된 크로스 롤러 가이드와 그 아래 가이드는 병진 조인트로 연결되어 있다. 트랜슬레이터와 하판(bottom plate)의 종 방향 병진 조인트, 베어링간의 회전 조인트, 크로스 롤러 가이드 간의 횡 방향 병진 조인트는 스테이지가 회전과 병진운동을 하는데 중요한 메카니즘 관계인 것이다.⁽²⁾

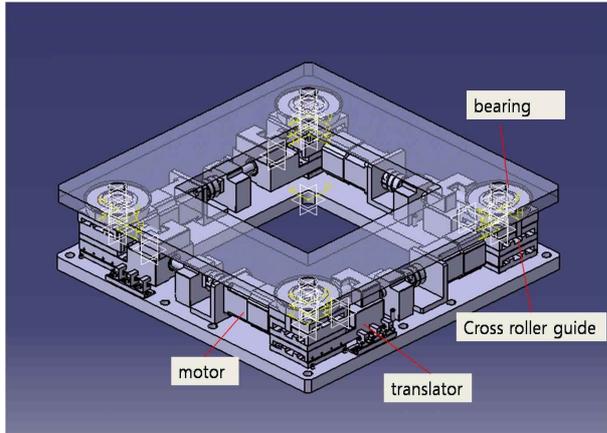


Fig. 3 Overall stage mechanism

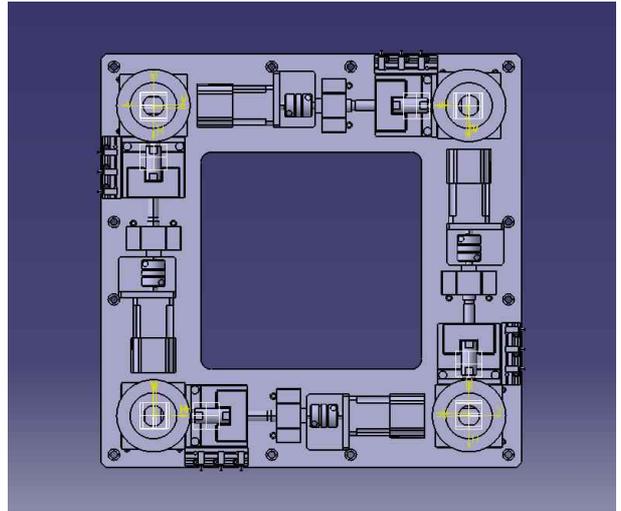


Fig. 5 4-axis nano-imprinting stage

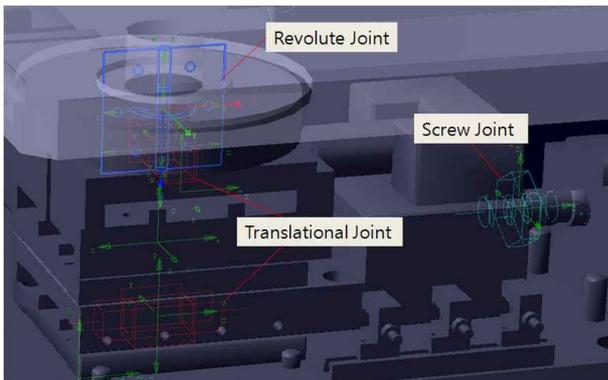


Fig. 4 Stage mechanism

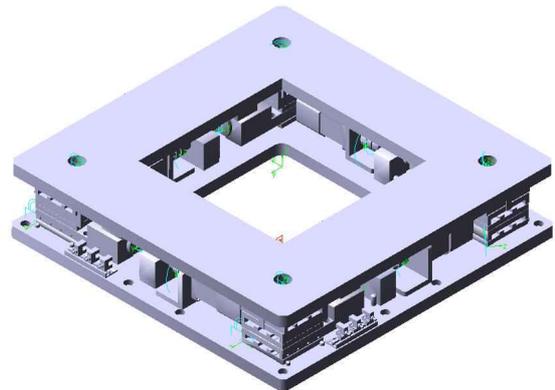


Fig. 6 Multi-body dynamic analysis model of stage mechanism

3. 스테이지 장비 전산 모델링

3.1 기구 동역학 모델 구성

스테이지 모델링은 3D CAD Tool을 이용하여 모델링을 하였다. 모델링 과정에서는 최대한 실제 모델과 흡사하게 만들기 위해 기초 도면을 바탕으로 디자인 하는데 노력하였고, 정밀하고 세밀한 측정을 통하여 이루어 졌다. 뿐만 아니라 스테이지 구동의 메카니즘을 고려하여 다물체 기구동역학 해석 프로그램을 이용하여도 실제 메카니즘을 완벽히 구현할 수 있도록 모델링 하였다. Fig 5는 스테이지의 3D CAD 모델을 보여주고 있다.

