

◆특집◆ 지능형 정밀 장비

초정밀 위치 제어를 위한 이중 서보 메커니즘의 설계 및 제어

최현석\*, 송치우\*, 한창수\*\*

Design and Control of Dual Servo Mechanism for High Precision Position Control

Hyeun Seok Choi\*, Chi Woo Song\*, and Chang Soo Han\*\*

Key Words : Dual servo (이중서보), VCM (보이스코일모터), Piezoceramic(압전세라믹), Flexure Hinge(유연관절), PQ method(피큐제어기설계법), Micro tensile tester( 마이크로 인장시험기)

1. 서론

초정밀 위치 제어 기술에 대한 연구는 나노(Nano) 관련 기술 연구에서나 바이오(Bio), MEMS 그리고 반도체 제조 장비 분야에서 활발히 진행되고 있다. 초정밀 위치 제어 기술은 이들 산업에서 사용되는 각종 장비 및 장치들의 구현 기술로서 활용되고 있으며 이러한 장비나 장치들은 생산설비나 생산물에 대한 측정 및 시험 장치로써 제품의 개발이나 양산에 중요한 필수 요소이다.<sup>1,4,17</sup>

반도체 제조 공정에서는 웨이퍼(wafer)의 가공을 위해 리소그라피와 같은 장비가 이용되고 있다. 이 설비는 웨이퍼의 위치와 자세를 정밀하게 제어하기 위해 초정밀 위치 제어 메커니즘과 제어가 필요하다. 약 20nm의 위치 정확도가 요구된다.<sup>2</sup>

반도체 산업이나 나노 및 MEMS 관련 분야에서의 물성 측정이나 실험에서는 일반적인 시편보

다 얇은 박막(thin film)이나 미세한 시편을 사용하는 경우가 많다. 그러므로 시험장치들은 보다 높은 정도의 위치 정밀도를 필요로 하고 있다. 이러한 시험 장치에는 AFM(Atomic force microscope)나 나노 인텐터(Nano indenter) 그리고 미세인장 시험기(Micro tensile tester) 등이 있다.<sup>7,16</sup>

박막의 물성 측정을 위한 미세 인장시험에서 W.N.Sharpe는 PZT와 공기베어링을 이용한 미세 인장시험장치를 제안하였다. H.Ogawa 등은 서보 모터와 flexure hinge 구조를 이용하여 인장시험기를 개발하여 실험하였다. 그리고 일본 동경대의 히고 아지등은 PZT를 이용한 굽힘 시험 장치를 개발하여 상용화하고 있다. 그림 1은 각각의 시험장치 메커니즘의 개략도이다.<sup>5,6,7</sup>

본 논문에서 미세시편의 물성 측정을 위한 미세 인장시험과 반복 굽힘 시험기(Bending tester)의 구현을 위해 초정밀 위치 제어 메커니즘과 제어를 제안하고자 한다. 초정밀 위치 제어 성능과 높은 주파수 특성을 획득하기 위해 PZT와 VCM 두 개의 구동기를 적용하고 제어기 설계를 위해 PQ method를 사용하여 이중 서보 제어기를 설계한다. 메커니즘 설계에서는 두 종류의 Flexure hinge 구조를 사용하여 이중 서보 메커니즘을 구현하도록 한다.

\* 한양대학교 기계공학부 대학원

\*\* 한양대학교 기계정보경영학부

Tel: 031-415-5255, Fax: 031-406-6248

Email: cshan@hanyang.ac.kr

초정밀 로봇 메커니즘과 자동차조향장치 및 의용공학에 관련된 연구에 관심을 두고 있으며 최근에는 특히 나노 단위의 정밀도를 갖는 초정밀 메커니즘과 제어에 대해 연구활동을 하고 있다.

2 장에서는 메커니즘의 모델을 제시하고 수학적 모델식을 유도하였으며 3 장에서는 이중 서보 제어기 설계를 위한 제어기 설계법과 제어기 특성에 대해 논하였다. 그리고 4 장과 5 장에서는 설계된 초정밀 위치 제어 메커니즘과 실험결과에 대해 기술하였다.

