

정밀 스테이지의 기구 동역학 해석

Kinematics and Dynamics Analysis of Precision stage

주재환† · 임홍재* · 장시열* · 정재일*

Jae Hwan Ju, Hong Jae Yim, Si Youl Jang and Jae Il Jung

Key Words : precision stage (정밀 스테이지), working principle(구동원리), FEM(유한 요소법), eigenvalue(고유치), virtual stage(가상 스테이지)

ABSTRACT

Recently, a precision stage is widely used in the fields of the nano technology. In this paper, the precision stage which consists of linear motor, vision system, light source system and controller, is designed and developed for nano imprint machine. Stiffness design considering resonance frequency is important for the precision stage. A virtual machine simulation is useful for machine development the early design stage. Kinematic and dynamic simulations of XYZ stage are performed. To consider the resonance frequency and vibration effects flexible multibody dynamics are utilized with FE modeling of the structural components.

1. 서 론

최근 들어 반도체 산업이 성장함에 따라 그 제조 장비인 정밀 스테이지의 개발도 활발히 이루어지고 있다. 그러나 국내에서는 반도체 개발 초기부터 메모리 소자 개발에만 집중했기 때문에 국내의 반도체 제조 장비 및 부품 생산 산업은 매우 취약하다.

나노급 반도체 신제품의 개발을 위해서는 메모리 제조 기술의 개발에 앞서 이를 제조하는 기술이 우선적으로 개발 되어야 한다. 또한 제조 장비는 수입에 의존하고 있으므로 뛰어난 메모리 개발을 위해서 국내에서 자체적으로 제조 장비의 국산화가 매우 시급하다고 할 수 있다.

고정밀도를 갖는 스테이지를 개발하기 위해서는 우선 작업 기간 동안 발생할 수 있는 구조적인 충돌이나 스테이지 자체적으로 발생하는 변형 등의 문제점을 시뮬레이션을 통해 확인한 후 보완하

여 충분한 안정성을 확보하여야 한다.

본 연구의 목적은 정밀 스테이지의 국산화를 위하여 CAE 를 활용하여 스테이지의 기구 동역학적 해석을 수행하여 안정성을 확보하는데 있다. 연구를 수행하기 위해 단순 강체 모델링을 통해 구동 원리를 파악한 후 기본 구동원리를 확립한다. 그 결과를 바탕으로 실제적인 스테이지 모델링을 수행하고, 파악된 구동 원리를 스테이지 모델에 적용하여 모델링을 완성하여 실제적인 구동을 구현한다. 그 다음으로 모델의 동역학적 해석을 위해 모델링 된 구동기에 모션을 삽입하고 시뮬레이션을 수행하여 결과를 알아본다. 또한 고유치 해석을 통해 고유 주파수를 얻어내어 공진 회피 설계를 위한 설계 자료로 활용한다.

본 논문에서는 위와 같은 연구 과정을 통해 스테이지 구성품을 모델링하였고 그 결과의 검증을 위하여 FEM 해석을 수행하였다. 모델링의 결과를 사용하여 기구의 고유 주파수를 구해내어 3 축 스테이지의 설계 지표를 확립하였고, 그 결과로 초정밀 3 축 스테이지를 개발하였다.

† 국민대학교 자동차공학 전문대학원

E-mail : jujaehwan@gmail.com

Tel : (02) 914-8812

* 국민대학교 기계자동차 공학부

2. 스테이지의 구동 원리

2.1 단순 강체 모델

3 축 (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.

(1) 기본 동작 원리

Fig. 1은 3축 스테이지의 기본 구동 원리를 나타낸다. 3축 제어를 위해 3개의 구동기가 필요하며 각각의 작용에 의해 2축 병진, 1축 회전 운동을 제어한다. 본 연구에서는 기본 구동 원리를 이용하여 연구 목적에 맞는 구동 원리를 개발하였으며 Fig. 2에서 보여준다.