3D CAD Tool에서 모델링한 스테이지를 다물체 동역학 프로그램에서 각 부위별로 조인트 관계를 주었으며 이를 Fig. 6에 나타내었다.

3.1.1 유한요소 모델

유연성을 고려한 동적 해석을 하기위해 필요로 하는 MNF(Modal Neutral File)를 생성하기 위해 유한요소 프로그램으로 Hypermesh를 사용하였고, solver로는 MSC.NASTRAN을 사용하여 많은 하중을 지지하는 부분의 유한요소 모델을 만들었다.

Table 1 Material property of upper plate

Density	2,700kg/m ³
Young's modulus	68.9Gpa
Poisson's ratio	0.33

Table 2 Material property of cross roller guide

Density	7,860kg/m ³
Young's modulus	210Gpa
Poisson's ratio	0.3

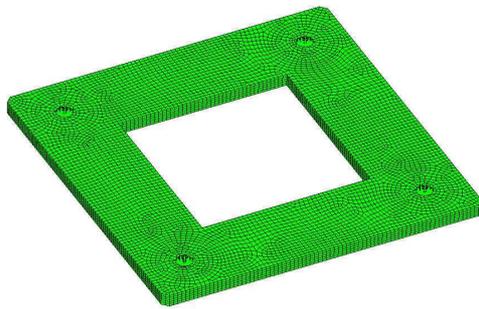


Fig. 7 FEM of upper plate(mesh size 5)

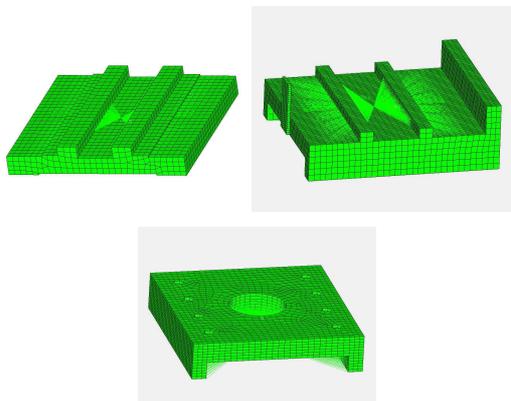


Fig. 8 FEM of cross roller guide (mesh size 2)

상판(upper plate)에 대하여 Table 1 에 나타난 물성치를 갖는 Fig. 7 의 유한요소모델을 만들었으며, 요소크기를 5mm로 모델링 하였다.

크로스 롤러 가이드에 대하여 Table 2 에 나타난 물성치를 갖는 Fig. 8 의 유한요소 모델을 만들었으며, 요소 크기를 2mm로 모델링 하였다.

축과 베어링도 Table 2 와 같은 물성치를 갖는 유한요소 모델을 요소크기 2mm로 모델링 하였다.

3.2 스테이지의 기구 동역학 해석

초정밀 가공 장비인 nano-imprinting stage 장비를 효율적으로 해석하기 위해서는 강체(rigid body)가 아닌 유연체(flexible body)로 해석을 해야 할 것이다. 실질적으로 모든 재료는 강체가 아닌 유연체이며 초정밀 가공을 위해서는 아주 작은 범위의 오차도 무시해서는 안 되기 때문이다.

본 연구에서는 상용 다물체 동역학 해석프로그램인 ADAMS를 이용하여 스테이지 장비의 기구 동역학 모델을 구성하였다.

3.2.1 스테이지 시스템의 유연성 모델

고유진동해석을 통해 추출한 상판과 크로스 롤러 가이드, 베어링과 축의 유한요소모델에 대한 유연성 데이터인 MNF(modal neutral file)를 추출한 후, 이를 강체로 모델링한 스테이지 동역학 모델에 적용 시킨 후 유연체 동역학 해석을 수행한다.

