

평면 X-Y 스테이지의 초정밀 위치결정을 위한 최적 설계 및 제어시스템 개발

한재호*(승원대 자동차과), 김재열(조선대 기계공학부), 심재기(조선대 기계공학부),
김창현(조선대 대학원 정밀기계공학과), 조영태(전주대학교), 김항우(승원대 자동차과)

The Development of Optimal Design and Control System for Ultra-Precision Positioning on Single Plane X-Y Stage

J. H. Han(Automobile Engineering. Dept. SWC), J. Y. Kim(Mechanical Eng. Dept., CSU),
J. G. Sim(Mechanical Eng. Dept., CSU), C. H. Kim(Graduate School., CSU),
Y. T. Cho(JJU), H. W. Kim(Automobile Engineering. Dept. SWC)

ABSTRACT

After the industrial revolution in 20 century, the world are preparing for new revolution that is society with knowledge for a basis such as IT(Information Technology), NT(Nano Technology) and BT(Bio Technology). Recently, NT is applied to various fields that are composed of science, industry, media and semiconductor-micro technology. It has need of IT that is ultra-precision positioning technology with strokes of many hundreds mm and maintenance of nm precision in fields of ultra micro process, ultra precision measurement, photo communication part and photo magnetic memory.

This thesis represents optimal design on ultra-precision positioning with single plane X-Y stage and development of artificial control system for adequacy of industrial demand. Also, dynamic simulation on global stage is performed by using ADAMS (Automated Dynamic Analysis of Mechanical System) for the purpose of grasping dynamic characteristic on user designed X-Y global stage. The error between displacements from micro stage and from FEM(Finite Element Method) is 3.53% by verifications of stability on micro stage and control performance. As maximum Von-mises stress on hinge of micro stage is 5.981kg/mm² that is 1.5% of yield stress, stability on hinge is secured. Preparing previous results, optimal design of micro stage can be possible, and reliance of results with FEM can be secured..

Key Words : Nano Technology(나노 기술), Ultra-Precision Positioning on Single Plane X-Y Stage (초정밀 평면 X-Y 스테이지), Optimal Design (최적설계), Simulation (시뮬레이션), FEM(유한요소 해석)

1. 서론

21 세기로 접어들면서 세계는 산업사회 이후에 지식기반 사회라는 새로운 혁명을 준비하고 있으며, 세계의 관심은 정보기술(Information Technology), 나노기술(Nano Technology), 생명기술(Bio Technology)에 집중되고 있다. 특히 나노기술은 다양한 분야에 적용되는 기술로서 기술의 용도도 각각 다를 뿐만 아니라 과학, 산업, 미디어 등의 분야에 서로 다르게 받아들여진다. 당초 반도체 미세기술을 극복하는 대안으로 연구가 시작된 나노기술은 전자와 정보통신

신·기계·화학·생명·에너지 등의 거의 모든 산업에 응용할 수 있어 인류 문명을 획기적으로 바꿀 기술로 떠올랐다.⁽¹⁾

이러한 나노기술을 구현하는 데 가장 중요한 기술로는 초정밀 위치결정기술(Ultra-precision positioning)로서 이는 기계, 전자, 광학, 제어, 설계, 가공에 대한 복합적인 기술을 사용하여 구현하게 된다. 초정밀위치결정 기술은 현재 물리학 분야에서 사용되고 있는 STM(Scanning Tunneling Microscopy)나 AFM(Atomic Force Microscopy)은 수 마이크로미터의 작은 영역에서 단위원자(Single

atom) 수준의 초미세 측정과 조작을 가능하게 하였다. 그러나 산업계에서는 극미세가공, 초정밀측정, 반도체 웨이퍼, 광통신 부품과 광자기메모리 분야에서 고정밀화 및 대형화 추세에 따라 mm급의 정밀도를 유지하면서 수백 mm의 긴 스트로크를 갖는 초정밀위치결정 기술을 요구하고 있어, 이에 대한 기반기술 확보가 시급한 실정이다.⁽²⁾

2. 초정밀 평면 X-Y 스테이지의 최적 설계

2.1 글로벌 스테이지의 동적 시뮬레이션

본 연구에서 고안한 평면 X-Y 스테이지를 ADAMS(Automated Dynamic Analysis of Mechanical System) Software를 이용하여 모델링 하였다. 평면 X-Y 스테이지의 주요 구성요소인 볼스크류, 더블너트, 트러스트 베어링, LM(liner motion) 가이드, 이송테이블, 모터 축의 각 특성을 고려하여 시뮬레이션 시스템을 구성하여, 그 운동 특성을 연구하였다.