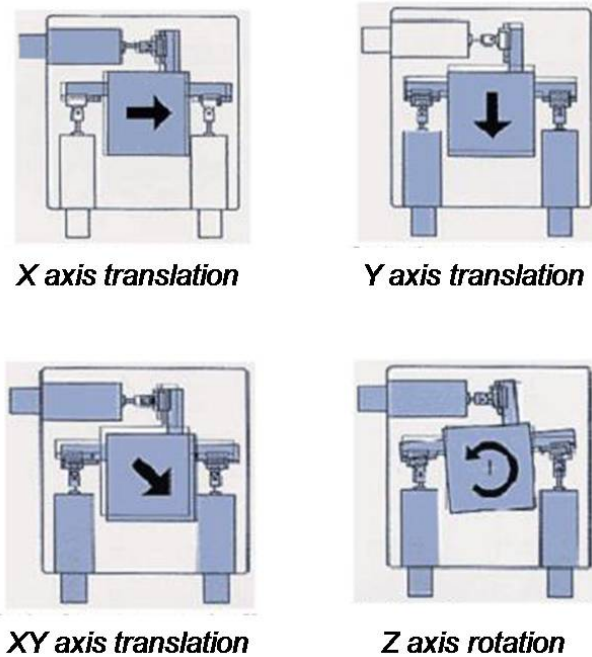


Fig.1 3축 스테이지의 기본 동작 원리

조인트 구성을 나타내는 Fig.2에서 편의상 X축 구동기는 U 구동기, Y축 구동기는 V, W로 나타내기로 한다.

구동 원리는 다음과 같다.

X축 병진: U 구동기만 단독으로 작동하며 V, W 구동기는 작동을 하지 않고 끝 단의 병진조인트가 움직이게 된다.

Y축 병진: V, W 구동기가 서로 반대 방향으로 작동을 하며 구동 범위는 서로 같다. X축 구동과 유사하게 U 구동기 끝 단에서는 병진 조인트가 움직인다.

Z축 회전: Z축 회전 운동을 만들기 위해서는 U, V, W 세 종류의 구동기가 동시에 작동을 하며 끝 단의 회전 조인트가 작동하게 되어 회전 운동을 만들어 낸다.

Fig. 2에서 나타내는 기구학적 조인트 구성은 상용 동역학 해석 프로그램을 이용하여 가상 시스템을 구축하고 시뮬레이션 하는데 매우 중요한 정보를 제공한다.

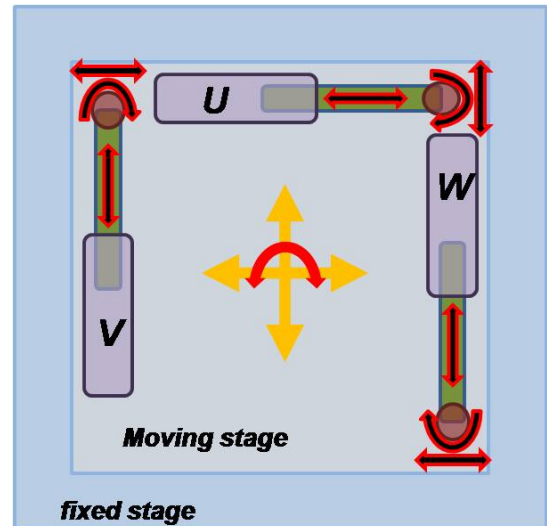


Fig.2 3축 스테이지의 기구학적 조인트 구성

2.2 가상 스테이지 모델

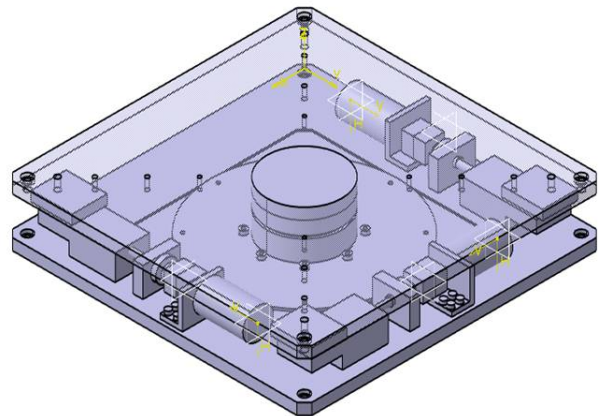


Fig. 3 가상 스테이지 모델

Fig 2. 의 구동 원리를 바탕으로 3 축 스테이지를 상용 3D 모델링 프로그램을 이용하여 Fig. 3 과 같이 가상 스테이지 모델을 구성하였다.

