韓國精密工學會 '97年度 秋季學術大會論文集 pp.437~441

이중서보제어루프를 통한 서보모터-압전구동기의 초정밀위치결정 시스템 개발

Ultra precision positioning system for Servo Motor-Piezo actualtor using dual servo loop

*이동성(서울대 대학원),박종호(서울대 대학원),박희재(서울대 공대)

ABSTRACT

In this paper, the ultra precision positioning system for servo motor and piezo actuator using dual servo loop control has been developed. For positioning system having long distance with ultra precision , the combination of global stage and micro stage is required. Servo motor and ball screw are used as a master stage and piezo acuator as a fine stage. By using this system, an positional precision witin ±30nm has been achieved at dual servo loop control. When using micro stage, an positional precision within ±10nm has been achieved. This result can be applied to develop semiconductor equipment such as wafer stepper.

Key Words : piezo actuator(압전소자 구동기), dual servo loop(이중 서보 루프), global stage(글로벌 스테이지), micro stage(초정밀 스테이지), laser interferometer(레이져 인터페로미터),DSP board(디지털 시그널 프로세싱 보드)

1.서 론

반도체 산업의 급속한 발달과 더불어 반도체의 고집적화가 가속되고 있으며, 이러한 고집적 반도체의 생산에 있어서 집적도의 한계는 Wafer Stepper의 위치결정 정도가 주요한 요인이 된다. 따라서 수십 nm의 초정밀 위치 결정 시스템의 개발은 0.2㎛ 급의 Line and Space를 생산하는데 있어서 필수적인 전제 조건이 된다. 본 연구에서는 10㎚ 수준의 위치결정 정밀도를 가지는 초정밀 위치 결정 기구의 설계, 제작을 목적으로 한다. 긴 행정거리에 대한 초정밀 위치 결정이 가능하도록 하기 위하여 이중 서보 제어방식을 이용하기로 하여 서브미크론 수준의 초정밀 이송장치를 구현한다.

2. 시스템의 하드웨어 사양

초정밀 위치결정 시스템을 구성하는 하드웨어 사양은 다음과 같다.

- Control용 Pentium PC
- Dynamic Amp 입력용 DA Card
- 압전소자 구동용 Dynamic Amp
- DC Servo Motor 구동용 DSP 보드
- DC Servo Motor 및 XY Stage
- 압전소자 및 마이크로 스테이지
- time interrupt용 counter/timer
- 변위 측정용 레이져 인터페로미터 및 헤드 및 데이터 용 인터페이스 보드
- 측정용 방진 테이블

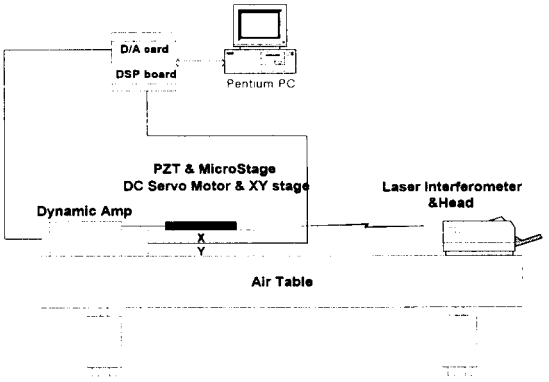

그림 2-1. System Configuration

3. 본론

3-1. 압전소자의 전기적 해석

그림 3-1은 간략화된 압전소자의 전기적 모델로서 Dynamic Amp의 입력전압에 대한 압전소자의 인가전압에 대한 전달함수는 식 3-1과 같이 나타낼수있다.

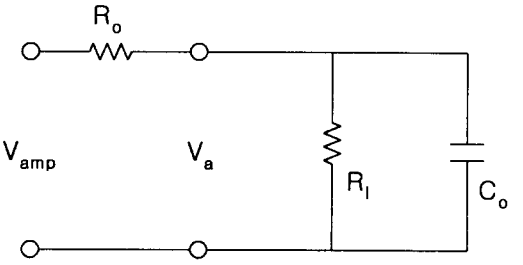

그림 3-1. 압전소자의 간략화된 전기 모델

$$V_a(S) = \frac{1}{C_0R_0S+1+\frac{R_0}{R_1}} V_{amp}(S) \quad - \text{식}3-1$$

V_{amp} : Dynamic PZT Amplifier에 의한 출력 전압
V_a : 압전소자에 인가된 전압
R_0 : Amp의 output Impedence
R_1 : 압전소자 내부의 근사 저항
C_0 : 압전소자 내부의 근사 커패시터

여기서 $R_0 \ll R_1$ 이므로 이 항을 무시하면, 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{V_a(S)}{V_{amp}(S)} = \frac{1}{C_0R_0S+1} \quad - \text{식}3-2$$

위의 결과는 선형압전 이론에 의한 간략화된 압전소자의 전기적 성질을 모델링한 식이다.