본 모델에서 볼스크류와 더블너트는 원주로 모델링 한 다음 Screw Joint 및 Cylindrical Joint로 제안하였고, 트러스트 베어링은 사각형 블록에 회전방향의 운동만 허용하고 다른방향의 운동은 구속하는 Rotaional Joint로 구성하였다. 단 볼스크류의 백러쉬 및 LM 가이드에서의 마찰은 없는 것으로 가정하였으며, 모터 동역학은 포함하지 않았다.

Fig. 1은 ADAMS에서 모델링 한 평면 X-Y 스테이지이다.

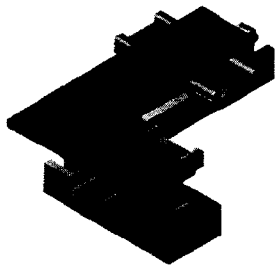


Fig. 1 Modelling of Ultra-precision single plane X-Y stage using ADAMS

본 모델의 동적 거동을 살펴보기 위하여 Fig. 2와 같이, X축을 10mm 이동시킨 다음 Y축을 10mm 이동시켜 보았다. 이에 대한 동적 상태량을 Fig. 3 ~ Fig. 6과 같이 나타냈다. 여기서 각 축의 변위량과 속도의 응답은 선형적임을 알 수 있었다.

따라서 본 논문에서 고안한 평면 타입의 글로벌 X-Y 스테이지의 기구학적인 문제점은 없는 것으로 사료되어, 본 모델을 기초로 하여 글로벌 스테이지 설계에 이용하였다.

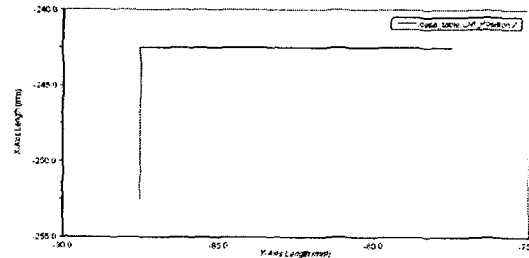


Fig. 2 X-Y displacement of ADAMS model

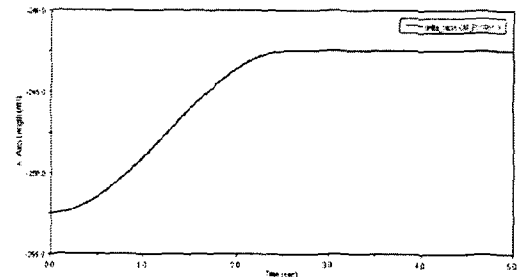


Fig. 3 X-Axis displacement of ADAMS model

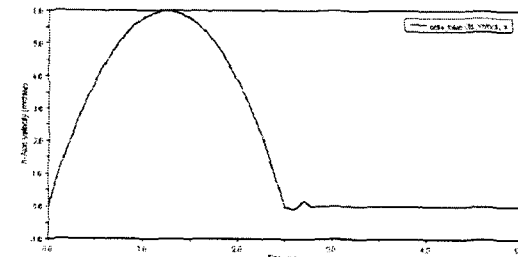


Fig. 4 X-Axis velocity of ADAMS model

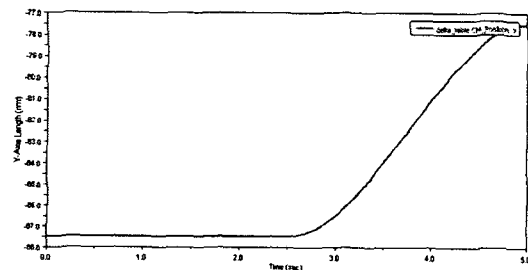


Fig. 5 Y-Axis displacement of ADAMS model

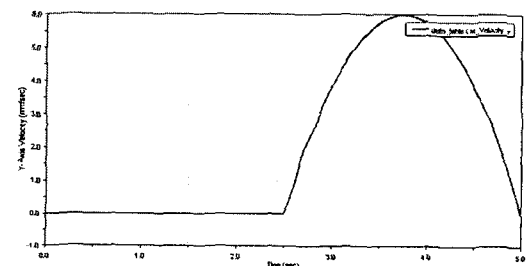


Fig. 6 Y-Axis velocity of ADAMS model

2.2 마이크로 스테이지 유한요소 해석

마이크로 스테이지의 탄성힌지부의 안정성 및 변위특성을 파악하기 위하여 3 차원유한요소해석을 실시하였으며, 물성치(Material property)는 탄성체로 고려하여 해석하였다. 또한 압전소자에서 가해지는 힘은 선 접촉으로 간주하여 하중을 작용시켰다.