Fig.3 에서는 스테이지 모델의 단순화를 위해 실제 스테이지에 추가되어지는 진공 흡착판, 중간 판 등은 보이지 않게 설정해 놓았으며 실제 해석을 진행할 때에는 결합된 상태에서 해석을 수행한다.

3. 스테이지의 고유치 해석

3.1 절 고유 진동 해석

정밀 스테이지는 육안으로 관찰하기 힘들 정도의 정밀한 움직임에 갖는 기구 장치이다. 따라서 미세한 진동도 스테이지의 정밀도에 큰 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 선형 모터를 사용하여 구동을 제어하게 되는데 모터가 갖고 있는 주파수 영역을 회피하여 설계하는데 주안점을 둔다. 스테이지의 전체 구성은 Fig. 4 에 나타냈다.

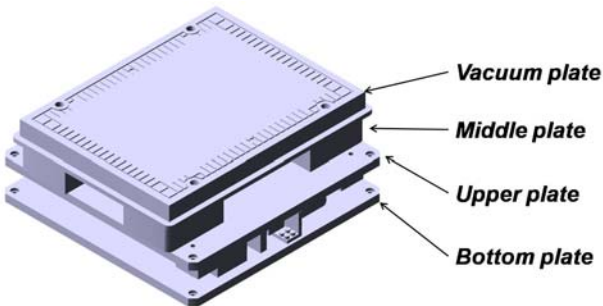


Fig.4 Component of stage

고유 진동 해석은 각 파트별로 구분하여 각 파트가 미치는 영향을 알아보기 위해 고유 진동수 해석을 수행하였다. 각각 해석에서 강제 모드를 포함해서 15 개 모드를 추출했으며 강제 모드 이후의 변형만을 알아보았다. 해석 결과는 Fig. 5~8, 에 나타냈으며 0.29 의 포아송비, 20500N/mm²의 영률 계수, 7.85E-09Ns²/mm⁴의 질량 밀도를 갖는 물성치 조건을 주었다. 또한 스테이지 구동에 사용된 선형 모터의 정격 회전수는 3000rpm으로 식(1)에 의해 주파수로 변환하면 모터는 314.15Hz의 주파수를 발생시킨다.

$$1\text{rpm} = (1\text{rev}/1\text{m}) * (2\pi \text{rad}/\text{rev}) * (1\text{m}/60\text{sec})$$

식(1)

(1) 진공 흡착판

진공 흡착판은 작업 공정에서 LCD 패널이 직접 올라가는 부분으로 진동이 미치는 영향이 매우 큰 부분이다.

해석결과 진공 흡착판의 고유 진동수가 모터의 가진 주파수 영역을 벗어나 있으므로 모터에 의한 공진은 일어나지 않는다.