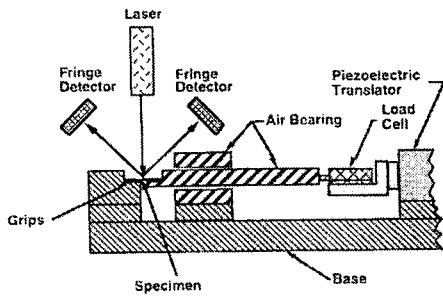


Fig. 1 (a) A schematic view of the micro tensile tester <sup>5</sup>

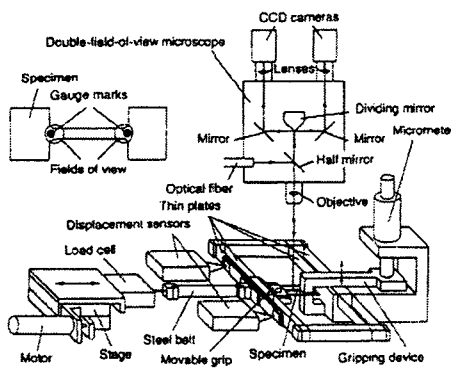


Fig. 1 (b) A schematic drawing of the testing setup <sup>6</sup>

## 2. 초정밀 위치 제어 메커니즘

### 2.1 이중 서보 메커니즘

초정밀 위치 제어에서 넓은 작동 영역과 높은 정밀도를 유지하며 넓은 주파수 응답 특성을 가진 시스템을 구현하기 위한 방법으로 이중 서보 메커니즘을 이용하는 방법이 있다. 이중 서보 메커니즘은 두개의 구동 스테이지가 직렬로 연결된 구조를 가지고 있으며 넓은 운동 범위와 상대적으로 낮은 주파수 성능을 가진 조동 스테이지(coarse stage)와 좁은 운동 범위를 가지며 높은 주파수 특

성을 가진 미동(fine stage) 스테이지로 구성 된다. 이러한 서로 다른 특성을 가진 스테이지를 사용하여 넓은 작업 영역과 높은 정밀도 그리고 넓은 주파수 응답 특성을 가진 위치 제어시스템을 구현할 수 있다.<sup>8,9</sup>

### 2.2 이중 서보 메커니즘

조동 스테이지 위에 미동 스테이지가 연결된 2 자유도의 시스템으로 모델을 설정하였다. 조동 스테이지  $m_1(x_1)$ 는 베이스와 박판형 힌지(leaf type hinge)로 연결되어 있으며 미동 스테이지  $m_2(x_2)$ 는 조동 스테이지와 2 축형 힌지(Two axis type hinge)로 연결된다. 메커니즘의 모델을 다음 그림 2 와 같다.

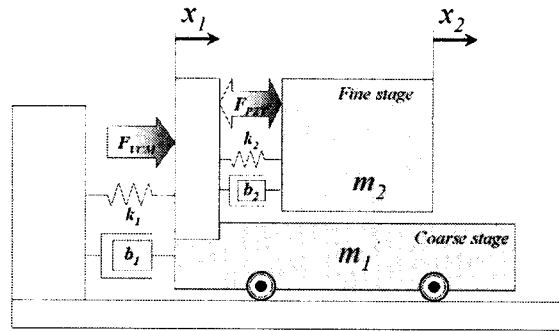


Fig. 2 The modeling of mechanism system

위의 그림과 같이 각각의 스테이지들의 연결은 스프링(spring)과 감쇠기(damper)로 모델링하였다.  $F_{VCM}$  는 조동 스테이지를 구동하는 VCM의 구동력 베이스에 연결되어 동작한다.  $F_{PZT}$  는 미동 스테이지를 구동시키는 PZT의 힘으로써 조동 스테이지와 미동스테이지 사이에 고정된다.

유도된 모델식은 다음 식(1)과 같다.

$$(m_1 + m_2)\ddot{x}_1 + (c_1 + c_2)\dot{x}_1 - c_2\dot{x}_2 + (k_1 + k_2)x_1 - k_2x_2 = F_1 - F_2 \quad (1)$$

$$m_2\ddot{x}_2 + c_2\dot{x}_2 - c_2\dot{x}_1 + k_2x_2 - k_2x_1 = F_2$$

직렬형태로 연결된 두 스테이지는 각각의 구동에 의한 간섭현상이 존재한다. 간섭현상은 위치 제어에서 오차의 원인이며 메커니즘 설계에서 간섭현상이 최소가 되도록 설계 변수를 결정하였

다. 설계 변수 결정을 위해 제안한 메커니즘에서 스프링  $k_1$  과  $k_2$  그리고 스테이지의 질량  $m_1, m_2$  에 따른 간섭현상의 경향 변화를 시뮬레이션으로 분석하였다.

