

CAE를 이용한 나노 임프린트 스테이지의 동적 거동해석

이강욱*, 이민규⁺, 이재우⁺, 임시형⁺, 신동훈⁺, 장시열⁺, 정재일⁺, 임홍재⁺⁺

(논문접수일 2007. 8. 22, 심사완료일 2007. 10. 4)

Dynamic Analysis of a Nano Imprinting Stage Using CAE

Kang wook Lee*, Min Gyu Lee⁺, Jae Woo Lee⁺, Si-Hyung Lim⁺, Dong Hoon Shin⁺,
Si Youl Jang⁺, Jae Il Jeong⁺, Hong Jae Yim⁺⁺

Abstract

A nano-imprinting stage has been widely used in various fields of nanotechnology. In this study, an analysis method of a nano-imprinting stage machine using FEM and flexible multi-body kinematics and dynamics has been presented. We have developed a virtual imprinting machine to evaluate the prototype design in the early design stage. The simulation using CAE for the imprinting machine is not only to analyze static and dynamic characteristics of the machine but also to determine design parameters of the components for the imprinting machine, such as dimensions and specifications of actuators and sensors. Structural components as the upper plate, the rotator, the shaft and the translator have been modeled with finite elements to analyze flexibility effects during the precision stage motion. In this paper flexible multi-body dynamic simulation is executed to support robust design of the precision stage mechanism. In addition, we made the 4-axis stage model to compare the dynamic behavior with that of 3-axis stage model.

Key Words : Nano-imprinting stage(나노 임프린팅 스테이지), 3-axis stage(3축 스테이지), 4-axis stage(4축 스테이지), CAE(컴퓨터 응용공학), Simulation(모의 실험), Design(설계)

1. 서론

최근 들어 반도체 산업이 성장함에 따라 그 제조 장비인 정밀 스테이지의 개발도 활발히 이루어지고 있다. 그러나 국

내에서는 반도체 개발 초기부터 메모리 소자 개발에만 집중했기 때문에 국내의 반도체 제조 장비 및 부품 생산 산업은 매우 취약하다.

스테이지 장비의 개발과정에서 CAE 기법을 도입함으로

* 국민대학교 자동차 전문 대학원 차체 및 샤시 전공
+ 국민대 기계자동차공학부
++ 교신저자, 국민대 기계자동차공학부 (hjyim@kookmin.ac.kr)
주소: 136-702 서울시 성북구 정릉 3동

서 개발시간 및 비용을 줄이고, 또한 개발과정에서 예측되는 문제점들을 제품 설계 단계에서 해결하려는 노력이 많이 이루어지고 있다⁽¹⁾. 그러나 대부분 스테이지 장비의 구성요소를 강제로 모델링한 상태에서 시스템의 기구동역학해석을 수행함으로써 실제 발생 가능한 유연체 특성을 고려하지 않음으로 인해 발생할 수 있는 부정확성을 내포하고 있다⁽²⁾.

본 연구에서는 기 보유하고 있는 스테이지 장비(Fig. 1)의 동적특성을 분석하기 위해 3D CAD Tool을 이용하여 모델링을 하였고, 다물체 기구동역학 해석 프로그램을 이용하여 동역학 모델을 만들었으며, 또한 유연성이 클 것으로 예상되는 스테이지 장비의 상판(upper plate)과 로터(rotor), 베어링(bearing), 스테이지를 구동시키는 메커니즘을 포함하고 있는 모터 셋(motor set)부분을 유연체 모델로 유한 요소해석 프로그램을 이용하여 만들었다. 유연체 기구동역학 해석을 수행함으로써 장비 구동부의 거동을 해석했으며 이를 개선하기 위해 가상의 모델을 제작하여 현재 보유하고 있는 장비의 문제점 및 개선점을 찾고자 노력하였다.

2. 스테이지의 구동 원리

3축(X, Y, θ) 제어가 가능한 스테이지를 구성하기 위해서는 정확한 구동 원리를 알아야 한다. 실제 구동은 선형 구동기(Linear Actuator)를 통해 작동 되므로 구동기의 적절한 배치와 구동 범위의 설정은 매우 중요하다고 할 수 있다.