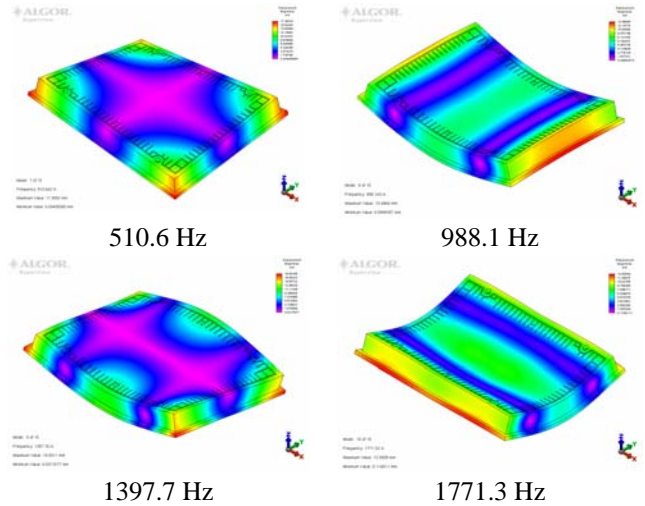


Fig.5 Normal mode Analysis for Vacuum plate

(2) 중판

중판은 진공 흡착판과 상판을 연결하는 부분으로 이 부분의 진동이 진공 흡착판에 상당한 영향을 미치는 것을 Fig4 에서 판단할 수 있다.

중판의 고유 진동수도 모터의 가진 주파수 영역을 피해 있으므로 모터에 의한 공진은 발생하지 않을 것으로 판단된다.

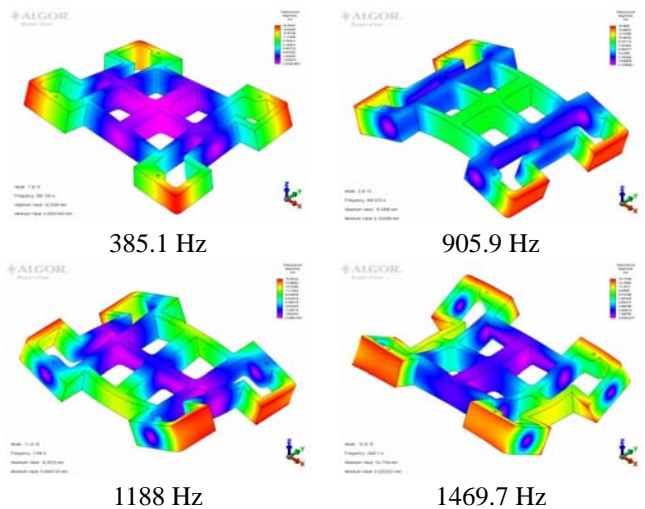


Fig.6 Normal mode Analysis for Middle plate

(3) 상판

상판은 스테이지의 구동을 중판에 전달하는 역할을 하는 부분으로서 모터에서 발생하는 가진력을 가장 크게 받는 부분이라 여겨진다.

해석 결과를 보면 진공 흡착판과 중판에 비해 낮은 주파수 영역에서 변형이 나타나지만 이 영역대도 상당히 높은 편에 속하고 모터의 가진 주파수 영역을 피해있기 때문에 공진은 발생하지 않을 것이다.

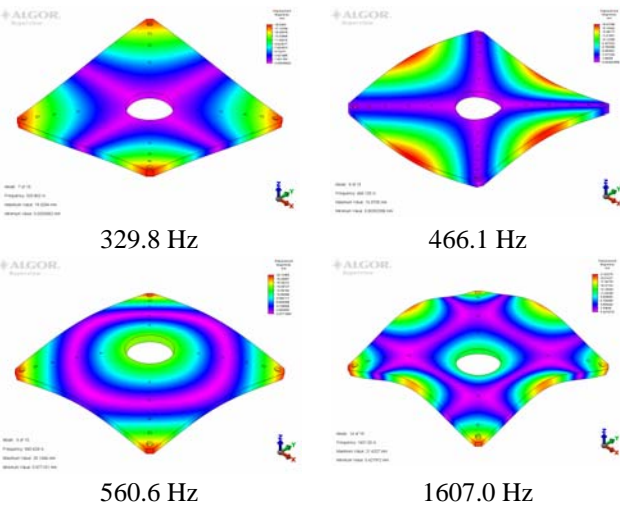


Fig.7 Normal mode Analysis for Upper plate

(4) 회전부

회전부는 스테이지 장비의 모터와 플레이트를 직접 연결하는 부분으로 충분한 강성 확보가 필요한 부분이다 특히 다른 파트와 연결되는 부분의 변형은 장비의 정밀도에 큰 영향을 미치므로 정확한 해석을 필요로 한다.