유한요소해석 모델링은 상용 유한요소해석 프로그램인 MARC 사의 MENTAT 를 활용하였으며, 해석은 MARC 를 사용하였다. 마이크로 스테이지에 적용된 경계조건은 스테이지의 외곽은 고정되었으며, 압전소자가 놓여지는 부분에 압전소자의 변위를 변화시키면서 가하게 된다. 본 연구에서 이용된 마이크로 스테이지의 재료에 대한 물성(material property)은 Table 1 과 같다

Table 1 Material property

material	Young's modulus	Poisson's ratio	Mass density	Yield strength
Duralumin	6,700	0.35	2.6×10^{-6}	7

※ units : kg f/mm² for modulus and strength

Fig. 7 은 본 연구에 사용된 마이크로 스테이지의 3 차원 모델이며, 특히 힌지부분에 대해서는 상세 요소분할을 실시하였다. 모델의 크기는 37,634 개의 절점(Nodal points)과 17,160 개의 3D Solid 요소(Elements)로 모델링하였다. 압전소자의 전압가전부위에 절점변위를 가하였으며, 마이크로 스테이지 중심점에서의 변위 이동량을 검토하였다.

Fig. 8 은 압전소자의 변위를 최대로 주었을때의 힌지부분에서 발생하는 변위량을 500 배로 확대한 결과이며, Part "A"에서 가장 큰 변형을 보이고 있어 향후 피로파괴의 주요부분으로 예상된다. Fig. 9 는 본 시스템의 개략도이다.

본 연구에서는 압전소자(PZT)에 0V ~ 100V 의 전압을 주어서 발생하는 변위를 레이저 인터페로미터로 측정하였으며, 이 데이터를 유한요소 3D 모델에 적용 해석하였다. 이때 3D 유한요소 모델의 중심점에서 변화되는 변위를 실제 마이크로 스테이지의 변위와 비교하여 유한요소해석 결과의 타당성을 검증하고자 하였다.

Fig. 10 은 압전소자, 유한요소해석, 마이크로 스테이지의 히스테리시스 곡선과 유한요소해석값 대 마이크로스테이지의 히스테리시스 편차값을 도시한 그래프이다. Fig. 10 에서 나타낸바와 같이 FEM 결과와 실제 마이크로 스테이지를 구동하였을 때의 변위결과가 유사하게 출력되었음을 알 수 있었으며, 이것의 오차값은 3.53% 였다. 따라서 본 연구에서 수행한 유한요소해석의 타당성을 검증하였으며, 이러한 유한요소해석과 실제 마이크로 스테이지 구동

시의 결과값 비교에서 볼 수 있듯이 신뢰성을 갖는 최적의 모델을 설계할 수 있었다.