2.1 기본 동작 원리

Fig. 2는 3축 스테이지의 기본 구동 원리를 나타낸다. 3축 제어를 위해 3개의 구동기가 필요하며 각각의 작용에 의해

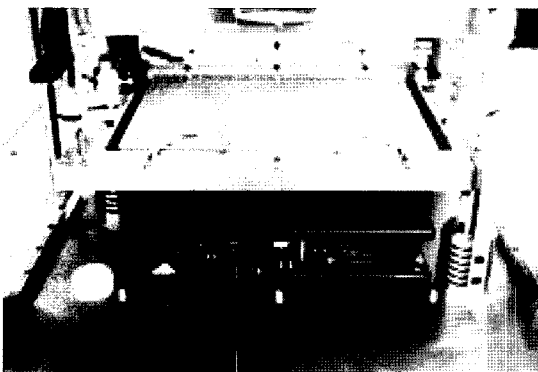


Fig. 1 Nano-imprinting stage

2축 병진, 1축 회전 운동을 제어한다. 본 연구에서는 기본 구동 원리를 이용하여 연구 목적에 맞는 구동 원리를 개발하였으며 Fig. 3에서 보여준다⁽³⁾.

조인트 구성을 나타내는 Fig. 3에서 편의상 X축 구동기는 U구동기, Y축 구동기는 V, W로 나타내기로 한다.

구동 원리는 다음과 같다.

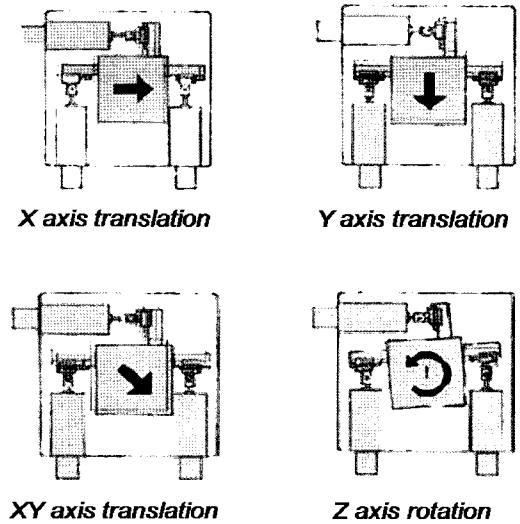


Fig. 2 Basic moving principle of a 3-axis stage

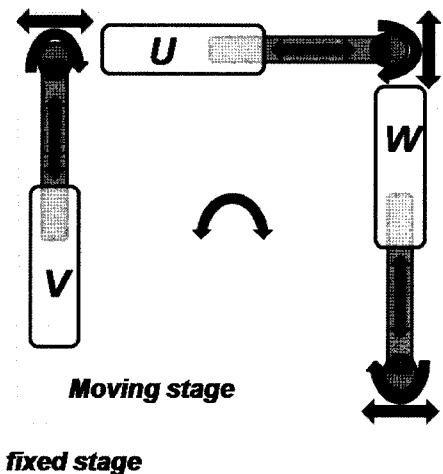


Fig. 3 Mechanical joints of a 3-axis stage

- X축 병진: U 구동기만 단독으로 작동하며 V, W 구동기는 작동을 하지 않고 끝의 병진조인트가 움직이게 된다.
- Y축 병진: V, W 구동기가 서로 반대 방향으로 작동을 하며 구동 범위는 서로 같다. X축 구동과 유사하게 U 구동기 끝에서는 병진 조인트가 움직인다.
- Z축 회전: Z축 회전 운동을 만들기 위해서는 U, V, W 세 종류의 구동기가 동시에 작동을 하며 끝의 회전 조인트가 작동하게 되어 회전운동을 만들어 낸다.

Fig. 3에서 나타내는 기구학적 조인트 구성은 상용 동역학 해석 프로그램을 이용하여 가상 시스템을 구축하고 시뮬레이션 하는 데 매우 중요한 정보를 제공한다⁽¹⁾.

