나노스테이지의 응답성 향상을 위한 시뮬레이션 및 비선형 적용제어에 관한 연구

Research on simulation and non-linear application control for elevation of response of Nano-stage

*김재열[1], #곽남수[2], 한재호[3]

*J. Y. Kim[1], #N. S. Kwak(suijnns@nate.com)[2] ,J .H. Han[3]

[1] 조선대학교대학교 메카트로닉스공학과, [2]조선대학교 정밀기계공학과, [3]송원대학 자동차공학과

Key words : Nano-stage, Flexure hinge, Simulation, Real-time control, Piezo electric actuator

1. 서론

초정밀 위치결정기술은 21세기에 접어들면서 산업계에서 ㎚급의 정밀도를 유지하면서 수백 ㎜의 긴 스트로크를 갖는 초정밀위치결정 기술을 요구하고 있다. 또한고집적화 추세의 반도체 제작 공정과 AFM, STM 등에 적용되는 초정밀 위치결정기구의 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 논문에서는 탄성힌지(Flexure hinge)타입의 나노미터 분해능을 가지는 나노 스테이지와 고응답성 및 분해능을 가지는 압전구동기(Piezo electric actuator)를 이용하여 다음과 같은 연구를 수행하였다. 압전구동기의 히스테리시스(Hystersis) 특성을 고려하며 입력전압의변화에 따른 히스테리시스의 비선형 특성을 파악하며 나노 스테이지에 대해 히스테리시스 특성에 강인하도록 정밀한 위치결정을 위하여 압전구동기(Piezo electric atuator)의 운동오차를고분해능의 광섬유 레이저 엔코더를 이용하여 측정하고 실제 구동조건과 비선형 특성에 대해 강인제어 성능을 확인하기 위해 Matlab/simulink를 통하여 PID제어 알고리즘을 모델링한 후 시뮬레이션을 통하여 실제 시스템의 제어기 성능과 비교하여 나노스테이지의 응답성 향상에 기인할 수 있는 방법을 제안하였다.

2. 시스템 구성 및 제어

본 논문에서 설계, 제작된 나노 스테이지는 탄성힌지 분과 몸체 재질은 두랄루민을 사용하였다. 나노스테이지는 압전구동기의 인가전압에 대한 탄성굽힘체들이 변형함으로써 상대적 변위가 유발된다. 이때 탄성굽힘체들에 의한 나노스테이지의 대변위는 각 압전구동기(Piezo electric actuator)의 배열과 그 지점에서의 변위량으로 간단하게 구할 수 있으며, 기하학적 모델을 Fig.1에 나타내었다.

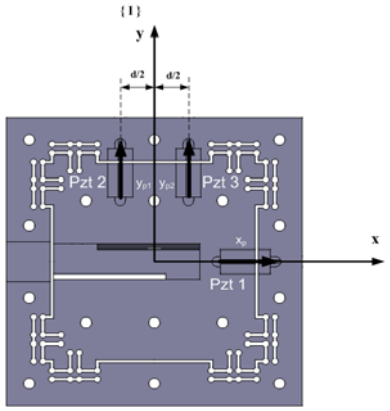

Fig. 1 Kinematic model of the UPCU

나노미터 분해능의 미소변위를 측정하기 위해서 분해능이 10㎚인 초정밀 광섬유 레이저 엔코더(Renishaw RLE10)을 사용하였다. 엔코더는 나노 스테이지의 2축의 지그에 각각 장착하였다.

Table 1 Preformance of PZT

Max. stroke (μm)	Length (mm)	EI. capacitance (μF)	Stiffness (N/μm)	Resonance frequency(khz)
40~50	46	3.6	25	20
Prestress force = Max. tensile force			300N	
Max. load force			1800N	
Max. force generation			1800N	
Open loop sensitive at 1μN noise for actuator			0.05nm	

초정밀 엔코더(Renishwa RLE10)부터의 피드백 변위는 RCU10(Renishaw Compensation unit)으로 부터의 환경보상 및 비선형계 보상을 수행하고 이 변위값을 D/A 변환기(DSP1103) 보드를 통하여 0.1sec의 샘플링 타임으로 제어기에 입력되며 이 피드백 변위를 이용하여 제어입력값을 생성하고 이 값을 다시 D/A 변환기(DSP1103)을 통하여 PZT 증폭기에 전압값으로 입력되어 압전구동기(Piezo electric actuator)를 구동시킨다.