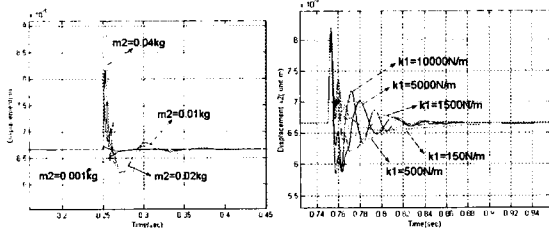


Fig.3 Coupled motion of a fine stage

시뮬레이션 결과 간섭현상은 미동스테이지( $m_2$ )의 질량이 가볍고 스프링  $k_1$ 의 강성이 낮을수록 작게 나타난다. 조동 스테이지에 스텝 입력(step input)의 힘을 입력하였을 때 간섭현상으로 나타난 미동 스테이지의 변위를 해석하였다. 해석결과는 그림 3 과 같다.

### 2.3 힌지(Hinge) 메커니즘 모델

Flexure hinge 메커니즘은 단일 구조로 제작되어 정밀 변위를 구현하는데 매우 효과적이다. Flexure hinge 는 탄성변형과 소성변형으로부터 운동성이 구현된다. Flexure hinge 의 움직임은 마찰이 없이 부드럽고 연속적인 특성을 구현해 낼 수 있다. 그림 4 는 본 논문에서 적용한 2 개의 힌지 조인트로서 판형 힌지(Leaf type flexure hinge)와 2 축형 힌지(Two axis type flexure hinge)의 형태 및 설계 변수이다.<sup>10</sup>

Leaf type flexure hinge 는 조동 스테이지에 적용하였으며 two axis type flexure hinge 는 미동 스테이지에 사용하였다.

각각의 힌지는 서로 대칭형으로 설계 함으로써 재료의 열팽창에 의한 오차나 구동할 때에 발생하는 구동축 방향 이외의 추가적인 움직임을 무시할 수 있다.

식 (2)와 (3)은 힌지들의 강성을 나타낸다. 식에서 보면 힌지의 설계 변수들 중에서 힌지의 두께와 길이가 강성에 미치는 영향이 큰 것으로 알 수 있다. 본 논문에서의 힌지 및 구조의 재료

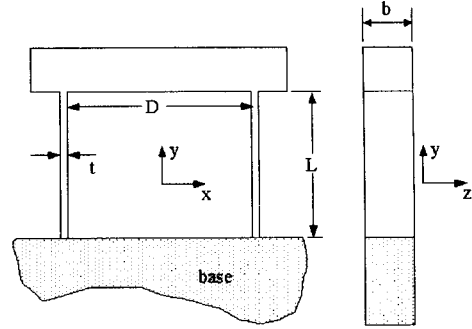


Fig.4 (a) Leaf type flexure hinge<sup>10</sup>

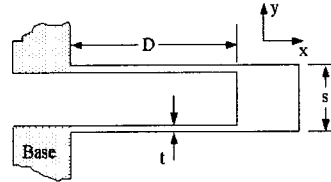


Fig. 4 (b) Two axis flexure hinge<sup>10</sup>

는 알루미늄이며 가공법으로 EDM 을 사용하였다. 일반적인 EDM 에서 얇은 판의 가공에는 한계가 있으며 본 연구에서는  $k_1$ 의 강성을 최소로 하기 위해 힌지의 두께는 가공 한계까지 얇게 가공하였다.

$$k_1 = \frac{24EI_{zz}}{L^3} = 2Eb \left( \frac{t}{L} \right)^3 ; \text{Leaf type} \quad (2)$$

$$k_2 = \frac{6EI}{L^3} = \frac{Ebt^3}{2L^3} ; \text{Two-axis type} \quad (3)$$

where,

$E$ : Modulus of elasticity  $I_{zz}$ : Moment of inertia z-axis

$b$ : width of flexure  $t$ : thickness of flexure

$L$ : Length of flexure

식 (2),(3)에 의한 힌지의 강성은  $k_1$  은 5000N/m이며  $k_2$  는 약 25000N/m 이 되도록 설계되었다.

그림 5 는 적용된 힌지 조인트의 FEM 해석 결과이다. 해석 결과 힌지에서 항복응력 이상의 응력은 없었으며 힌지 조인트의 강성을 검증할 수 있었다.