2.2 스테이지 구동

Fig. 4는 스테이지의 구동에 있어 전반적인 메카니즘을 나타낸 것이다.

하나의 모터셋에서 모터의 회전운동으로 인하여 그 회전력이 축(shaft)에 전달되고 축과 트랜슬레이터(translator) 간의 screw joint관계로 인하여 트랜슬레이터가 병진운동을 한다. 이때 트랜슬레이터와 로터간의 revolute joint로 스테이지 구동 시 스테이지가 수직 축을 중심으로 회전 운동을 가능하게 되고, 상판과 로터간의 translate joint로 평면으로 병진운동을 가능하게 한다.

모터(motor)의 회전과 그로 인한 축의 회전, 그리고 축과 트랜슬레이터 간의 screw joint로 트랜슬레이터가 병진 운동을 하게 만들어 주는 translational joint 관계를 보여주고 있다.

Fig. 5는 트랜슬레이터와 로터, 로터와 상판의 메카니즘을 나타내는 것이다. 트랜슬레이터와 로터는 revolute joint로

연결되어 있고, 로터와 상판은 translational joint로 연결되어 있다. 트랜슬레이터와 하판(bottom plate)의 종방향 translational joint, 트랜슬레이터와 로터의 revolute joint, 로터와 상판의 횡방향 translational joint는 스테이지가 회전과 병진운동을 하는데 중요한 joint관계인 것이다.

3. 스테이지 모델링

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. 6은 현재 보유하고 있는 3축 스테이지 장비를 3D

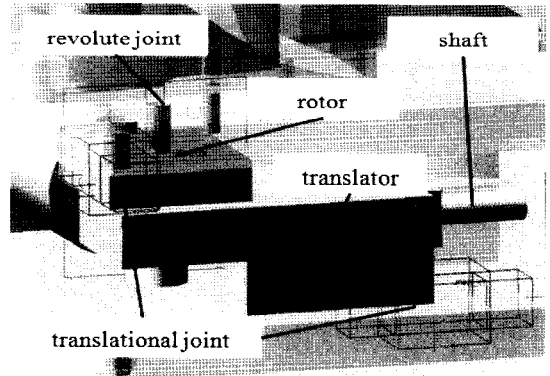


Fig. 5 Stage mechanism

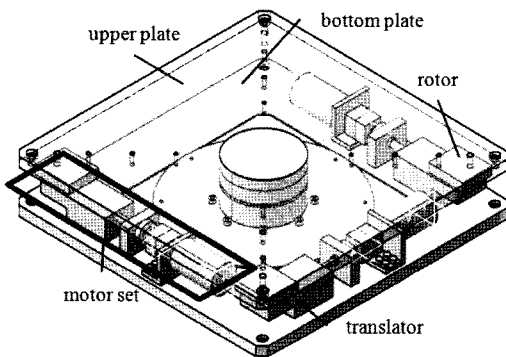


Fig. 4 Overall stage mechanism

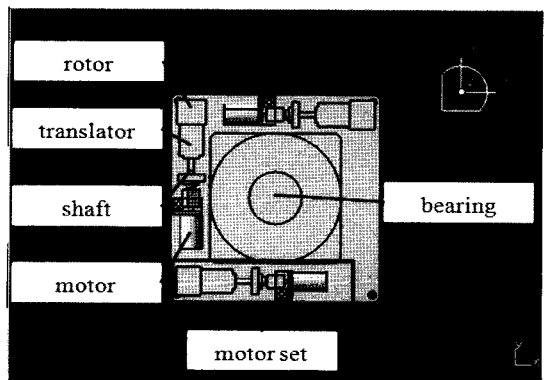


Fig. 6 3-axis nano-imprinting stage model

CAD Tool을 이용하여 모델링 한 것이며 진공흡착부와 미들스테이지, 상판을 제외시키고 위에서 내려다본 그림이다.

