

초정밀 평면 X-Y 스테이지의 시뮬레이션 및 제어성능 평가

박기형⁺, 김재열*, 곽이구⁺⁺

(논문접수일 2002. 7. 18, 심사완료일 2002. 9. 9)

Simulation and Control performance evaluation of Ultra-Precision Single Plane X-Y Stage

Ki-Hyung Park⁺, Jea-Yoel Kim*, Lee-Ku Kwac⁺⁺

Abstract

In this study, actuator, sensor, guide, power transmission element and control method are considered for ultra-precision positioning apparatus. Through previous process, single plane X-Y stage with ultra-precision positioning is manufactured. Global stage for the purpose of materialization with robust system, is combined by using AC servo motor and ball screw and rolling guide. And ultra-precision positioning system is developed by micro stage with elastic hinge type and piezo element. global servo and micro servo for the purpose of materialization positioning accuracy with nm(nanometer) are controlled simultaneously by using incremental encoder and laser interferometer as displacement measurement sensor. Through previous process, ultra-precision positioning system(100mm stroke and ± 10 nm positioning accuracy) with single plane X-Y stage are materialized.

Key Words : Laser Interferometer(레이저 간섭계), Piezoelectric Actuator(압전소자), Fine Positioning(미동 위치결정), Coarse Positioning(조동 위치결정), Resolution(분해능), DSP(digital signal processing), Simulation(시뮬레이션), Matlab Simulink, PID Controller

1. 서론

21세기로 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 나노기

+ 조선이공대학 기계공학부

* 주저자, 조선대학교 기계공학부 (jykim@chosun.ac.kr)

주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375번지, Tel: 062-230-7035

++ 조선대학교 대학원 정밀기계공학과

술은 다양한 분야에 적용되는 기술로서 기술의 용도도 각각 다를 뿐만 아니라 과학, 산업, 미디어 등의 분야에 서로 다르게 받아들여진다⁽¹⁾.

반도체 미세기술을 극복하는 대안으로 연구가 시작된 초정밀 위치결정기술은 전자와 정보통신·기계·화학·생명·에너지 등의 거의 모든 산업에 응용할 수 있는 기술적 특성을 지니고 있어, 그 파급 효과가 큰 분야이다. 이러한 초정밀 위치결정기술은 21세기에 접어들면서 산업계에서 nm급의 정밀도를 유지하면서 수백 mm의 긴 스트로크를 갖는 초정밀위치결정 기술을 요구하고 있다⁽²⁾.

따라서 본 논문은 이러한 산업계의 요구를 충족하기 위한 일환으로, 마이크로 스테이지와 글로벌 스테이지를 이용하여 스트로크 100mm, 위치결정 분해능 10nm의 초정밀 위치결정 시스템을 구축하고자 한다.

2. 모델링

본 논문에서 사용된 초정밀 위치결정기구는 글로벌 스테이지와 그 위에 고정시킨 마이크로 스테이지로 구성된다. 글로벌 스테이지의 구성방법은 여러 가지 방식이 있지만, 본 논문에서는 볼나사(Lead Screw) 기구를 이용한 평면 X-Y 델타형 스테이지 방식을 사용하였다. 볼나사기구는 볼스크류(Ball Screw)와 더블 너트(Double Nut)로 구성되어 있고, AC 서보모터(MITSUBISHI MFS-23)와 드라이브에 의해 구동된다. 모터의 회전 운동은 더블너트식 볼스크류(리드 2mm, 외경 19mm)에 의해 직선운동으로 변환되어 글로벌 테이블을 이송한다. 마이크로 스테이지는 탄성힌지 방식을 사용하였으며, 압전소자(THOR-LABS-AE1010D16)에 의해 구동된다. 사용된 계측 및 피드백 센서로는 Laser Interferometer (RENISHAW ML10; resolution 1nm)를 사용하였다.