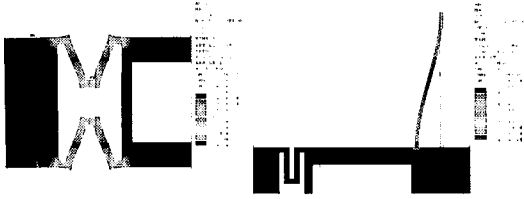


Fig. 5 FEM analysis result ( stress )

### 2.4 VCM(voice coil motor)의 모델링

조동 스테이지의 구동기인 VCM 은 전자기 부분과 메카니즘 부분으로 나누어 Fig.6 와 같이 모델링을 할 수 있다. 전자기 부분의 지배 방정식은 식(4)와 같다.<sup>11</sup>

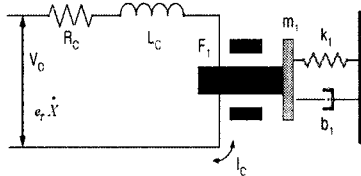


Fig.6 Modeling of VCM and Coarse stage

$$L_c \frac{dI_c}{dt} + R_c I_c = V_c - e_r \frac{dX_1}{dt} \quad (4)$$

(  $e_r = NBl$  )

where,

- $L_c$ : Inductance of coil
- $R_c$ : Resistance of coil
- $V_c$ : Driving voltage of VCM
- $l$ : Effective average coil length/one turn
- $X_1$ : Displacement of the moving coil
- $e_r(dX_1/dt)$ : Back electromotive force (BEMF)
- $N$ : Turn of coil
- $I_c$ : Driving current
- $B$ : Magnetic flux density

메카니즘 부분의 지배방정식은 식(5)와 같이 표현할 수 있다. 식(4)와 (5)를 전달함수로 표현하면 다음 식(6)과 (7)로 표현할 수 있다.

$$m_1 \frac{d^2 X_1}{dt^2} + b_1 \frac{dX_1}{dt} + k_1 X_1 = NBl_c I \quad (5)$$

(  $e_r = NBl$  )

$$X_1(s) = G(s) V_c(s) \quad (6)$$

$$G(s) = \frac{e_r}{m_1 s^2 + \left( b_1 + \left( \frac{e_r e_r}{L_c s + R_c} \right) \right) s + k_1} \cdot \frac{1}{L_c s + R_c} \quad (7)$$

$$= \frac{e_r}{m_1 L_c s^3 + \alpha s^2 + \beta s + k_1 R_c}$$

where,  $\alpha = m_1 R_c + b_1 L_c + L_c e_r e_r$

$\beta = b_1 R_c + R_c e_r e_r + k_1 L_c$ .

마이크로 부분의 전달함수는 3 차로 모델링 되어져 있다. 하지만 우세근(dominant pole)만 가지는 2 차 시스템으로 근사화 시킬 수 있다.

코일의 인덕턴스와 BEMF 의 효과는 미세함으로 모델에서 무시함으로써 시스템 전달함수  $G(s)$ 를 2 차 모델로 근사화할 수 있다. 식(8)은  $G(s)$ 의 2 차 모델을 나타내고 있다.<sup>14</sup>

$$G_n(s) = \frac{NBl}{m_1 s^2 + b_1 s + k_1} \cdot \frac{1}{R_c} \quad (8)$$

### 3. 이중 서보를 위한 제어기 설계

VCM 과 PZT 두개의 구동기(Actuator)를 이용한 이중 서보 시스템을 위한 제어기를 설계하였다. 일반적인 이중 서보 시스템의 제어기와 구동기는 그림 7 과 같은 블록선도로 나타낼 수 있다.

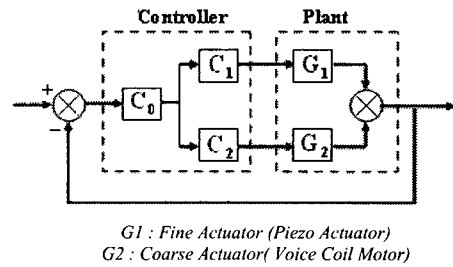


Fig. 7 Block Diagram of DISO system

제어 시스템을 설계하는데 있어서 중요한 요소 중 하나는 안정성(Stability)이다. 시스템의 안정성은 전달함수  $G_1 C_1$  과  $G_2 C_2$  의 병렬 연결에 의해 만들어진 DISO 시스템의 전달함수에서 영점(Zeros)의 위치에 따라 정하여 진다. 왜냐하면 불안정 영역에 존재하는 영점은 페루프 시스템의 대역폭을 제한하기 때문이다.<sup>12</sup> DISO 시스템의 전달함수는

다음 식 (4)와 같다.

$$T.F = \frac{C_0(C_1G_1 + C_2G_2)}{1 + C_0(C_1G_1 + C_2G_2)} \quad (9)$$

제어시스템에서  $G_1$  과  $G_2$  의 출력의 위상(Phase) 또한 중요한 요소이다. 만일 어떤 주파수에서 같은 크기의 출력이 위상차가  $180^\circ$  에 가깝다면 전체 출력의 크기는 서로 상쇄되어 크게 떨어질 것이다. 그러므로 본 논문에서는 시스템의 영점이 안정한 영역 내에 있도록 설계하고 각각의 출력이 중첩될 수 있도록 위상을 설정하였다.