Fig. 9 는 상판과 크로스 롤러 가이드, 베어링과 축을 유연체 모델로 변환한 것을 나타낸다.

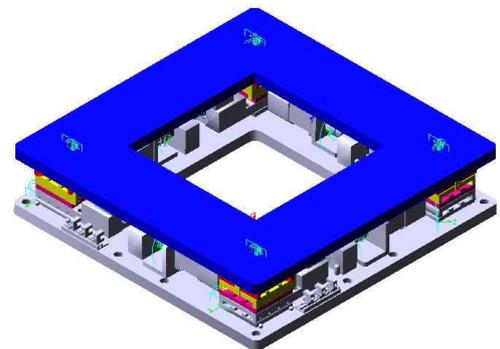


Fig. 9 Flexible multi-body dynamic analysis model of stage mechanism

3.2.2 제조 공정 시 발생할 수 오차를 고려한 상판의 변위 해석

상판과 베어링, 크로스 롤러 가이드와 축 모두 유연체 모델로 변환한 스테이지 모델에서 4개의 스크류 조인트 중 하나의 y축 방향 스크류 조인트를 z축을 중심으로 1도(degree) 회전 시킨 모델을 만들었다. 즉, y축 방향 모터의 작동시 y축 방향 양쪽에 힘이 평행하게 전달되지 못하고 엇갈리는 현상이 발생하도록 모델링 하였고 Fig. 10에 이를 나타내었다. 이는 실제 스테이지가 제조과정에서의 오차를 가지고 구동을 하였을 때의 스테이지 상판의 움직임에 파악하고자 해석을 수행하였다.

스테이지의 x축, y축 병진 운동과 z축 회전 운동을 하는 동안의 상판의 x, y, z 축 변위를 측정하였다. 기구학적 오차가 없을 경우의 변위와 위에서 언급한대로 1도의 오차가 있는 모델의 측정 변위의 오차를 Fig. 10에 나타내었다.

x축 변위의 경우 최대 $2.5\mu\text{m}$ 정도의 오차가 발생하였으며, y축 변위의 경우 $0.75\mu\text{m}$ 의 오차가 발생하였고, z축 변위의 경우도 $0.75\mu\text{m}$ 의 오차가 발생하였다.

x축 방향 병진운동만 할 때에는 진동이 일어나지 않지만 y축 방향 병진운동을 할 때 3축 방향 모두 진동이 일어남을 볼 수 있다. 특히 z축 방향으로 진동이 급격히 일어남을 Fig. 11을 통해 확인 할 수 있다. 상판이 회전운동을 할 때에는 z축 방향 진동은 좀 작아지지만 x, y 축 방향 진동이 더 커짐을 확인 할 수 있다.