Fig. 7은 현재 보유하고 있는 3축 스테이지 장비를 4축 스테이지 장비로 3D CAD Tool을 이용하여 모델링 한 것이며 진공흡착부와 미들스테이지, 상판을 제외시킨 Top view 그림이다.

모터 셋을 하나 더 추가함으로써 3축이 스테이지를 구동시키고 진공흡착부와 미들 스테이지를 지지 했을 경우보다 좀 더 안정적이고 정상적인 구동을 기대하기 때문이다. 모터 셋의 추가는 기존의 모터 셋들의 위치와 비교하여 대칭이 되도록 정확한 위치에 설계하였다.

4. FEM modeling and flexible body

초정밀 가공 장비인 nano-imprinting stage장비를 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.

따라서 하중의 지지를 가장 많이 받는 상판과 로터, 베어링, 그리고 현재 보유하고 있는 nano-imprinting stage 장비의 구동에 가장 많은 영향을 주는 부분을 유한요소 기법을 사용하여 강체가 아닌 유연체로 교체해 주었다⁽⁴⁾.

4.1 상판의 유한요소 모델

Fig. 8과 Table 1은 진공흡착부와 미들 스테이지를 지지하는 상판을 유연체로 교체하기 위해 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 유한요소 모델링한 그림이고 그 모델에 입력

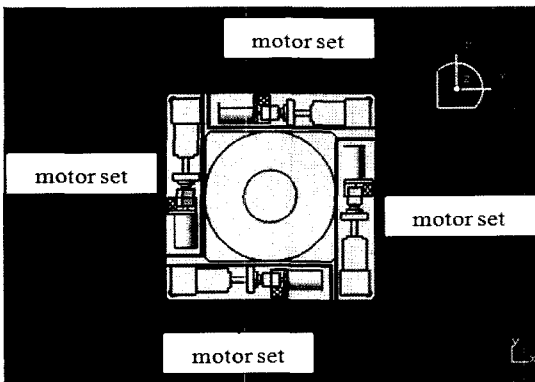


Fig. 7 4-axis nano-imprinting stage model

된 물성치를 나타낸 것이다.

4.2 베어링의 유한요소 모델

베어링은 중심부에서 상판과 연결되어 로터와 함께 진공흡착부와 미들스테이지를 지지하는 부분이다. 스테이지 구동 시 마찰력을 최소화 하며 하중을 지지하여 처짐 및 진동을 방지하는 부분이라 할 수 있다.

Fig. 9는 베어링을 유연체로 고려하기 위해 유한 요소 해석 프로그램을 이용하여 모델링을 한 것이고 이것도 마찬가지로 상판, 로터와 같은 물성을 사용하였다.

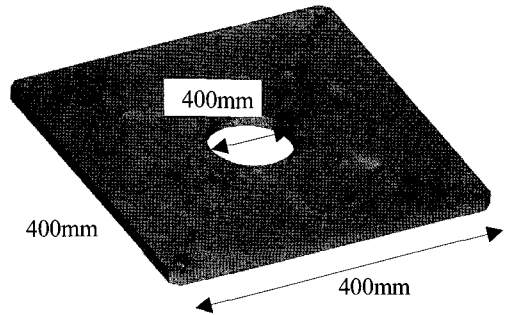


Fig. 8 Finite element model of upper plate(mesh size : 2.5mm)

Table 1 Material properties of upper plate

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

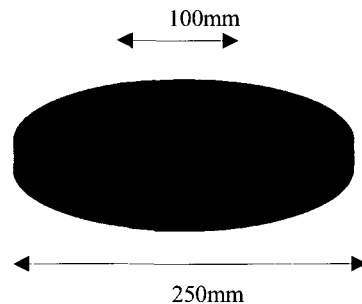


Fig. 9 Finite element model of bearing(mesh size : 5mm)

4.3 모터 셋의 유한요소 모델

축은 모터의 회전 동력을 트랜슬레이터로 전달하는 부분이며, 트랜슬레이터는 구동원인 모터의 회전운동을 축으로부터 전달받아 병진운동으로 바꿔주는 역할을 한다. 그리고 로터는 트랜슬레이터에 하나씩 연결되어 상판을 지지하고 있으며 트랜슬레이터의 병진운동을 전달받아 스테이지가 병진 및 회전운동을 하는데 중요한 영향을 주는 부분이다. Fig. 10은 모터 셋의 유한요소 모델들을 합쳐놓은 그림이다.

