

재료의 기계적 물성측정 시험장치를 위한 이중서보 시스템에 관한 연구

최현석* · 송치우** · 한창수*** · 이형욱**** · 최태훈**** · 이낙규**** · 나경환****

Study of Dual Servo System for Measurement System of Mechanical Property

Hyeun-seok Choi*, Chi-woo Song**, Chang-soo Han***, Hyoung-wook Lee****,
Tae-hoon Choi****, Nak-kyu Lee****, and Kyoung-hoan Na****

ABSTRACT

This paper presents a measurement system of mechanical property using dual servo system. There are many kinds of method to measure material properties such as tensile test, indentation and bending test. It is highly required to measure the properties of nano-sized material and structure. However, It is need more accurate measurement system, more stable and frequency response than conventional test. In this paper, we designed the dual servo system for a measuring instrument. The dual servo system consisting of a coarse stage and a fine motion stage with VCM and PZT is proposed. Mechanical mechanism is designed with the leaf spring type of flexure hinge joint. Lead compensator is applied to this control system, and is designed by PQ method.

Key Words : Thin film tester(박막시험기), Nano Indenter(나노 경도계), VCM(보이스코일모터), PZT(피에조), Dual servo(이중서보), High precision positioning(정밀위치 결정기)

1. 서 론

MEMS 디바이스나 나노(Nano) 단위의 크기와 두께를 갖는 부품들의 개발과 상용화에 대한 연구는 계속 증가하는 추세이다. 이러한 연구는 의료분야, 우주항공분야, 정보 통신분야 등에서 실용화 단계의 제품을 만들어 가고 있다. 실용화 단계의 연구에서 이들 제품에 대한 물성 측정 기술과 신뢰성 평가를 위한 실험법의 연구, 그리고 측정기에 대한 개발이 요구되고 있다[12].

MEMS 디바이스에서는 μm 단위로 미소부재로 하중을 지지하고 있고 특히 가동부에서는 반복 부하를 받게 된다. 개발되어진 기존의 거시적인 시편을 위한 시험장비에서는 이러한 마이크로 단위의 부품이나 재료 시편에 대한 실험은 불가능하다. 또한 나노 단위의 구조물이나 나노 단위의 두께를 가진 박판은 일반적인

거시적인 구조물과 상이한 특성을 나타내므로 시험법에 있어서 거시적인 재료에 대한 시험법을 적용시키기에 어려운 점이 많다. 이러한 이유로 새로운 시험법과 시험장비의 개발이 필요하다[13~14].

본 논문의 연구에서는 상용화 단계에서 필수적인 신뢰성 실험에서 반복 피로 하중 시험과 피로 특성 측정을 위한 시험기를 연구하였다. 굽힘 시험법을 이용하여 재료의 피로 특성을 시험하기 위해 반복 하중을 정밀하게 인가할 수 있는 메커니즘을 제안하고 제어기를 설계하였다.

2장에서는 굽힘시험법에 대한 개념을 기술하였고 3장에서는 굽힘시험을 위한 시험기의 메커니즘과 해석 결과 그리고 4장에서는 제어기의 설계에 대한 내용을 적었다. 5장에서는 실험 결과를 보여주고 있다.

2. 굽힘시험법의 개념

굽힘 시험은 다음 Fig. 1과 마이크로 팁(tip)을 이용하여 미세한 외팔보(Cantilever) 형태의 시편을 일정 길이로 누르며 반력을 측정한다. 굽힘시험은 상용화되어

*한양대학교 정밀기계공학과 박사과정
**한양대학교 정밀기계공학과 석사과정
***한양대학교 기계정보 경영학부 교수
****한국 생산기술연구원

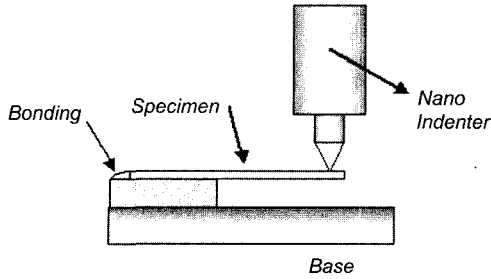


Fig. 1. Schematic of Bending test using nano indenter

있는 나노 인텐터(indenter)를 이용할 수 있다. 한국과학기술원의 이순복 교수는 니켈 박막에 대한 굽힘시험을 나노 인텐터를 이용하여 수행하고 박막의 탄성계수를 측정하였으며 직사각형의 시편을 반도체 공정을 통해 제작하는 어려움이 있었다.