3-2.마이크로 스테이지와 압전소자의 동적 모델링

압전소자와 마이크로스테이지는 기계적으로는 질량-스프링 시스템으로 볼수 있다. 그림 3-2는 간략화한 압전소자와 스테이지의 동적모델이다. 압전소자에 인가된 순전압 V_{PZT}에 의해 압전소자는 등가힘 P(s)를 발생시키며 이는 압전소자를 구동하는 힘과 스테이지를 구동하는 힘의 합이된다.여기서 스테이지를 구동하는 힘을 압전소자를 하나의 시스템으로 간주하여 등가시스템을 생각하기로 하자.

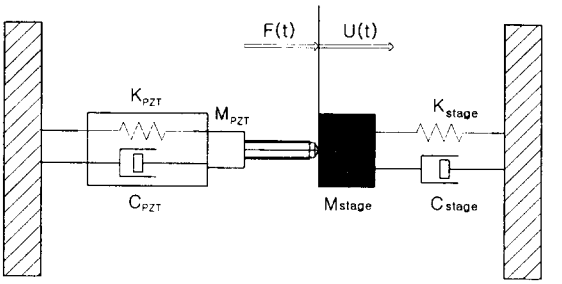

그림3-2. 간략화한 압전소자와 스테이지의 동적 모델

그림 3-3와 같이 간단히 스테이지 질량 및 압전소자의 질량,탄성계수 및 댐핑계수를 대치하는 등가의 시스템으로 생각할 수 있다.

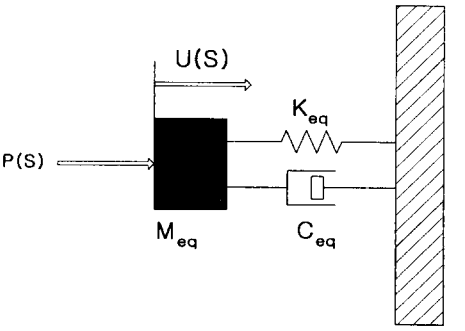

그림3-3. 스테이지와 압전소자의 등가 시스템

위의 등가시스템에 대한 전달함수가 식 3-3에 있다.

$$\frac{U(S)}{P(S)} = \frac{1}{M_{eq}S^2+C_{eq}S+K_{eq}} \quad - \text{식 } 3-3$$

M_{eq} : 압전소자 및 스테이지 등가 질량
C_{eq} : 압전소자 및 스테이지 등가 댐핑 계수
K_{eq} : 압전소자 및 스테이지 등가 탄성 계수

압전소자의 순전압 V_{PZT}와 등가힘 P의 관계식

$$P = \frac{cdA}{l} V_{PZT} \quad \ldots \text{식}3-4$$

c : 강성계수
d : 압전상수
A : 압전소자의 단면적
l : 압전소자의 길이

으로부터 스테이지의 변위 U(S)는 압전소자에 대한 순인가전압 V_{PZT}에 대한 식으로 바꿔 쓸수 있다.

$$\frac{U(S)}{V_{PZT}(S)} = \frac{cdA}{l}\frac{1}{M_{eq}S^2+C_{eq}S+K_{eq}} \quad \ldots 식3-5$$

여기서 $V_{PZT}(S)$는 다음식으로 표현된다.

$$V_{PZT} = V_a + V_f$$
$$= \frac{1}{C_0R_0S+1}V_{amp} + \frac{dR_oS}{R_oC_oS+1}F_S$$

...식 3-6

위의 식에서 압전소자의 외부부하Fs에 의한 압전전압부를 비선형적인 외란조건으로 간주하여 위의 식을 다음과 같이 근사 시키자.

$$V_{PZT} \simeq \frac{1}{C_0R_0S+1}V_{amp} \quad \ldots 식3-7$$

따라서 압전소자 및 스테이지 시스템에 대한 입력을 Dynamic Amp에 의한 출력전압 $V_{amp}(S)$라 하고 응답을 스테이지의 변위 U(S)라하면 다음 전달함수를 얻을 수 있다.