5. Stage 거동 특성

본 연구의 목적인 각각의 스테이지의 거동 특성 및 안정성을 해석하고, 설계 개선 방향을 위해 여러 가지 모델을 CAE를 이용하여 시뮬레이션 하고 비교하여 그 개선 방향을 살펴보고자 한다.

Fig. 11~13은 스테이지를 강체라는 가정 하에 시뮬레이션 한 결과이다. 중심이 되는 점은 진공흡착부의 질량중심(center of mass)점으로 정하였고, 결과에서 보이 듯, 병진운동 시 X축 방향(진공흡착부의 장축 방향)과, Y축 방향(진공흡착부의 단축 방향)으로는 최대 +5mm, 최소-5mm까지 구동이 가능하게 입력 값을 주었고, 회전 시는 최대 2deg, 최소 -2deg의 입력 값을 주었다. 처음 시작부터 14.5초까지는 X축, 15초부터 28.5초 까지는 Y축 병진운동의 입력을 주었고, 29초부터 42.5초까지는 회전운동의 입력을 준 결과이다.

Fig. 14~16는 실제 보유하고 있는 스테이지 장비 모델에 유한요소 해석 프로그램을 이용하여, 많은 하중을 지지하고 스테이지 구동 메커니즘을 차지하는 부분인 상판, 로터, 베어링, 트랜슬레이터, 축을 유연체 모델로 바꾼 결과이다. 강체 모델과 마찬가지로의 구동 가능범위를 갖고 있으며 같은 물성을 입력 시켰다.

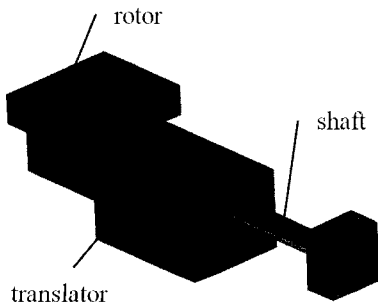


Fig. 10 Finite element model of motor set(mesh size : 2mm)

이번 결과에서는 병진운동 시에도 Z축에 약간의 진동이 나타났고 회전 시에는 좀 더 많은 진동이 나타났다. 그리고 강체로 시뮬레이션을 했을 경우와는 좀 다르게, X변위나 Y변위가 입력을 받지 않은 상태에서도 약간의 흔들림이 나타남을 알 수 있다.