본 기구의 모델링은 먼저 글로벌 스테이지의 이송나사축 운동방정식, 테이블의 운동방정식, 모터의 회로방정식을 세우고 이를 상태방정식으로 유도하여 전달함수를 구하였다. 또한 마이크로 스테이지의 변위와 압전소자의 변위 관계를 분석하고, 입력전압과 압전소자 양단의 전압관계를 측정하여 방정식을 유도하였다. 이러한 과정으로 마이크로 스테이지의 상태방정식을 유도하여 전달함수를 구하였다.

Fig. 1은 초정밀 평면 X-Y 스테이지의 모델을 나타낸 것이다. A부분은 모터의 전기방정식을 모델링 한 것이며, B부분은 마이크로 스테이지를 등가 질량, 등가 감쇠계수, 등가강성을 가진 시스템으로 모델링 한 것이다. 그리고 C부분

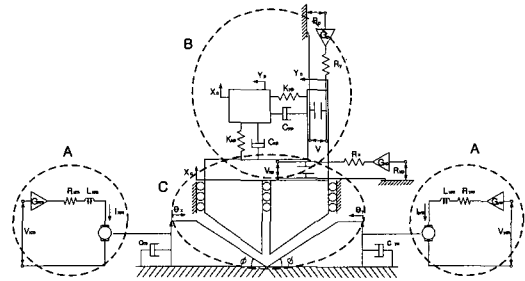


Fig. 1 Modelling of Ultra-precision single plane X-Y stage

은 회전운동을 직선 운동으로 변환하는 스크류 모델과 더블너트의 모델링이다.

3. 최적 제어계 구성

본 논문에서는 초정밀 평면 X-Y 스테이지를 2입력 1출력 시스템이라고 생각하여 현대제어이론을 이용한 최적 제어계를 검토하였다.

고전 제어이론에 의한 시스템 설계는 시행착오에 근거하므로 일반적으로 최적 제어시스템이 되지 못한다. 반면에 상태 공간법에 의한 현대 제어이론을 이용한 시스템 설계는 설계자가 원하는 페루프 극(원하는 특성방정식)을 갖는 시스템이나 주어진 성능지수에 대한 최적 제어 시스템의 설계가 가능하다.

따라서 본 연구에서는 이러한 현대 제어이론의 이점을 이용하여 2입력 1출력의 상태 방정식을 유도하였고, 상태공간법의 최소차수 관측기를 설계하였다.

이렇게 1형 최적 서보계를 설계한다. 설계된 1형 최적제어계에 사용된 6개의 상태 변수 중 x 는 레이저 인터페로메터에 의해 측정할 수 있으며, 나머지의 상태 변수 \dot{x} , v , x_c , \dot{x}_c , i_m 은 최소차수 관측기에 의해 측정 가능하다. 이러한 이론적 근거를

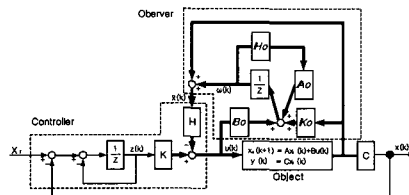


Fig. 2 Block diagram of Ultra-precision X-Y stage using minimum order observer

토대로 시뮬레이션을 반복하여 마이크로 서보의 신장이 포화하지 않고 앰프출력 전류가 포화하지 않는 제어계를 설계하였다.

Fig. 2는 최소차원 관측기의 블록 선도이다.

4. 실험 및 고찰

본 시스템의 초정밀위치결정 실험은 MATLAB SIMULINK를 이용하여 시뮬레이션과 실시간(Real time) 제어가 이루어진다. 실험은 단일서보 실험과 듀얼서보 실험을 수행하였다. 단일서보 제어실험에서는 글로벌 서보와 마이크로 서보 각각 PID 제어를 이용하여 시뮬레이션과 실시간 제어를 실시하였다. 듀얼서보 제어실험은 현대 제어이론을 이용한 최소차수 관측기(Minimum Order Observer)를 적용하여 시뮬레이션과 실시간 제어의 결과를 비교하였다.