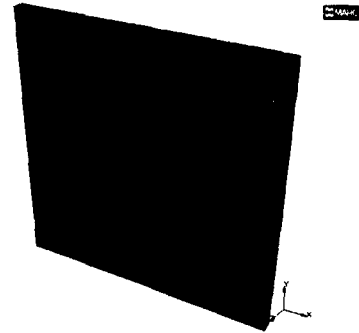


Fig. 7 FEM model for Micro Stage

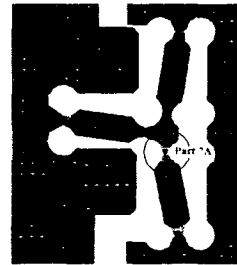


Fig. 8 Maximum displacement for Micro Stage

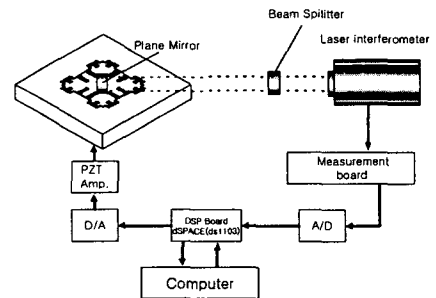


Fig. 9 Schematic Diagram of Ultra Precision Positioning System

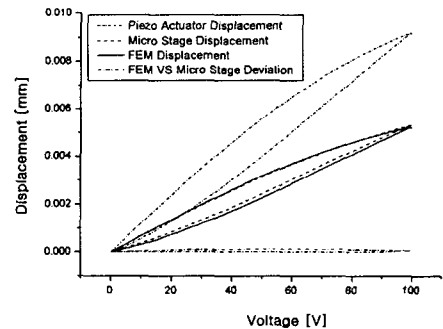


Fig. 10 Hysteresis curve of Piezo Actuator, FEM and Micro Stage, Deviation curve of FEM vs Micro Stage

3. 시스템 구성 및 구동 프로그램

본 시스템에서 위치결정을 위한 변위측정은 레이저 인터페로미터(RENISHAW ML10)를 이용하여 측정하였고, 제어시스템으로는 디지털 신호처리시스템(DSP, dSPACE ds1103)을 사용하였다. 변위 측정시 레이저 인터페로미터 출력 신호를 A/D 변환하여 DSP의 메인 CPU에서 연산처리한 후 D/A 변환을 하여 글로벌 서보(MISUBISHI MR-J2S)와 마이크로 서보(THORLABS MDT693)에 입력한다. 본 시스템의 실험 장치도를 Fig. 11에 나타내었고, Fig. 12는 본 시스템의 사진을 나타낸 것이다.

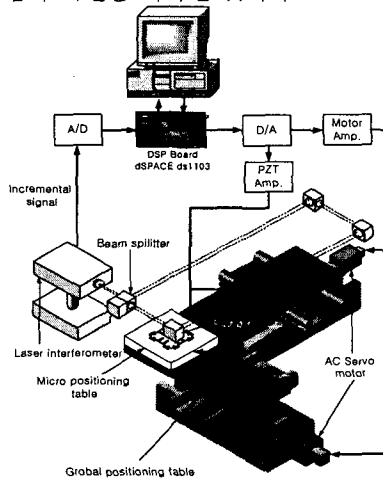


Fig. 11 Schematic diagram of Ultra-precision single plane X-Y stage

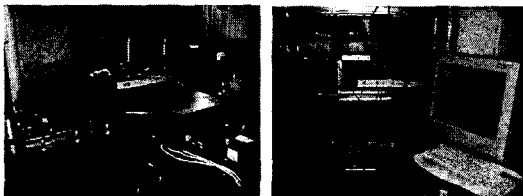


Fig. 12 Photograph of Ultra-precision single plane X-Y stage

초정밀 평면 X-Y 스테이지의 구동 프로그램은 MATLAB SIMULINK의 Real Time Workshop 블록과 dSPACE에서 제공하는 RTI 블록을 사용하여 제어 알고리즘을 작성하고, ControlDesk로 다운로드하여 Layout에 각 파라미터를 정의하여 구동 프로그램을 구성하였다. 프로그래밍 과정은 Fig. 13과 같다.

Fig. 14는 제어알고리즘을 Matlab Simulink에 그대로 모사한 것이다. Fig. 15는 Fig. 14의 시뮬링크를 ControlDesk에 다운로드하여 레이아웃을 구성한 뒤 각 제어 파라미터들을 링크하고 실제 시스템을 구동하는 화면이다.

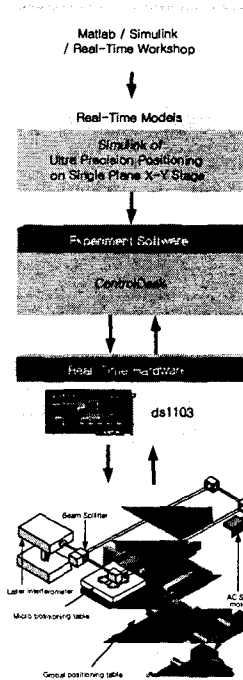


Fig. 13 Flowchart of control programming for Ultra-precision single plane X-Y stage