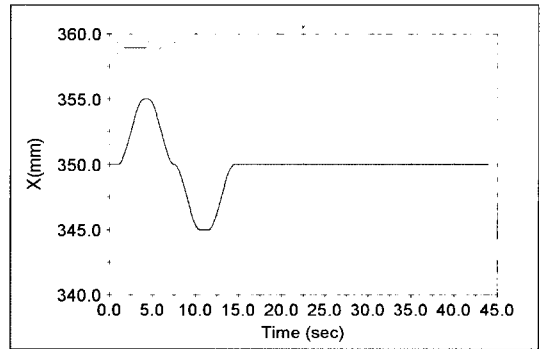


Fig. 11 X displacement of rigid body

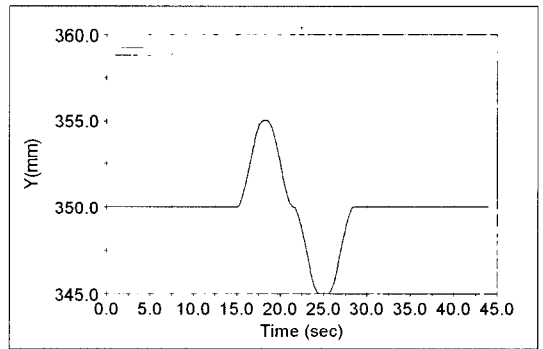


Fig. 12 Y displacement of rigid body

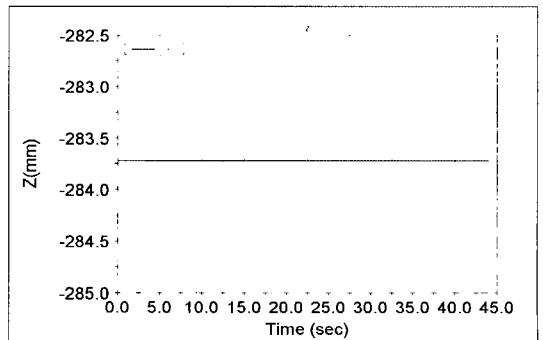


Fig. 13 Z displacement of rigid body

Fig. 17~19는 3축의 불안정한 지지를 개선할 4축 스테이지를 모델링하여 유연체로 교체시킨 후 시뮬레이션 한 결과이다. 위의 시뮬레이션과 마찬가지로 위의 결과를 보면 실제 장비인 3축을 모델링하여 유연체로 교체시켰을 경우의 시뮬레이션 결과와 다소 차이를 나타내고 있다. 그래프 상으로

는 4축 스테이지가 더 많은 진동을 보이는 듯 하지만 진폭은 4축의 경우가 훨씬 더 작음을 알 수 있다. 3축의 경우 최대 진폭은 약 7~8 μm 이고, 4축의 경우 약 3 μm 를 보이고 있다. 뿐만 아니라 X, Y에 대한 변위도 3축 유연체 모델보다 안정된 거동을 보이고 있음을 알 수 있다.