듀얼서보는 각 서보의 제어 알고리즘과 PID제어기, 최소차원 관측기가 결합된 구조로 되어 있으며, 이들은 연동되어 작동한다. 시뮬레이션은 글로벌서보와 마이크로 서보의 모델링한 상태방정식을 MATLAB SMULINK에 적용하여 수행하였고, 실시간 제어는 MATLAB SIMULINK에서 작성한 제어 알고리즘을 DSP Board(dSPACE ds1103)를 통해 각 서보에 명령이 지령된다.

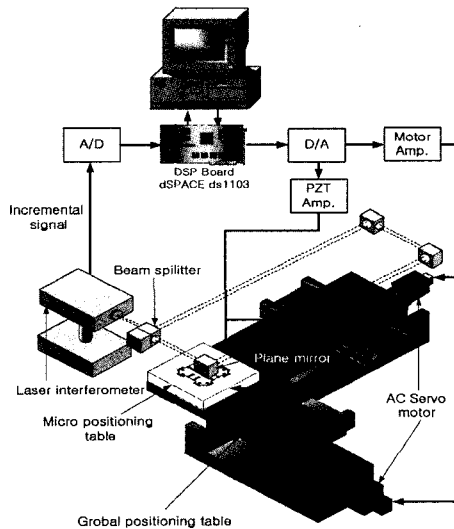


Fig. 3 Schematic diagram of ultra-precision single plane X-Y stage

시뮬레이션을 통하여 모델의 시간영역과 주파수영역을 분석하였고, 본 논문에서 설계한 제어기의 파라미터를 설정하였으며, 제어기의 안정성 및 성능시험을 하였다. 또한 시뮬레이션에서 적용한 제어 알고리즘을 실시간 제어에 그대로 구현하여 실시간 실험과 시뮬레이션 결과를 비교하였다.

본 시스템의 실험 장치도를 Fig. 3에 나타내고 있다. Fig. 4는 글로벌서보와 마이크로서보를 결합한 초정밀 평면 X-Y 스테이지의 사진이다.

4.1 시뮬레이션

글로벌 서보에서 설정한 제어기의 파라미터 값은 다음 Table 1과 같다.

본 시스템의 개루프 주파수 분석은 Fig. 5와 같이 $G_m=96.589dB$, $P_m=\infty \text{ deg.}$, 이득여유 6dB 이상인 반면 위상여유는 60deg.이상이다. 일반적으로 시스템의 안정도 여유는 이득여유가 6dB이상이며 위상여유가 30~60deg.이다. 따라서 위상여유를 보다 작게 하는 제어기의 설계가 필요하므로 개루프 주파수 분석을 통하여 제어기의 파라미터를 설정하였으며, 설계한 PID제어기에 적용한 결과 폐루프(close loop) 주파수 영역은 $G_m=15.314dB$, $P_m=54.704 \text{ deg.}$ 이며, 이득여유가 6dB이상, 위상여유 30~60deg.이다. 따라서 Fig. 6과 Fig. 7같이 주파수영역과 시간영역의 응답에서 좋은 응답을 보여주고 있으므로 PID 제어기를 포함한 본 시스템은 안정하다고 판단된다. Table 2는 글로벌 서보의 시뮬레이션에 대한 스텝응답 특성이다.

Fig. 9와 Table 2에서는 마이크로 서보의 시간영역 스텝응답과 그 분석을 나타내었다. 분석 결과, 시간영역의 응답에서도 만족할 만한 응답을 보여주고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 시뮬레이션 결과를 통하여 마이크로 서보의 PID제어기와 시스템은 안정하다고 판단된다. Table 1에 마이크로서보에 적용한 PID제어기의 파라미터 값을 나타내었다.