### 3.1 PQ 설계법(PQ Method)

PQ 법은 이중 서보 시스템을 2 개의 단일 서보 시스템으로 각각 해석하여 제어를 설계하는 방법으로서 이중 서보 시스템을 해석하는데 사용하는 방법으로 William C messner 등에 의해 제안되었다. PQ 법에서는 DISO 시스템에 대해 다음 그림 8 과 같이 SISO 시스템으로 상사 시킨다.<sup>12,13</sup>

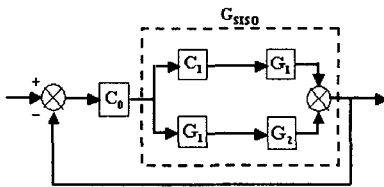


Fig. 8 Equivalent SISO System

$$G_{SISO} = C_1G_1 + C_2G_2 \quad (10)$$

$$P(j\omega) = \frac{G_2(j\omega)}{G_1(j\omega)} \text{ and } Q(j\omega) = \frac{C_2(j\omega)}{C_1(j\omega)}$$

P 와 Q 는 식(10)과 같이 정의된다. 주파수 응답에서 P 를 안정화 시키는 제어기 Q 를 설계한다. 저주파수 영역에서는 PQ 의 크기가 크고 고주파수 영역에서는 PQ 의 크기가 작다. 즉 고주파 영역에서는  $G_1$  이  $G_2$  보다 상대적으로 많이 작동하며, 저주파수 영역에서는  $G_2$  가  $G_1$  보다 상대적으로 많이 작동한다 Q 를 설계할 때, PQ 의 위상여유가  $60^\circ$  이상이 되어야 한다. 이러한 조건하에서 두개의 구동기(Actuator)는 서로 중첩되는 효과를 기대할 수 있다.<sup>12,13</sup>

### 3.2 제어기 설계

제어기의 설계목표로 이중 서보 시스템의 이득통과주파수(Crossover frequency)는  $1500[\text{rad/s}]$  이상으로 하였고, 위상여유(phase margin)는  $45^\circ$  이상으로 설정하였다.  $G_1$  (PZT)와  $G_2$  (VCM)의 전달함수의 주파수 응답은 각각 그림 9 과 10 과 같다.

$P=G_2/G_1$  의 주파수 응답 특성은 그림 11 에 나타나 있다. VCM 과 PZT 의 특성과 설계 목표에 따라 PQ 의 이득 통과 주파수는  $270[\text{rad/s}]$ 로 선정하였으며 PQ 위상여유는  $74^\circ$  로 결정하였다.

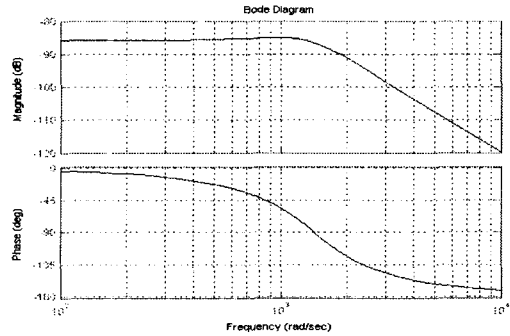


Fig. 9 Bode plot of  $G_1$ (Fine, PZT)

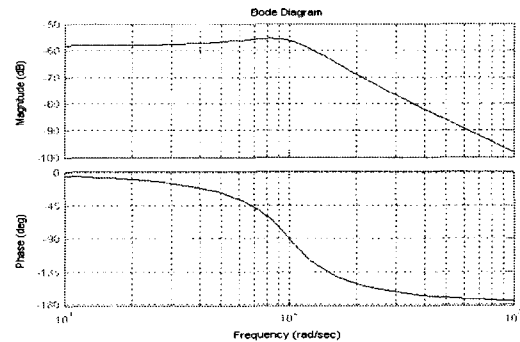


Fig. 10 Bode plot of  $G_2$ (Coarse, VCM)