$$\frac{U(S)}{V_{amp}(S)} = \frac{cdA}{l}\frac{1}{C_0R_0S+1}\frac{1}{M_{eq}S^2+C_{eq}S+K_{eq}}$$

...식 3-8

3-3.압전소자 및 스테이지의 콘트롤 루프

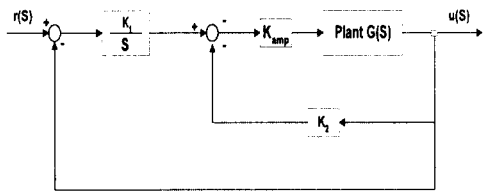

그림 3-4. 마이크로 스테이지의 콘트롤 루프

r(S) : Target Position
u(S) : Real Position
K1 : integral gain
K2 : proportional gain
K_{amp} : Dynamic Amp Gain
G(S) : $\frac{1}{\tau S+1}\frac{K_P}{M_{eq}S^2+C_{eq}S+K_{eq}}$

위 루프의 입력 r(S)에 대한 출력 u(S)의 전달 함수는 다음과 같다.

$$\frac{u(S)}{r(S)} = \frac{K_1K_{amp}G(S)}{S(K_2K_{amp}G(S)+1)}$$
$$= \frac{K_1K_{amp}K_P}{S(K_2K_{amp}K_P+(\tau S+1)(M_{eq}S^2+C_{eq}S+K_{eq}))}$$
$$= \frac{K_1K_{amp}K_P\ /\ M_{eq}}{S(K_2K_{amp}K_P\ /\ M_{eq}+(\tau S+1)(S^2+2\zeta\omega_nS+\omega_n^2))}$$

...식 3-9

위 식에서

$$K_1' = K_1K_{amp}K_P\ /\ M_{eq}$$
$$K_2' = K_2K_{amp}K_P\ /\ M_{eq}$$

이라 하면

$$\frac{u(S)}{r(S)} = \frac{K_1'}{S\ (\ (\tau S+1)(S^2+2\zeta\omega_nS+\omega_n^2)+K_2'\ )}$$

...식 3-10

$$\omega_n : \sqrt{\frac{K_{eq}}{M_{eq}}}$$
$$\zeta : \frac{C_{eq}}{2\sqrt{M_{eq}K_{eq}}}$$

분모에 있는 τS+1항에서 시정수 τ는 Dynamic Amp의 출력이 압전소자에 가해 졌을 때의 압전소자부의 인가전압의 응답특성을 나타내주는 변수이다.

위의 식에서 실험적으로 시스템의 고유진동수 ω_n와 감쇄계수 ζ 및 게인 K1,K2를 정한다.

3-4.시스템 계수의 결정

스테이지의 고유진동수는 random signal을 입력함으로써 실험적으로 구할수 있다.

위의 그림은 random signal 가진에 의한 스테이지의 주파수 응답곡선이다. 이 그림으로부터 스테이지의 고유진동수가 500Hz 에 약간 못 미치며 대략 고유진동수가 470~480Hz 사이에 있음을 알 수 있다.

댐핑계수는 스테이지의 임펄스 입력에 대한 시간영역의 응답곡선으로부터 logarithm decrement를 통하여 구할 수있다. 그림 3-6은 제작된 스테이지에 부착된 압전소자에 계단 입력을 가하였을때의 10kHz의 sampling time 으로 측정한 시간 영역에서의 마이크로 스테이지의 응답곡선이다.