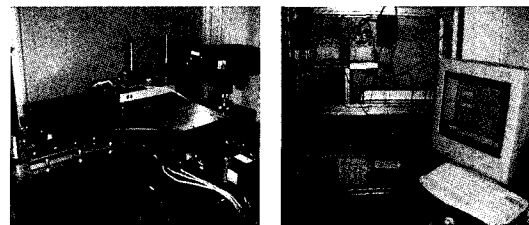


Fig. 4 Photograph of ultra-precision single plane X-Y stage

Table 1 Control parameters of PID controller in global and Micro servo for simulation

Definition	Symbol	global	micro
Proportional gain	β	97500	0.01
Integral gain	γ	$40s^{-1}$	800
Differential gain	α	2000	5×10^7
Sampling time	T	0.0002s	0.0002 s

위와 같이 글로벌 서보와 마이크로 서보의 시뮬레이션을 마친 뒤 이를 결합한 듀얼 서보의 SIMULINK를 구성하였다. 듀얼 서보 시뮬레이션은 2입력 1출력의 상태방정식에 현대제어 이론의 최소차수 관측기를 적용하여 1형 최적 서보계를 구성하였으며, MATLAB SIMULINK에 적용하여

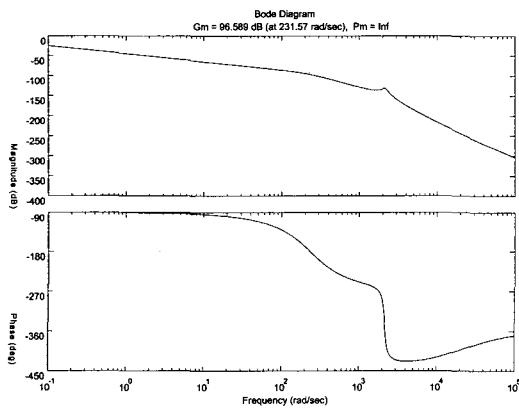


Fig. 5 Bode diagrams of global servo by open loop for simulation

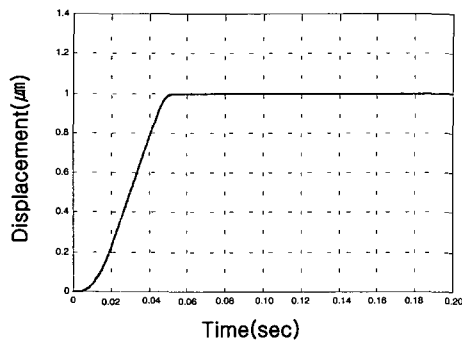


Fig. 7 Step response of global servo for simulation

Table 2 Step response of global and micro servo for simulation

Definition	global	micro
Steady-state error	0	0
Maximum overshoot[%]	0.1(10%)	0.1(10%)
Rise Time[s]	0.047	0.005
Setting Time[s]	0.062	0.0075

수행하였다.

Fig. 10은 듀얼서보 시뮬레이션을 실시하였을 때 글로벌 서보와 마이크로 서보의 듀얼스테이지의 변위와 글로벌 스테이지의 변위를 나타낸 것이다. 여기서 글로벌 스테이지의 오차를 마이크로 스테이지가 보정하면서 시스템이 구동되