Q 는 식(11)로 나타내어진다. 그림 12 는 PQ 의 주파수 응답 특성을 나타낸다.

$$Q = 2.87 \frac{0.00885S + 1}{0.0016S + 1} \quad (11)$$

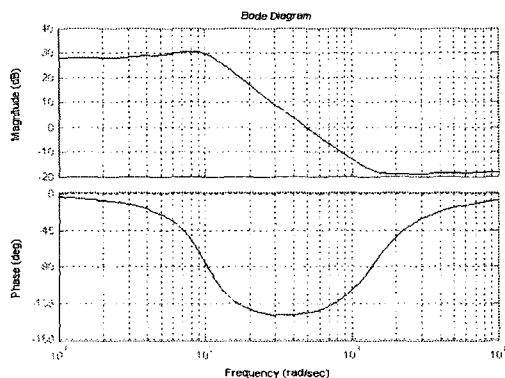


Fig. 11 Bode plot of P

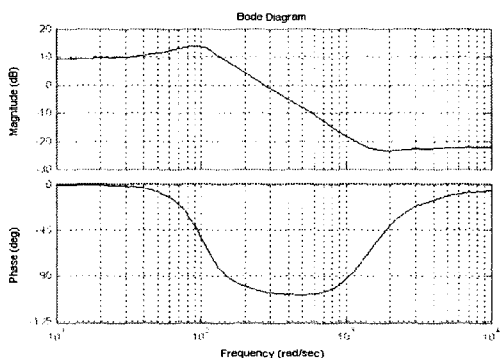


Fig. 12 Bode plot of PQ

PQ 법에 의해 구하여진 Q 로부터  $C_1=1$  과  $C_2=Q$  로 결정된다.  $G_{SISO}$  를 위한  $C_0$  의 설계는 주파수 응답을 이용한 진상제어기(Lead compensator)와 노치 필터(Notch filter)로 설계하였고 식 (12)는  $C_0$  의 전달 함수를 나타낸다.

$C_0G_{SISO}$  의 주파수 응답 특성은 그림 13 과 같다. 그래프에 나타난 전체 시스템의 이득통과 주파수는 2052[rad/s]를 나타내고 있다. 이때 위상여유는 55° 이다. 그림 13 에서 설계한 이득통과 주파수와 위상여유가 제어기의 설계 목표를 만족함을 알 수 있다.

$$C_0 = \left( \frac{0.0108S+1}{0.006S+1} \right) \left( \frac{S^2+63S+9025}{S^2+114S+9025} \right) \quad (12)$$

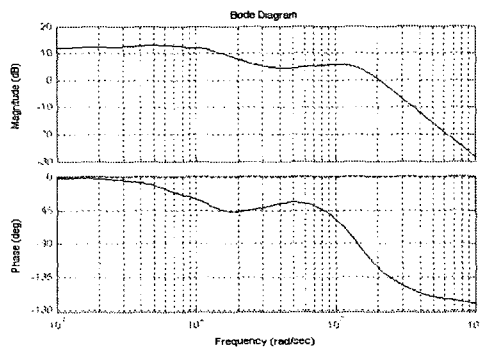


Fig. 13 Bode plot of  $C_0G_{SISO}$

### 3.3 제어 시스템의 민감도 분석

그림 14 는 이중 서보 방식과 단일 서보 방식의 민감도 함수를 나타낸 것이다. 단일 서보는 VCM 만을 사용하는 시스템을 의미한다. 저주파 영역에서는 이중 서보와 단일 서보가 외란에 대한 민감도가 비슷하지만 고주파 영역에서는 이중 서보 방식이 단일 서보 방식보다 외란에 대해 강한 것을 알 수 있다.

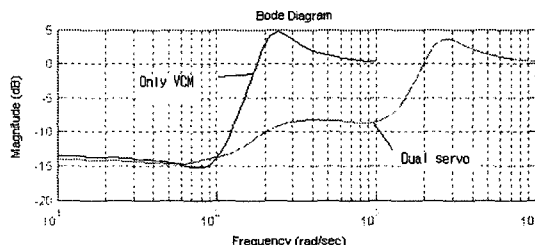


Fig. 14 Sensitivity function of system

## 4. 실험 장치의 구성

외부의 진동에 의한 오차를 방지하기 위해 실험 장치는 방진테이블 위에 설치 되었다. 다음 그림 15 는 실험 시스템의 구성을 나타낸다. 미동 스테이지의 최종단에는 변위를 측정하기 위한 커패시티브(Capacitive) 센서가 이용되었다. 그림 16 은 제작된 이중서보 메커니즘의 사진이다.