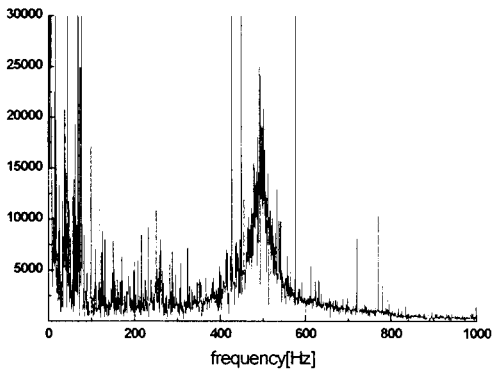

그림 3-5. 고유진동수의 결정

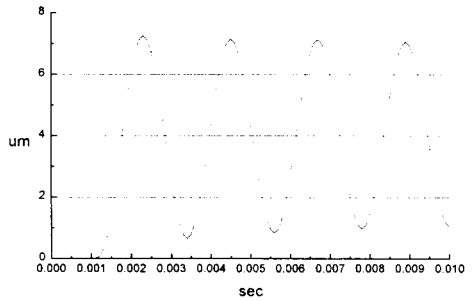

그림 3-6 . logarithm decay에 의한 댐핑계수의 결정

일반적으로 viscous damping 시스템의 경우 진폭이 지수적으로 감소하는 경향이있다. 따라서 이를 이용하여 실험 data로부터 댐핑계수 ζ를 구할 수있다. logarithm decrement δ는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}\delta &= \ln\frac{x1}{x2} \\ &= \zeta\omega_n T \\ &= \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\end{aligned}$$

위 식으로부터

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{(2\pi)^2 + \delta^2}} \quad \ldots 식3-11$$

따라서 댐핑계수 ζ는 logarithm decrement δ를 구하면 얻을 수있다. 실험 결과에 의한 댐핑계수 ζ은 다음과 같다.

$$\zeta \simeq 0.00143$$

이다.

위의 값으로부터 고유진동수를 구해보면 $\omega_n = \frac{1}{2\pi}\frac{\delta}{\zeta T} = 476.5Hz$ 로 앞에서 결정된 결과와 거의일치함을 알 수 있다.

3-5. 압전소자 및 마이크로스테이지의 계단 응답

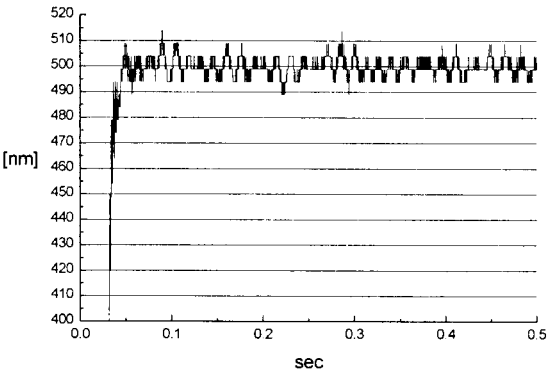

그림 3-7. 압전소자와 마이크로스테이이의 제어곡선

그림 3-7은 주어진 콘트롤 루프에 의한 제어시 500nm의 step input에 대한 응답곡선이다. 위의 결과에서 알 수 있듯이 ±10nm의 정밀도 범위내에서 제어되고 있음을 알수 있다.

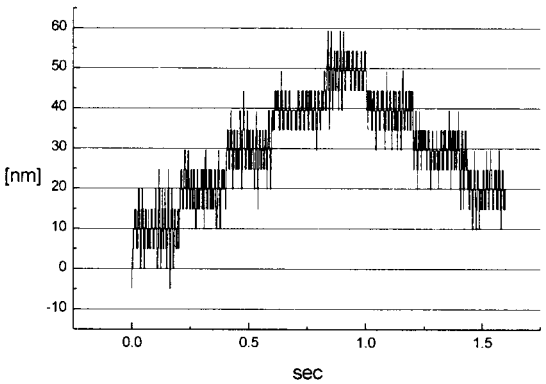

그림 3-8. 10nm 다단 입력에 의한 제어 응답 곡선

위의 그림은 10nm 씩 단을 준 input에 대한 응답곡선으로 역시 ±10nm 정도의 정밀도를 가진 것을 알 수 있다.

위의 결과에서 알수 있듯이 마이크로 스테이지만의 제어 결과로서 ±10nm 의 위치 정밀도를 얻을수 있었다.

3-6. Dual Servo Loop Control

그림3-9은 DC Servo Motor의 글로벌 서보기구와 압전소자의 마이크로 서보기구의 개략도이다.