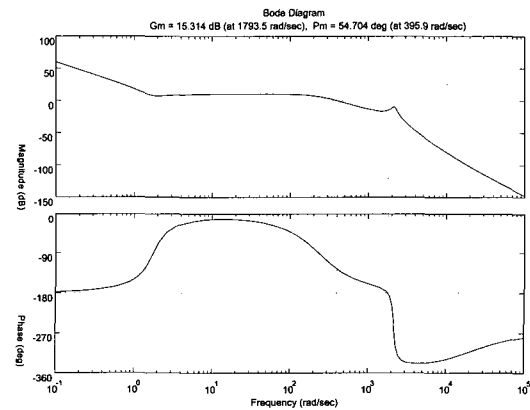


Fig. 6 Bode diagrams of global servo by closed loop for simulation

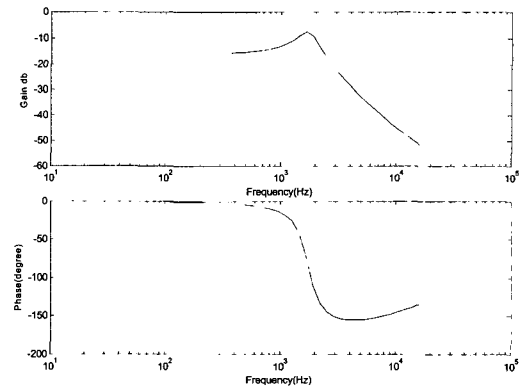


Fig. 8 Bode diagram of micro servo by closed loop for simulation

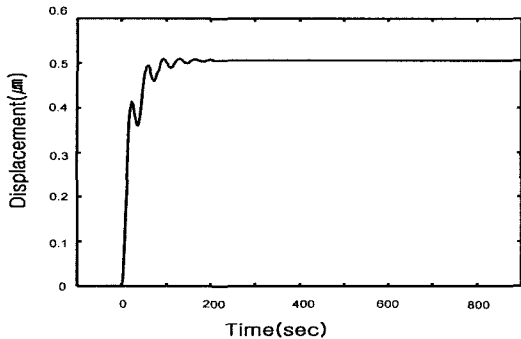


Fig. 9 Step response of micro servo for simulation

고 있는 것을 볼 수가 있었다. 이것은 연동 제어가 올바르게 작동되고 있음을 말한다.

안정된 두 시스템을 하나의 시스템으로 SIMU -LINK를 구성하고 이를 연동제어를 실시한 결과 Fig. 10에서와 같이 좋은 제어성능을 보여주고 있다.

4.2 실시간 제어

초정밀 평면 X-Y 스테이지를 MATLAB에 의해 시뮬레이션 해본 결과 본 시스템의 제어성능 및 안전성을 확인하였고 실제 기구에서의 구동 실험과 시뮬레이션 값을 비교하여 최적의 제어성능과 파라미터를 선정하여야 한다.

이러한 파라미터는 기본적으로 시뮬레이션에 의해 초기 값을 설정하고 시행착오법에 의해 실험을 반복하여 최적의 파라미터를 선정하였다. Table 3은 이러한 과정에 의해 선정된 파라미터를 보여주고 있다.

초기 실험에서 글로벌 서보의 실시간 제어는 시뮬레이션과 비슷한 파라미터 값으로 문제없이 제어가 가능하였으며, 마이크로 서보에서는 파라미터 값들이 상당한 차이를 보여주었다. 이는 글로벌 서보 진동과 외란에 의한 것이었으며, 외부 진동이 최소한으로 줄일 수 있는 방진 시설이된 항온 항습실에서 재 실험을 하였으며, 글로벌 서보에 제진 필터

Table 3 Control parameters of PID controller in dual servo for experiment

Definition	Symbol	global	micro
Proportional gain	β	97410	0.0123
Integral gain	γ	40s ⁻¹	785
Differential gain	α	2120	5.2×10 ⁻⁷

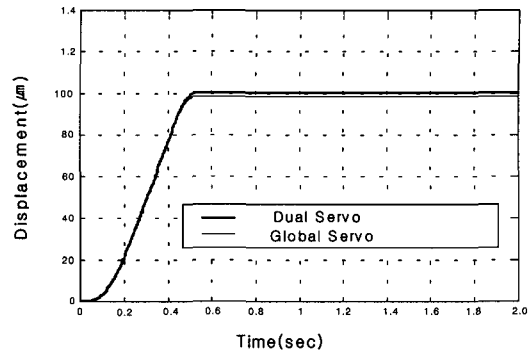


Fig. 10 Step response of dual servo to perform simulation

를 첨가하여 시스템을 구동한 결과 마이크로 서보 역시 시뮬레이션과 비슷한 파라미터 값에 의해 제어가 원활히 이루어지는 것을 알 수 있었다.

4.2.1 글로벌 서보 실시간 제어

글로벌서보의 실시간 제어는 앞서 시뮬레이션에서 선정한 PID 제어기의 파라미터를 기본으로 하여 실시간 제어 실험을 하였다.