Capacitive 센서는 일반적으로 초정밀 변위 측정에서 사용되고 있으며 이론적으로 나노(nano, nm) 단위 이하의 측정 분해능을 가지고 있다. 그러나 본 논문에서는 전기적인 노이즈로 인해 측정

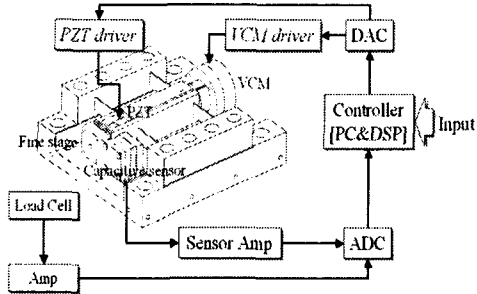


Fig. 15 Block Diagram of experimental system

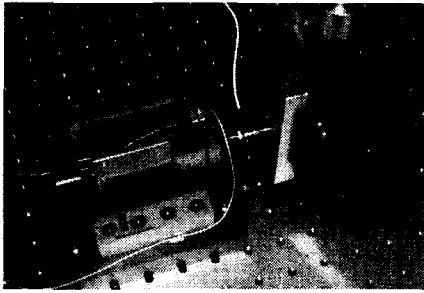


Fig. 16 Picture of dual servo mechanism



Fig. 17 Picture of experimental system

분해능은 약 5nm 이다.  
그림 17 은 실험장치 구성에 대한 사진이다.

### 5. 실험 결과

구성된 이중 서보 시스템의 반복 위치 정밀도를 평가하기 위해 지정된 변위의 이동에 대해 반복적으로 실험 하였다. 이 실험은 1 회 실험당 20 번의 개별적인 실험을 하여 평균값을 산출하였다.

그리고 입력된 명령에 대한 추종 특성을 보기 위해 특정 제어 신호를 주어 추종 정도를 측정하였다.

그림 18 은 반복 정밀도 실험 결과이다. 입력 변위는 40  $\mu\text{m}$  로 하였다. 실험은 10 회를 하였고 각 회별 시간 간격은 4 시간을 두고 실시되었다.

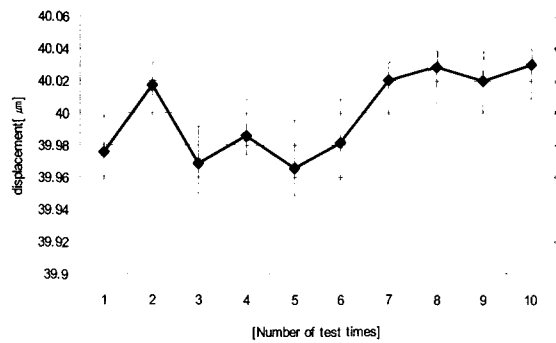


Fig. 18 Measured displacement of input command 40  $\mu\text{m}$

실험 결과 반복 정밀도 성능(repeatability)은 약 100nm 이며 위치 분해능은 약 20nm 이었다.

그림 19 는 미세 시편의 반복 굽힘 시험을 위해 입력된 신호에 대한 측정실험으로써 200Hz 의 사인파와 증가하는 오프셋성분의 합으로 구성된 신호에 대한 추종 결과이다.

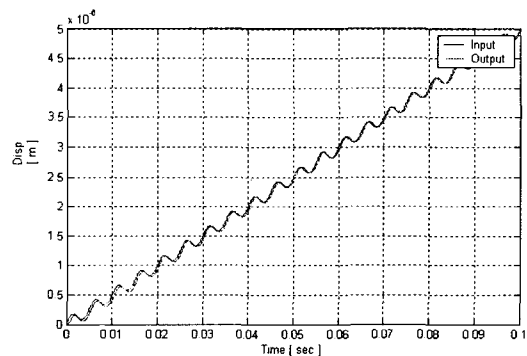


Fig. 19 Measured displacement of Sin + DC offset input

그림 19 의 실험 측정 결과에서 200Hz 의 주파수를 가진 입력에 대해서 추종하는 것을 확인할 수 있다.

## 6. 결론

PZT 와 VCM 을 이용하여 초정밀 위치 제어 메커니즘을 구현하고 실험으로 통하여 제어 성능을 평가하였다. 구현된 초정밀 위치 제어 시스템은 미세 시편의 물성측정 실험을 위한 시험기 등에 응용할 수 있는 성능을 가지고 있다.