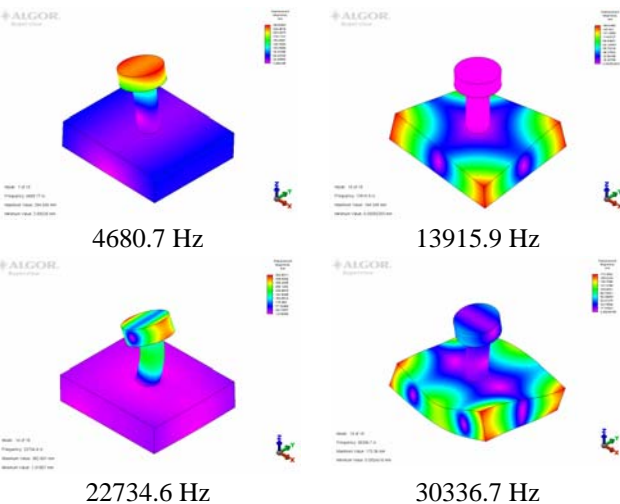


Fig.8 Normal mode Analysis for Rotator

해석 결과를 보면 상당히 높은 주파수 영역대를 보이고 있으므로 공진에 의한 변형을 없을 것으로 판단된다.

(5) 전체모델

각각의 파트에 대한 해석 결과를 바탕으로 전체 모델에 대한 고유 진동수 측정을 수행하였다. 파트별 해석 결과에 비해 상당히 높은 고유 진동수를 나타내었으며 이는 전체 질량이 증가함에 따라 고유 진동수가 증가한 것으로 파악된다.

모델의 변형 양상은 Fig. 9 에 나타냈다.

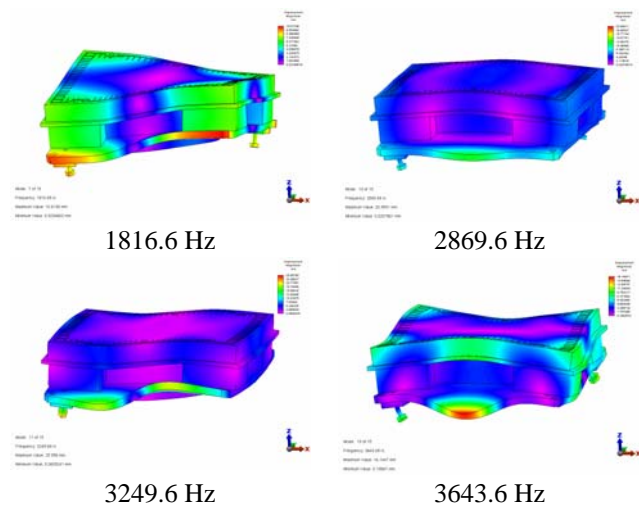


Fig.9 Normal mode Analysis for Whole model

고유 진동수 대역을 살펴보면 모터에 의해 발생하는 주파수의 범위를 벗어나 있으므로 모터의 가진 주파수에 의한 공진은 발생하지 않을 것이며 그 결과 안정된 시스템이라 판단할 수 있다.

4. 스테이지의 동역학 해석

4.1 절 동역학 시뮬레이션

본 연구에서 제작하는 스테이지는 매우 정밀한 구동을 요구하는 시스템이므로 모델링 된 결과를 바탕으로 하는 시뮬레이션을 필요로 한다. 시뮬레이션 결과로 각 구동기의 force 와 stroke 를 측정하였다.

시뮬레이션은 상용 동역학 해석 프로그램을 이용하였으며 X 축 구동은 U 구동기에서 측정하였

고 Y, Z 축 구동은 각각 V, W 구동기에서 측정하였다. 시뮬레이션 시간은 총 30 초 동안 이루어졌고 0 초부터 10 초 구간은 X 축 병진, 10 초부터 20 초 구간은 Y 축 병진, 20 초부터 30 초 구간은 Z 축 회전 구동이 이루어졌다.