Fig. 11 ~ Fig. 12는 글로벌 스테이지의 스텝응답이다. 스텝응답은 본 시스템의 응답특성을 알아보기 위해서 4μm, 2μm 스텝을 주어 각각 그 응답을 관찰하였다. Fig. 13에서 볼 수 있듯이 글로벌서보의 분해능이 0.5μm로 나타나므로 응답특성은 목적 하고자 하는 글로벌서보의 1μm의 분해능을 충분히 구현하고 있다.

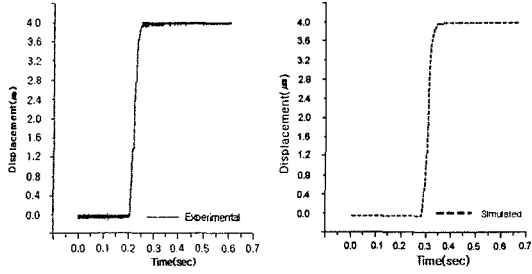
스텝응답을 관찰한 후, 1μm 스텝을 1초간 유지시키면서 계단 파형의 명령을 입력하여 보았다. Fig. 13에서 나타난 바와 같이 0.5μm의 정밀도로 1μm이하의 분해능을 보여주었다. 따라서 본 논문에서 목표한 글로벌 서보의 1μm의 정도는 충분히 구현 할 수 있었다.

4.2.2 마이크로 서보 실시간 제어

마이크로서보의 실시간 제어 역시 앞서 시뮬레이션에서 선정한 PID 제어기의 파라미터를 기본으로 하여 실시간 제어 실험을 하였다.

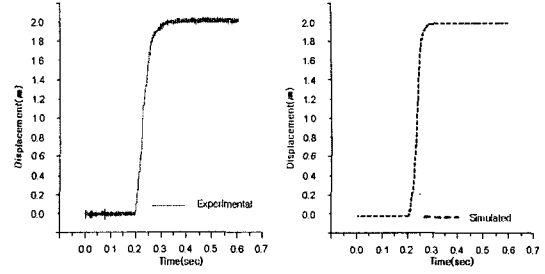
위치결정 실험은 먼저 100nm스텝을 주어 Fig. 14의 스텝응답을 확인하였다. Fig. 9의 시뮬레이션의 스텝응답과 아주 유사한 것을 볼 수 있다. 스텝응답으로만 본다면 본 시스템의 분해능은 ±10nm로 나타났다.