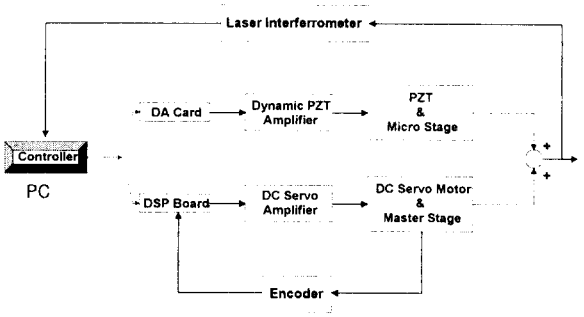

그림 3-9 이중서보 루프의 구성도

글로벌 서보는 DC Servo Motor 및 볼스크류에 의해 구현되고 있으며 PC에 장착된 DSP 보드에서 PID Control Loop에 의해 구동되고 있다. 피드백신호는 DC Servo Motor에 부착 되어있는 Encoder를 통해 DSP 보드에 입력된다. Encoder 분해능은 0.5um이며 볼스크류의 정밀도는 대략 2um 정도이다. 마이크로 스테이지의 구동은 압전소자의 초정밀 스테이지에 의해 이루어지고 레이져인터페로미터에 의한 feedback을 받으며 PC Based 콘트롤에 의해 위치제어를 하게된다. 글로벌 서보의 마스터 스테이지는 분해능이 0.5 um 이나 실제 기계적인 정밀도는 기구적인 마찰 및 백래시 등의 영향으로 이보다 떨어지게된다. 실험에 의하면 1mm 정도의 행정에 대해서 약 2um 이상의 이송오차를 가지는 것으로 나타났다. 따라서 마스터 스테이지 위의 마이크로 스테이지가 이에 대한 보상을 해주어야한다. 마이크로 스테이지를 마스터스테이지에 올리지 않은 상태에서의 실험에 의하면 ±10nm의 정밀도 범위내에서 제어가 가능함을 알 수 있었으나 마스터 스테이지 위에 장착시 마스터 스테이지의 구동중 모터에 의한 진동등에 의한 영향으로 이보다 정밀도가 떨어지는 것로 나타났다. 그림 3-10은 Dual Servo Loop에 의한 위치 제어를 행한 결과를 나타내주는 그림이다. 그림에서 알수 있듯이 Dual Servo 제어에 의해 100um의 계단입력에 대하여 대략 ±30nm의 정밀도를 가지는 것을 알 수 있다. 이는 마이크로스테이지만의 정밀도 보다 ±20nm 정도 떨어지는 결과이다. 이에 대한 주 원인으로는 마스터스테이지 자체 진동 및 측정선과 베이스의 불일치에 의한 아베 옵셋등으로 생각된다.

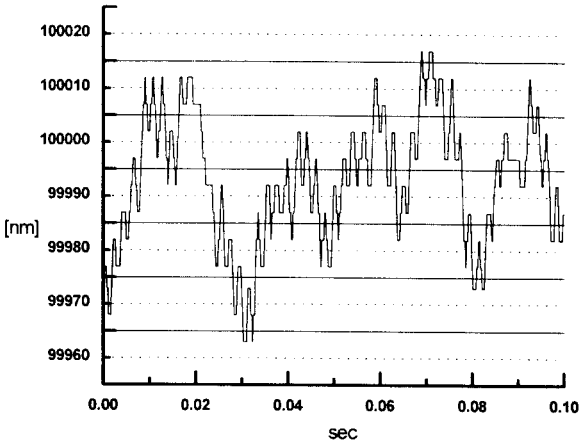

그림 3-10 dual servo loop control에 의한 응답곡선

4. 결론

초정밀 위치 결정 시스템 개발을 통하여 수십nm정도의 위치결정 정밀도를 얻을 수 있었다. 마이크로 스테이지만의 제어 결과로서 ±10nm정도를 얻을수 있었고, 이를 통하여 Dual Servo loop에 의해 ±30nm의 정밀도를 지니는 Dual Servo 초정밀 위치결정 기구를 구현할수 있었다. 보다 연구를 진행하여 Dual Servo Loop에 의한 정밀도를 ±10nm정도로 줄이는 것을 목표로 하고 있다.

5. 참고문헌

1. 박종호,"압전소자와 유니버셜 원형 굽힘힌지를 이용한 초정밀 6자유도 운동 시스템개발" 서울대 석사 학위논문
2. Leonard Meitrovitch,"Elements Of Vibration Analysis", McGraw-Hill International Editions
3. 정승배,"전압구동시 압전구동기의 위치결정 정도에 대한 비선형모델링에 관한연구",한국과학기술원 박사 학위논문
4. Robert Grover Brown, Patrick Y.C. Hwang, "Introduction To Random Signals And Applied Kalman Filtering", Wiley
5. 이장무, "Theory and Application Of Modal Analysis", 서울대 기계설계학과 출판