스테이지 해석 모델은 Fig. 10 에 나타내었으며 상단에는 진공 흡착판이 위치해 있으며 하단에는 선형 모터 등 구동부 및 프레임 고정판이 위치해 있다.

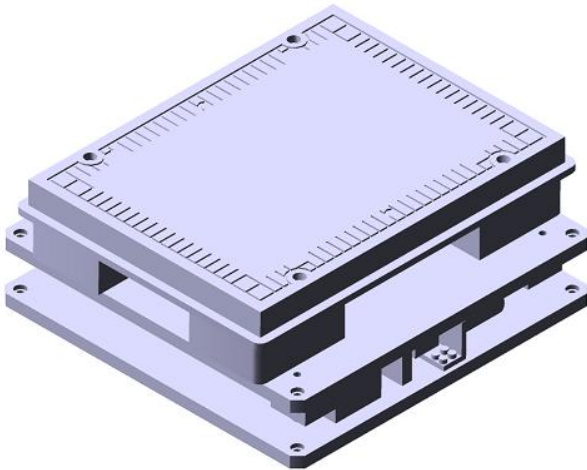


Fig.10 Analysis Model

(1) 3 축 force

스테이지의 구동기에서 각 축마다 force 를 측정 한 결과를 Fig. 11 에 나타내었다. U 구동기에서 중반 이후에 force 가 미소하게 측정된 원인은 회전 운동시에 V, W 구동기의 상호 작용으로 구동이 가능하기 때문인 것으로 판단된다.

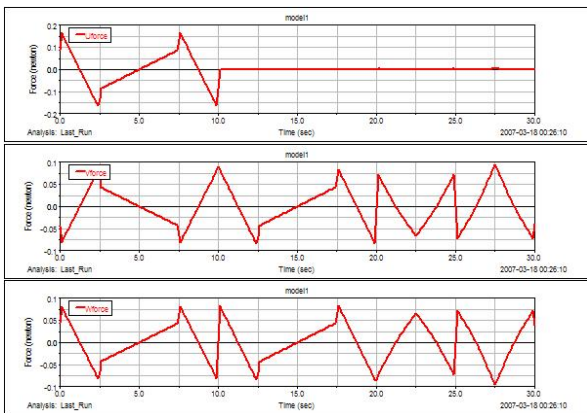


Fig.11 Force of Individual Actuator

(2) 3 축 Stroke

각 구동기의 stroke 는 Fig. 12 와 같다. 2.1 절에서 설명했듯이 X 축 병진 운동을 할 때에는 V, W 구동기의 stroke 는 0 이고 Y 축 병진 운동을 할 때에는 U 구동기의 stroke 가 0 을 나타낸다. 또한 Z 축 회전 운동이 일어날 때에는 세 축의 구동기에서 stroke 가 발생한다.