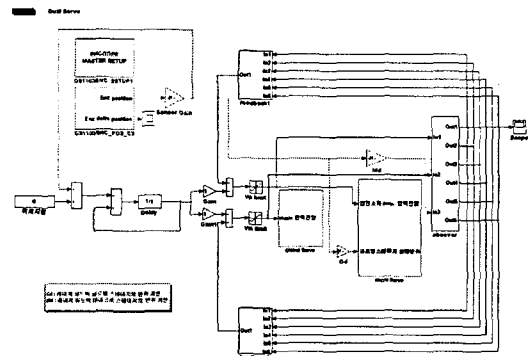


Fig. 14 RTI Simulink of dual servo

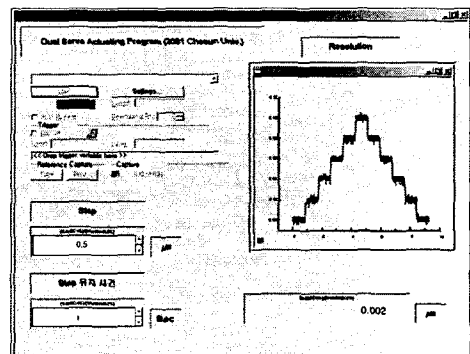


Fig. 15 Resolution layout of ControlDesk for dual servo

4. 결론

본 논문에서 이루어진 평면 X-Y 스테이지의 초정밀위치결정을 위한 최적설계 및 제어시스템 개발에 관한 세부 연구 내용과 결과는 다음과 같다

1. 본 연구에서 고안된 평면 X-Y 글로벌 스테이지(Global stage)의 운동 특성을 파악하기 위하여 ADAMS(Automated Dynamic Analysis of Mechanical System)를 이용한 글로벌 스테이지의 동적 시뮬레이션을 수행하였으며, 두 유닛간의 상대운동에 영향이 없음을 확인하여 설계의 타당성을 검증하였으며, 글로벌 서보기구의 조합이 타당하였음을 확인하였다.

2. 마이크로 스테이지의 안전성과 제어성능 파악을 위하여 유한요소해석을 실시한 결과 마이크로 스테이지 내에서 검출되어지는 변위와 유한요소해석 결과의 오차값은 3.53%로 나타났으며, 마이크로 스테이지의 힌지부분에서의 최대 등가응력은 5.981 kg/mm²으로 나타나 항복강도의 1.5%에 지나지 않아 탄성힌지부의 안전성은 확보되었다. 이러한 유한요소해석과 실험을 통한 결과값 비교·분석에서 볼 수 있듯이 마이크로 스테이지의 최적 모델을 설계할 수 있었으며, 유한요소해석 결과의 신뢰성을 확보하였다.

3. Matlab Simulink 와 dSPACE 의 ControlDesk 를 이용하여 실시간 초정밀위치결정 프로그램을 구성하였으며, 평면 X-Y 스테이지 초정밀위치결정시스템을 구축하였다.

후 기

본 논문은 과기부 과학재단지정 지역협력 연구센터인 레이저응용신기술연구센터의 2002 년도 연구비 지원에 의해 연구되었음.

참고문헌

1. 이조원, "10 억분의 1nano 가 여는 세상 - 나노기술", 사이언스 어드벤처 제 11 회 강연회 2001
2. 김현탁, "하드디스크장치에서 자기저항 효과형 자기헤드 기술 동향", ETRT, 1999. 5
3. Simokohbe 외 2 인, "Control performance of Lead screw Positioning with Intelligent Control Methods", 日本 精密工學誌 vol. 64. No. 11, p.1627~1632, 1998.
4. Benjamin C. Kuo, "Automatic Control Systems" Prentice Hall. Englewood Cliffs. N. J 07632, p689~

699, 1994

5. Kaiji SATO 외 5 인, "Performance Evaluation Lead screw Positioning System with Five Kinds of Control Methode(2nd Report)", 日本 精密工學誌 vol. 63. No. 12, p.1759~1763, 1997
6. Thomas J. R. Hughes, "The Finite Element Method" Prentice-Hall International Editions, p90~91, 1987.
7. MARC Analysis Research Corporation manual, VOLUME A, VOLUME B, VOLUME C, VOLUME D, 1994.
8. 김재열, 윤성훈, 한재호, 박이구, 김항우 "유한요소법을 이용한 초정밀 미동스테이지 설계에 관한 연구 (1)", 한국정밀공학회 춘계발표논문집, 2001
9. 김재열,한재호, 김항우,유신, 박이구, "마이크로 스테이지의 유한요소법을 이용한 최적설계와 초정밀 위치제어에 관한 연구" 한국정밀공학회 추계발표논문집, 2001