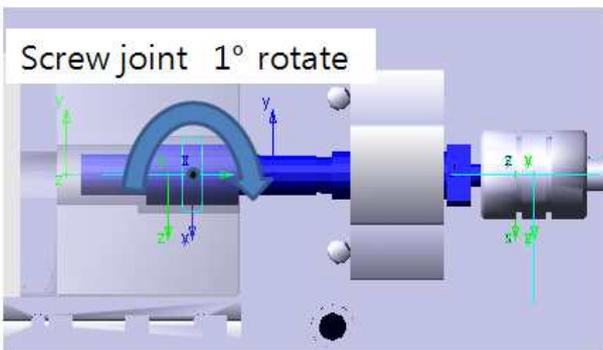


Fig. 10 A screw joint is rotated centrally Z-axis as 1degree

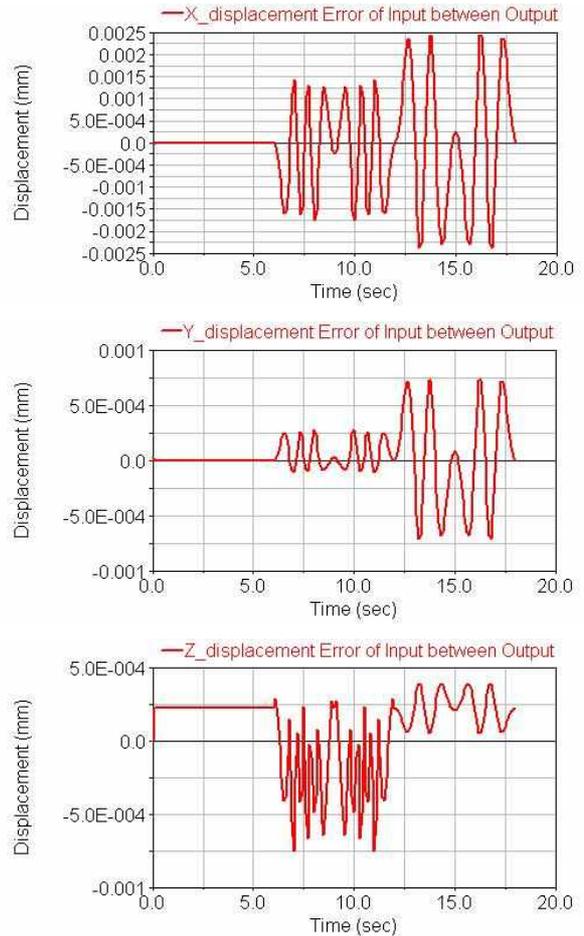


Fig. 11 Dynamic analysis result of flexible multi-body dynamic model mechanism

나노 단위의 정밀도를 요구하는 스테이지에서 $2.5\mu\text{m}$ 의 진동이 일어나는 것은 무시할 수 있는 수치는 아닌 것으로 생각된다. 물론 실제 스테이지 제조 시, 축 뿐만이 아니라 여러 부분의 제조 오차가 있을 수 있기 때문에 진동이 더 커질 수도 있고 더 작아질 수도 있기 때문에 더 많은 경우에 대한 해석과 이를 제어할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 스테이지 장비의 동적 거동을 전산기법을 이용하여 분석하기 위해 다물체 동역학 해석 프로그램을 이용하여 스테이지 장비의 동역학 모델을 만들었다.

또한 시스템의 유연성을 반영하기 위하여 하중을 지지하고 유연성이 클 것으로 판단되는 상판과 베어링, 크로스 롤러 가이드와 축을 유한요소 모델로 만들었으며, 유한요소 프로그램을 이용하여 고유진동해석을 수행하였다. 이 해석을 통해 유연체 특성 데이터(MNF)를 추출하였으며, 이를 동역학 모델에 적용하여 유연 다물체 동역학 해석을 수행하였다.

스테이지 시스템의 제조 공정 시에 발생할 수 있는 여러 가지 오차 중 축의 비틀어짐에 의한 기구학적 오차에 의한 상판의 3축의 변위 해석을 통해 상판의 거동 특성을 알아보았다.

향후에는 여러 가지 공정 오차에 의한 스테이지의 기구학적 변위 해석을 통해 스테이지 상판의 변형과 거동을 예측하는 연구를 계속할 것이다. 또한 모션(motion)에 의한 구동이 아닌 실제 모터의 힘에 의한 구동을 통한 각 조인트 사이의 마찰력에 의한 4축 스테이지의 기구학적 해석을 통해 4축 스테이지의 거동 특성을 파악하고 이를 제어하는 연구를 할 계획이다.

후 기

본 논문은 서울시 산학연 협력사업의 지원으로 작성되었음(과제번호 10583).

참고문헌

- (1) Lee, M. G., Lee, J. W., Yim, H. J., Lee, K. S., Lee, S. B., 2007, "Dynamic Analysis of High-precision Stage Mechanism considering Flexibility of Structural Components", Transactions of the KSMTE Annual Spring Conference. pp. 102~107.
- (2) Lee, K. W., Lee, M. K., Lee, J. W., Lim, Si. H., Shin, D. H., Jang, S. Y., Jung, J. I and Yim, H. J., 2007, "Dynamic Analysis of a Nano Imprinting Stage Using CAE", Transactions of the KSMTE. Vol. 16, No. 5, pp. 211~217.
- (3) Lee, K. W., Lee, J. W., Lee, S. H., Lim, S.

H., Jung, J. I., Yim, H. J., 2008, "Vibration Analysis of a Nano Imprinting Stage Using CAE", Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference.

- (4) Lee, J. W., Lee, K., W and Yim, H. J., 2007, "Modal Test of high Precision Stage System Using Laser Vibrometer," Proceedings of the KSNVE Annual Fall Conference.