3. 나노스테이지의 시뮬레이션

압전구동기(Piezo electric actuator) 및 나노스테이지의 탄성힌지 시스템의 전달함수를 모델링하기 위하여 주파수 응답해석을 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 일반적으로 스프링, 댐퍼, 질량 시스템의 극점과 영점의 개수가 2개 차이가 남으로 압전소자의 주파수 특성곡선을 극점의 개수를 3개, 영점의 개수를 1개로 근사화하여 Fig. 2에 주파수 특성곡선을 나타내었다. 이때 PZT 구동용 엠프 출력전류의 한 개에 의한 비선형성의 나타나지 않는 0.1μm의 진폭으로 설정하였다. 나노스테이지의 정적 게인 kp도 0.1μm 진폭의 경우의 값, 0.078μm를 이용하고 있다. 또한 나노스테이지 공진주파수가 약 1KHz ~ 2KHz인 것을 알 수 있었다.

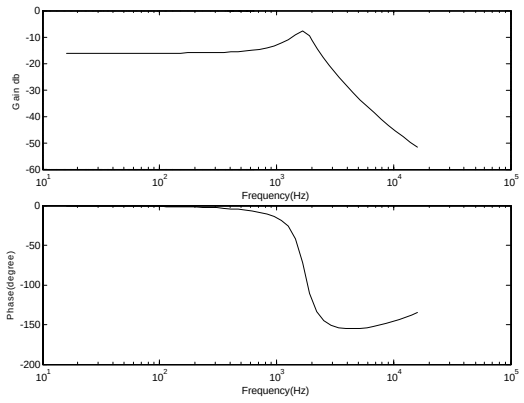

Fig.2 The Bode Diagram of Fine Apparatus by Closed Loop to Perform Simulation

또한 Fig. 3에서와 같이 시뮬레이션을 통하여 나노스테이지의 시간영역 스텝응답과 그 분석을 나타내었다. 분석 결과, 시간영역의 응답에서도 만족 할 만한 응답을 보여주고 있는 것을 알

수 있다. 이러한 시뮬레이션 결과를 통하여 나노스테이지의 PID제어기와 시스템은 안정하다고 판단된다.

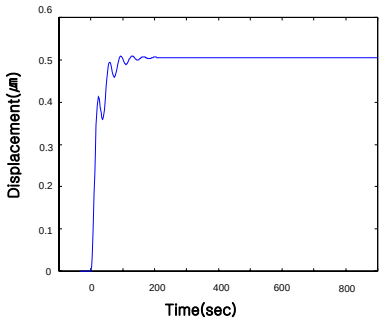

Fig.3 Step response of micro servo for simulation

4. 나노스테이지의 실시간 제어

마이크로서보의 실시간 제어 역시 앞서 시뮬레이션에서 선정한 PID 제어기의 파라메터를 기본으로 하여 실시간 제어 실험을 하였다. 초정밀 위치결정 실험은 먼저 100㎚스텝을 주어 Fig.4의 스텝응답을 확인하였다. Fig.3의 시뮬레이션의 스텝응답과 아주 유사한 것을 볼 수 있다. 스텝응답으로만 본다면 본 시스템의 분해능은 ±10nm로 나타났다. 분해능 실험은 개루프 제어와 PID 제어기를 적용한 폐루프 제어의 성능을 비교하기 위하여, 1㎛의 스텝을 1초간 유지시킨 개루프 분해능 실험과 20nm의 스텝을 1초간 유지시킨 폐루프 분해능 실험을 하였다. 실험 결과 Fig.5와 Fig.6에 나타난 바와 같이 개루프 제어를 하였을 때, 압전소자의 히스테리시스와 오버슈트가 확실하게 나타남을 알 수 있었다. 또한 PID 제어기를 이용한 폐루프 제어와 비교 하였을때, 오버슈트와 정착시간의 관점에서 시스템의 성능을 비교 할 수 있었다. 이러한 실험을 통하여 압전소자의 제어에는 폐루프 제어가 필수적임을 알 수 있었다. 따라서 Fig.6과 같이 분해능의 신뢰성을 확인하였고, 마이크로 서보의 분해능은 ±10nm임을 확인할 수 있었다.