분해능 실험은 개루프 제어와 PID 제어기를 적용한 페루



(a) Experiment (b) Simulation

Fig. 11 4 μ m Step response of global servo



(a) Experiment (b) Simulation

Fig. 12 2 μ m Step response of global servo

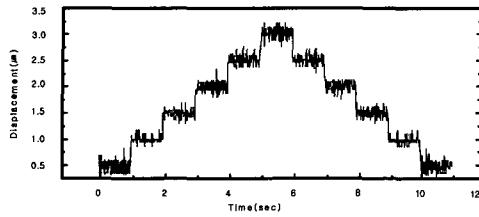


Fig. 13 Resolution experiment of global servo

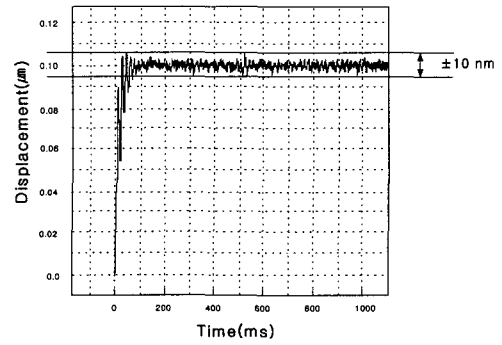


Fig. 14 Step response of micro servo

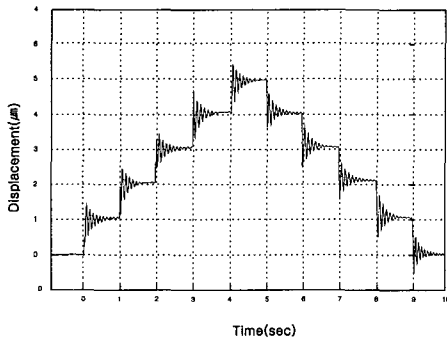


Fig. 15 Resolution experiment of micro servo by open loop

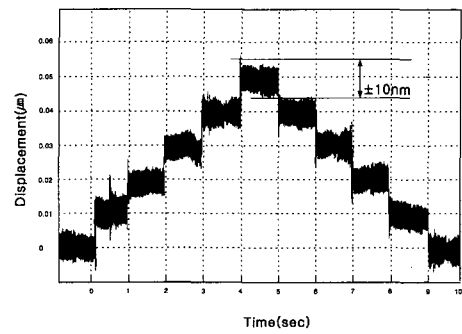


Fig. 16 Resolution experiment of micro servo by closed loop

프 제어의 성능을 비교하기 위하여, 1 μ m의 스텝을 1초간 유지시킨 개루프 분해능 실험과 20nm의 스텝을 1초간 유지시킨 폐루프 분해능 실험을 하였다.

실험 결과 Fig. 15와 Fig. 16에 나타난 바와 같이 개루프 제어를 하였을 때, 압전소자의 히스테리시스와 오버슈트가 확실하게 나타남을 알 수 있었다. 또한 PID 제어를 이용

한 폐루프 제어와 비교 하였을때, 오버 슈트와 정착시간의 관점에서 시스템의 성능을 비교 할 수 있었다. 이러한 실험을 통하여 압전소자의 제어에는 폐루프 제어가 필수적임을 알 수 있었다.

따라서 Fig. 16과 같이 분해능의 신뢰성을 확인하였고, 마이크로 서보의 분해능은 ± 10 nm임을 확인할 수 있었다.

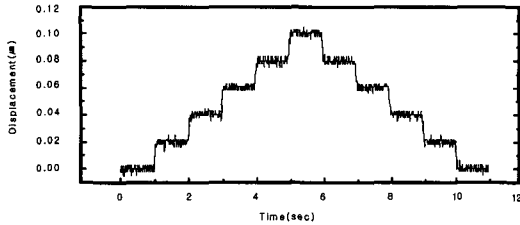


Fig. 17 Resolution experiment of X-axis dual positioning control

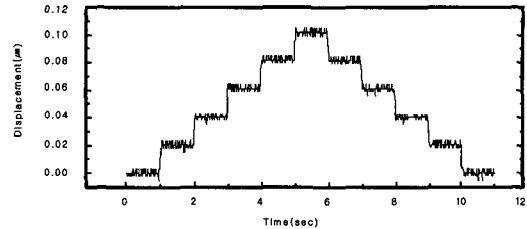


Fig. 18 Resolution experiment of Y-axis dual positioning control

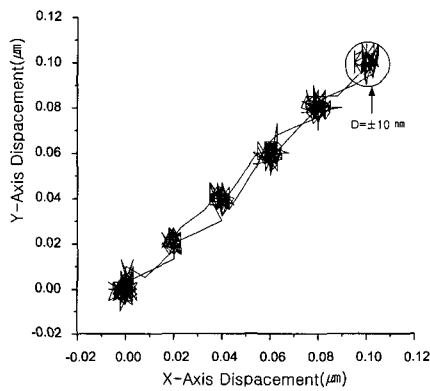


Fig. 19 Resolution experiment of X-Y axis dual positioning control

4.2.3 듀얼서보 실시간 제어

글로벌 서보와 마이크로서보에 PID 제어를 적용하여 위치결정 실험을 한 결과 각각의 기구에서는 만족할만한 성능을 보여주었으며, 이를 통하여 글로벌 서보와 마이크로서보의 안정성을 확인하였고, 초정밀 위치제어를 위하여 현대제어이론에 입각한 최소차수 관측기(Minimum Order Observer)를 적용하여 듀얼서보의 실시간 제어를 실시하였다.