이중 서보 메커니즘은 단일 구동기를 사용한 경우보다 외란에 대한 민감도에서 우수하였다.

구현된 시스템은 200Hz 의 주파수 추종 성능을 가지고 있으며 총 구동 범위는 500  $\mu\text{m}$  이다.

발생된 변위 오차는 센서의 전기적 노이즈 문제와 주변의 진동, 그리고 VCM 의 발열에 의한 성능 변화가 원인이 된 것으로 예측된다. 우수한 반복 정밀도 성능을 구현하기 위해서는 피드백 센서의 전기적 노이즈를 제거하기 위한 연구가 필요하며 실험환경에서 진동, 온도, 바람등의 외란을 차단 하기 위한 장치와 연구가 필요하다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대 신기술 개발 사업 중 한국기계연구원이 주관하고 있는 고기능 초미세 광열유체 마이크로 부품 기술개발 사업의 세부과제로서 수행 중이며 이에 관계자 여러분들에게 감사의 말씀을 올립니다.

## 참고문헌

1. Pahk Heui Jae et al, "Ultra precision positioning systems for servo motor-piezo actuator using the dual servo loop and digital filter implementation," international Journal of Machine tools & Manufacture, Vol. 41, pp. 51-63, 2001.
2. Earle G. Cromer, Jr., "Mask Aligners and steppers for precision microlithography," Solid State Technology, pp. 23~27, April 1993.
3. S. Greek and S. Johansson, "Tensile Testing of Thin Film Microstructures," Proc. SPIE, Vol. 3224, pp. 344 - 351, 1997
4. Choi, H. S., Han, C. S., Lee, N. K., Na, K. H., Choi, Choi, T. H., "D-evelopment of micro tensile tester for high functional material," Trans. KSTP, Vol. 11, No. 7, pp. 561 - 568, Dec, 2002.
5. W.N. Sharpe Jr., "An Interferometric Strain/Displacement Measurement System," NASA Technical Memorandum 101638, August, 1989
6. H. Ogawa, K. Susuki, S. Kaneko, Y. Nakano, Y. Ishikawa and T. Kitahara, "Measurement of Mechanical Properties of Microfabricated Thin Film," Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, pp. 430 - 435, Nagoya, January, 1997
7. Higiyaji, Dagasima, "Measuring and test technology in micro/nano technology," Machine & Automation, pp. 14 - 22, 2003.
8. Norbert C. Cheung et. Al, "Modeling and control of a High Speed, Long Travel, Dual Voice Coil Actuator," IEEE Conf. On Power Electronics and Drive Systems, Vol. 1, pp. 270 - 274, 1997.
9. Suh, Snag-Min, Chung, Chung Choo and Seung-Hi Lee, " Discrete-Time LQG/LTR Dual-Stage Controller Design in Magnetic Disk Drives," IEEE Trans. On Magnetics, Vol. 37, No. 4, pp. 1891 - 1895, 2001.
10. Stuart T. smith, "Flexure, Elements of elastic mechanisms," Gordon and Breach Science Publishers.
11. Jang, S. M., et. al, "Design and extraction of control parameter of a moving coil type linear actuator for driving linear reciprocating motion control systems," KIEE, 48B - 5 - 3, pp. 241 - 248, 1999.
12. S. Schroeck and W.C Messner, "On Compensator Design for linear time-invariant dual-input/single-output systems." Proc. American Control Conf., pp. 4122 - 4126, 1999.
13. Steven J. Schroeck, William C. Messner, " On Compensator Design for Linear Time-Invariant Dual-Input Single-Output Systems," IEEE Trans on Mechatronics, Vol. 6, No.1, pp. 50 - 57, 2001.
14. Katsuhiko Ogata, "Modern control engineering, 4rd Edition," Prentice Hall, 2002.
15. Park, J. H., et. al., "Mechanism Design of optical pickup actuator for fast access of optical disk driver," J of the KSPE, Vol. 19, No. 12, pp. 109 -119, Dec, 2002.
16. T. Yi, "Microscale Material Testing of Single Crystalline Silicon," A dissertation for the degree of



doctor of philosophy, University of California, LA,  
2000.

17. Kim, D. M., et. al, "Optimal design and control of  $xy\theta$  fine stage in lithography system," J of the KSPE, Vol. 19, No. 12, pp. 163 - 170, Dec, 2002.