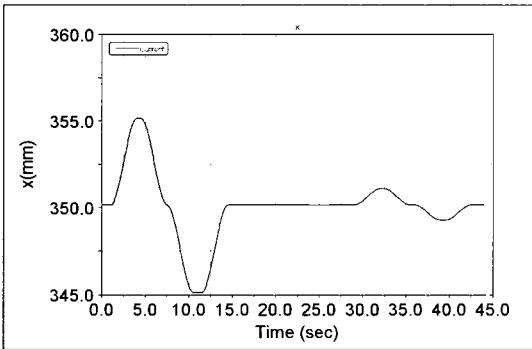


Fig. 14 X displacement of 3-axis flexible body stage

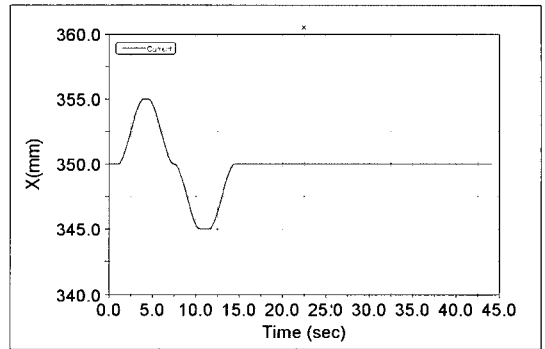


Fig. 17 X displacement of 4-axis flexible body stage

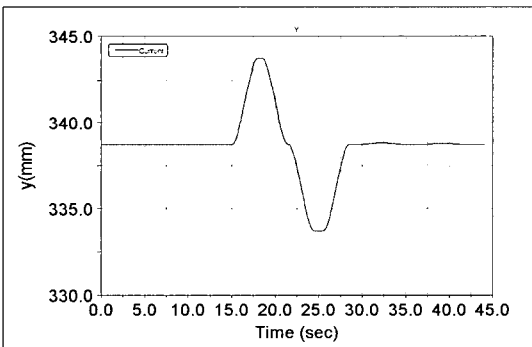


Fig. 15 Y displacement of 3-axis flexible body stage

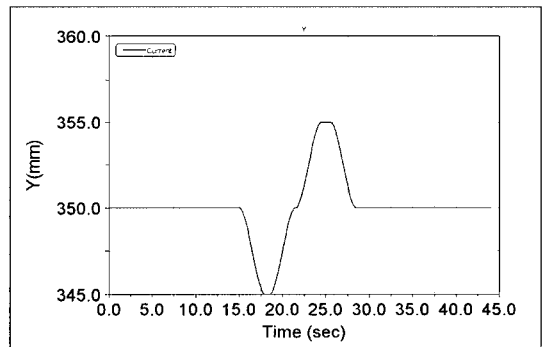


Fig. 18 Y displacement of 4-axis flexible body stage

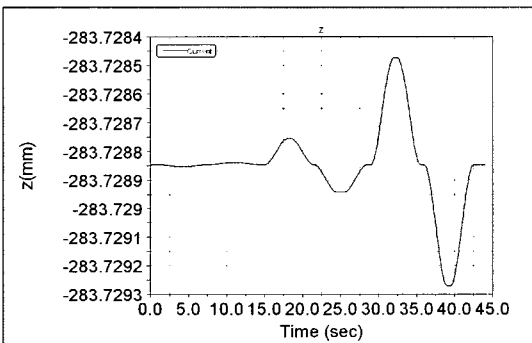


Fig. 16 Z displacement of 3-axis flexible body stage

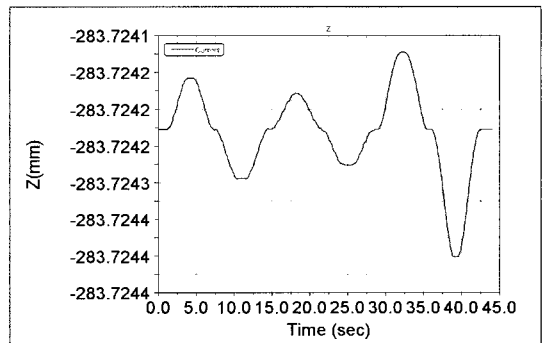


Fig. 19 Z displacement of 4-axis flexible body stage

Table 2 Z축 변위 비교

	3축 스테이지	4축 스테이지
Z축 변위	약 7~8 μ m	약 3 μ m

6. 결론

본 연구에서 해석한 시뮬레이션 결과는 현재 보유하고 있는 nano-imprinting stage의 안정성 및 초정밀 성을 CAE를 이용하여 확인하고 보완점을 찾는 데 목표를 두었다. 그 비교를 위하여 스테이지 장비를 모델링하였고, 3축 강체 스테이지, 3축 유연체 스테이지, 4축 유연체 스테이지 시 구동 해석을 통하여 Table 2에서와 같이 4축 유연체 스테이지가 3축에 비해 더 진동이나 응답에 있어서 좀 더 안정적임을 알 수 있었다.

앞으로 초정밀 가공 장비이며 차세대 반도체 핵심 기술로 각광받고 있는 nano-imprinting stage의 안정성 및 기술의 발전을 위해 외부의 가진이나 모터의 가진에 의해 스테이지의 구동 특성을 살펴보고 연구할 계획이다.

후 기

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

참 고 문 헌

- (1) Ju, J. H., Yim, H. J., Jang, S. Y and Jung, J. I., 2007, "Kinematic and Dynamic Analysis of Precision Stage Mechanism," *Proceedings of the KSME 2007 Spring Annual Meeting*, pp. 954~958.
- (2) Lee, M. G., Lee, J. W., Yim, H. J. and Lee, K. S., 2007, "Dynamic Analysis of High-precision Stage Mechanism considering Flexibility of Structural Components," *Proceedings of the KSMTE 2007 Spring Annual Meeting*, pp. 102~107.
- (3) Kang, M. S., Yang, H. J., Yim, H. J., Jang, S. Y., Jeong, J. I., Shin, D. H. and Lee, K. S., 2006, "Structural analysis and multi-body kinematics and dynamics analysis of a nano imprinting machine using CAE method," *Proceedings of the KSME Fall Annual Meeting*, pp. 23~29.
- (4) Kang, Y. S., Lee, S. B. and Yim, H. J. 2006, "Structural analysis and multi-body kinematics and dynamics of a nano-imprinting machine using CAE method," *the 1st workshop of information and knowledge paper*, pp. 102~108.