Fig. 17과 Fig. 18은 듀얼 서보의 분해능 실험을 한 것이다. 앞서 실험했던 Fig. 13의 글로벌 서보의 분해능 실험과 비교한 결과 마이크로 서보가 에러를 약 $0.5\mu\text{m}$ 에서 $\pm 10\text{nm}$ 까지 보상하였음을 알 수 있다. Fig. 19는 X-Y 두축의 2차원 궤적을 나타낸 것이다. 위와 같이 실험을 통하여 얻은 본 기구의 분해능을 확인한 결과 $\pm 10\text{nm}$ 이하로 나타났다.

4. 결론

본 논문에서 이루어진 초정밀 평면 X-Y 스테이지의 시뮬레이

션과 제어성능평가에 관한 세부 연구 내용과 결과는 다음과 같다.

- (1) 평면 X-Y 스테이지 초정밀위치결정시스템에 사용되는 서보기구의 제어계에 대해서 Matlab을 이용한 Simulation을 통하여 제어기 성능평가를 수행하였으며, 기존의 제어 알고리즘을 비교 분석하여 현대제어 이론을 적용한 최소차수 관측기를 사용한 듀얼서보 제어 알고리즘을 고안하였으며, 제어기의 안전성과 우수성을 확인하였다.
- (2) Matlab Simulink와 dSPACE의 ControlDesk를 이용한 실시간 초정밀위치결정 실험을 통하여 시뮬레이션 결과와 초정밀 위치결정실험 결과를 비교 분석한 결과, 위치제어 알고리즘과 평면 X-Y 스테이지 초정밀위치결정시스템의 안정성과 성능을 확인하였다.
- (3) 본 논문은 초정밀 위치결정기구에 사용되는 액추에이터, 센서, 가이드기구, 동력전달 요소, 제어기법에 대하여 고찰을 통하여 초정밀 평면 X-Y 스테이지를 고안, 제작하였으며, 하중변화에 견실한 시스템을 구현하고자 AC 서보 모터와 볼나사, 롤링 방식의 가이드를 사용하여 글로벌 스테이지를 구성하고, 압전소자와 탄성 힌지 방식을 이용한 마이크로 스테이지를 사용하여 초정밀위치결정 시스템을 개발하였다. nm급의 위치결정 정밀도를 구현하기 위하여 기계적인 강성에 의해서 정밀도를 유지하기보다는 인크리멘탈 엔코더와 레이저 인터페로메터를 변위측정 센서로 활용하여 글로벌 서보와 마이크로 서보의 실시간 연동 제어를 통하여 스트로크 100mm, 위치결정분해능 $\pm 10\text{nm}$ 의 평면 X-Y 스테이지 초정밀 위치결정시스템을 구현하였다.

후 기

본 논문은 2001년도 조선이공대학 교내 학술 연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참고 문헌

- (1) 이조원, “10억분의 1m가 여는 세상-나노기술”, 사이언스 어드벤처 제11회 강연회, 2001.
- (2) Simokohbe 외2인, “Control performance of Lead screw Positioning with Intelligent Control Methods”, 日本精密工學誌 Vol. 64. No. 11, pp. 1627~1632, 1998.
- (3) Benjamin C. Kuo, “Automatic Control Systems” Prentice Hall. Englewood Cliffs. N. J 07632, pp. 689~699, 1994.
- (4) 이창우, “이중서보를 이용한 초정밀 X-Y 테이블 평면 3자유도 위치제어” 박사학위 논문, 한국과학기술원, pp. 28, 1997.
- (5) 박기형, 김재열, 광이구, 한재호, “DC Servo Motor를 이용한 초정밀위치결정기구의 컴퓨터 시뮬레이션 및 제어성능 평가”, 한국공작기권 1호, pp. 17~25, 2002 계학회지, 제9권, 제6호, pp. 164~169, 2000.
- (6) 김재열, 이규태, 광이구, 한재호, 김창현, “Laser Interferometer를 이용한 초정밀위치결정 퍼드백 시스템의 컴퓨터 시뮬레이션 및 제어성능 평가”, 한국공작기계학회지, 제11권, 제1호, pp. 17~25, 2002.