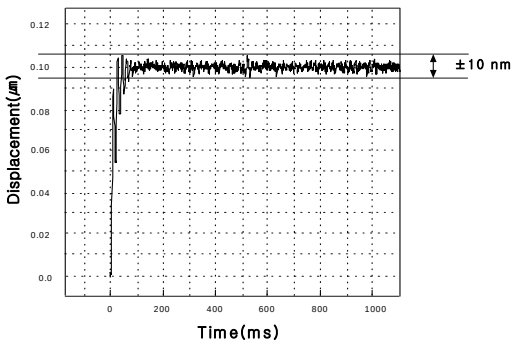

Fig.4 Step response of micro servo

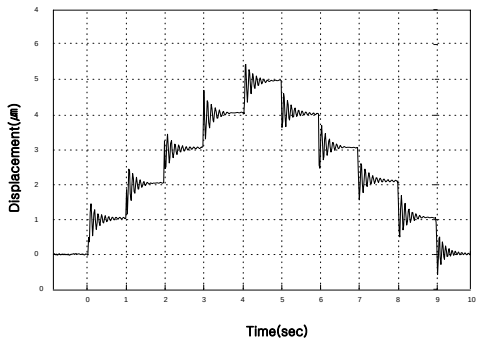

Fig.5 Resolution experiment of micro servo by Open loop

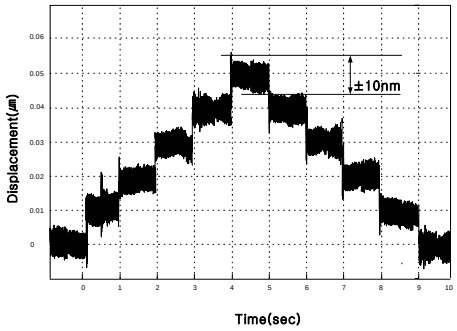

Fig.6 Resolution experiment of micro servo by closed loop

5. 결론

본 연구에서는 탄성힌지를 적용하여 압전구동기(Piezo electrci actuaor)와 나노스테이지, 피드백 변위측정으로 구성된 초정밀 위치결정 시스템에 대해 스탭 입력 응답 특성을 이용하여 시스템 전달 함수를 모델링하였으며 이 시스템의 추정오차 성능을 향상시키기 위해 Matlab/simulink를 사용하여 제어기를 설계하고 시뮬레이션 및 실시간 제어를 수행하여 제어기의 성능을 평가하고 위치결정 분해능 10nm의 성능을 확인하였다.

참고문헌

1. S,T,Smith. And D,G,Chetwynd., 1992, Foundation of Ultra precision mechanism design(Gordon and Breach Science Publishers)
2. H, Nakazawa, 1994, Principles of precision engineering
3. D, Keith Bowen, Development in nanotechnology, 1992
4. S. R. Patterson, E. B. Matgab: JSPE, 1985, 7(3), 123-128.
5. M. Shiraishi and K. Uehara: Annal of The CIRP, 1979,28,333-337.
6. J. D. Kim: KSMTE, 1998, 7(6), 132-140.
7. Renishaw RLE 10 Manual. 2004.
8. L. K Kwac, J. Y Kim and Y. T Cho: Key Engineering Materials, 2004, 274-276, 343-348.
9. E. S. Lee, J. K. Lee and T. Suto: JSPE, 1988, 54(12), 81-86.,.