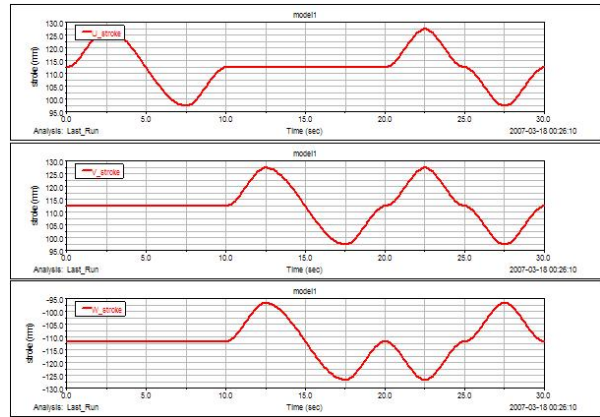


Fig.12 Stroke of Individual Actuator

5. 스테이지 제작

5.1 절 가상 스테이지

(1) 가상 스테이지 장비

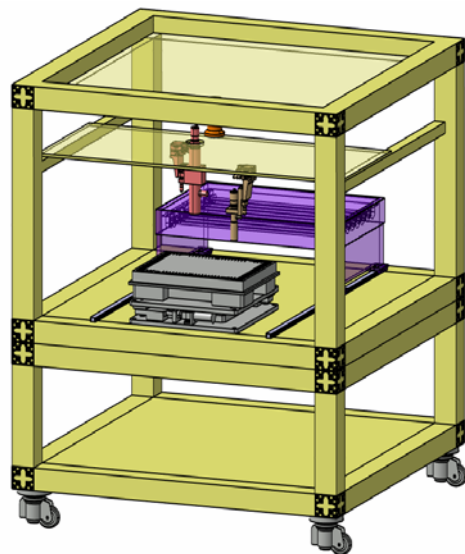


Fig. 13 Virtual Stage Equipment

본 연구의 목적에 맞는 스테이지를 개발하기 위해 여러 해석 과정을 거쳐 Fig. 13 과 같은 스

테이지 모델을 완성하였다. 스테이지 장비에는 스테이지뿐만 아니라 비전 시스템(vision system), 광원 장치(light source system) 및 프레임이 추가되어 있다.

5.2 절 실제 스테이지

(1) 실제 스테이지 장비

실제 정밀 스테이지 장비는 가상 스테이지 장비를 바탕으로 제작되었다. 스테이지는 프레임 공간 안에 위치해 있으며 개발된 스테이지는 Fig. 14 와 같다.



Fig. 14 Real Stage Equipment

6. 결 론

본 연구에서는 정밀 제어가 가능한 스테이지를 선형 모터를 사용하여 제작하였고 전체 스테이지 장비를 구성하였다.

- 1) 스테이지의 구동 원리를 분석하여 본 스테이지 제작에 이용하였으며 스테이지 장비의 국산화를 위해 장비의 구동 원리를 확립하여 명확한 설계 기준을 제시하였다.
- 2) 스테이지 각 파트별로 고유치 해석을 통해 고유 주파수 값을 얻었으며 구동기에서 발생하는 공진 주파수를 피하는 공진 회피 설계를 실시하였다.
- 3) 스테이지 전체 모델을 이용한 기구 동역학 해석을 통해 기구 작동의 안정성과 구동기의 역할을 파악하였으며 세 개의 구동기에서 force 와 stroke 를 측정하여 설계에 반영하였다.

본 연구를 통해 정밀 스테이지를 개발하였으며

스테이지 구성품이 충분한 강성을 갖고 있음을 확인하였다.

현재 상세 성능을 측정하기 위한 실험이 진행되고 있다.

후 기

본 과제는 서울시 산학연 클러스터사업(나노공정 및 장비개발 혁신클러스터 사업)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) 강윤석 등, 2006, "CAE 를 이용한 나노 임프린팅 공정 장비의 구조 및 기구 동역학 해석"
- (2) 박종성 등, 2006, "초정밀 스테이지의 강인 제어", 대한 기계학회 논문집 A 권, 대한 기계학회, pp. 1094~1101
- (3) 이성준 등, 2004, "SPM 나노 스테이지의 거동 특성에 관한 연구", 추계학술대회 논문집, 한국기계가공학회, pp. 128~131.
- (4) M.K. Varadarajan and M.L. Culpepper, 2006, "A dual-purpose positioner-fixture for precision six-axis positioning and precision fixturing—Part I: modeling and design", *Precision Eng.*
- (5) Varadarajan KM, Culpepper ML. "A dual-purpose positioner-fixture for precision six-axis positioning and precision fixturing—Part II: Characterization and calibration.", *PrecEng*, in press.
- (6) J.B. Taylor and J.F. Tu, 1996, Precision X-Y microstage with maneuverable kinematic coupling mechanism, *Prec Eng* **18**, pp. 85–94.
- (7) M.L. Culpepper and G. Anderson, 2004, "Design of a low-cost nano-manipulator which utilizes a monolithic, spatial compliant mechanism", *Prec Eng* **28**, pp. 469–482.
- (8) B.J. Choi, S. Sreenivasan, S. Johnson, M. Colburn and C.G. Wilson, 2001, "Design of orientation stages for step and flash imprint lithography", *Precision Eng.* **21**, pp. 192–199.