일정한 주파수의 힘을 굽힘 시험편의 외팔보 끝단에 가하며 외팔보의 피로파괴를 관측하는 것이 반복 피로 하중 시험법이다. 일본 도쿄 대학의 히고야기지와 다카시마 가즈키는 PZT를 이용하여 100 Hz의 반복 주파수가 가능한 시험장치를 오스트리아와 공동으로 개발하고 초미소 부품의 피로시험을 실시하였다[15].

반복 굽힘시험은 MEMS부품과 같이 내부에서 반복적으로 변형이 일어나는 부품에 대한 신뢰성 확보에 필수적인 시험법이다. 반복하중시험을 위해서는 주파수 응답성능이 우수하고 위치 정밀도와 최대변위가 큰 시험기가 요구된다.

3. 시험기를 위한 초정밀 메카니즘

3.1. 메커니즘 모델링

높은 정밀도의 위치 제어를 위해 구동기로서 PZT나 VCM이 많이 이용되고 있다. PZT는 정밀도가 수 nm에서 nm 이하의 정밀도를 가지고 있다. 그러나 PZT는 동작 영역이 대부분 수백 μm 이하로 제한적이다. VCM은 초정밀 제어에서 많이 이용되고 있으며 PZT보다 정밀도는 낮으나 동작범위가 넓고 고속의 짧은 움직임이 가능하다[2~4].

넓은 작동 영역과 높은 정밀도를 유지하며 넓은 주파수 응답 특성을 가진 시스템을 구현하기 위한 방법으로 이중 서보 메커니즘을 이용하였다. 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 특성을 가진 미동(fine stage) 스테이지로 구성 된다. 이러한 서로 다른

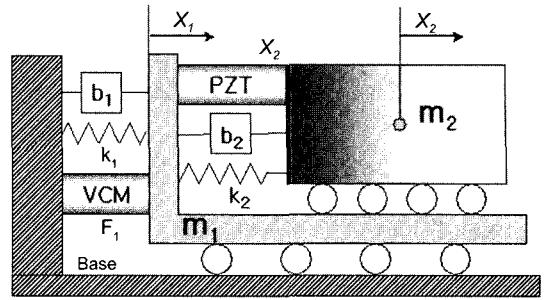


Fig. 2. Mechanical Mechanism Schematic

특성을 가진 스테이지를 사용하여 넓은 작업 영역과 높은 정밀도 그리고 넓은 주파수 응답 특성을 가진 위치 제어시스템을 구현 할 수 있다[1].

조동 스테이지는 베이스와 박판형 힌지(leaf type hinge)로 연결되어 있으며 미동 스테이지는 조동 스테이지와 2축 스프링형 힌지(2axis spring type hinge)로 연결된다. 메커니즘의 모델을 다음 Fig. 2와 같다.

위의 그림과 같이 각각의 스테이지들의 연결은 스프링과 감쇠기(damper)로 표현하였으며 마찰이나 요소의 히스테리시스는 없는 것으로 가정하였다. $m_1(x_1)$ 은 조동 스테이지이며 $m_2(x_2)$ 가 미동 스테이지 이다. 모델링과 해석을 통해 설계 요소에 대한 특성 변화의 경향을 분석 하였다. 모델식은 다음 식(1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 m_1 \ddot{x}_1 + (c_1 + c_2) \dot{x}_1 - c_2 \dot{x}_2 + (k_1 + k_2)x_1 - k_2 x_2 &= F_1 - F_2 \\
 m_2 \ddot{x}_2 + c_2 \dot{x}_2 - c_2 \dot{x}_1 + k_2 x_2 - k_2 x_1 &= F_2
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

미동 스테이지와 조동 스테이지간의 간섭현상을 모의 실험한 결과 Fig. 3, 4에서 보는 바와 같이 m_2 가 가볍고 k_1 의 강성은 낮고 k_2 의 강성이 높을수록 간섭현상

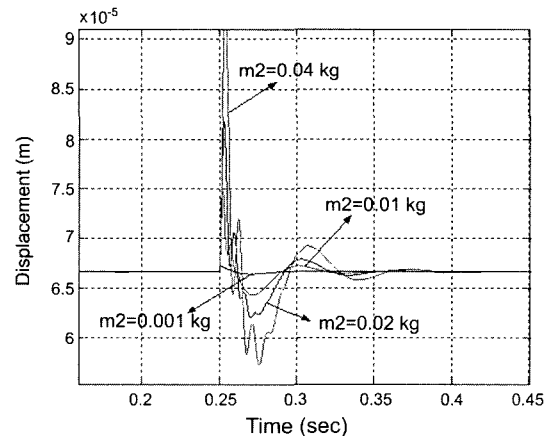


Fig. 3. Coupled motion of a fine stage (m_2 variable)

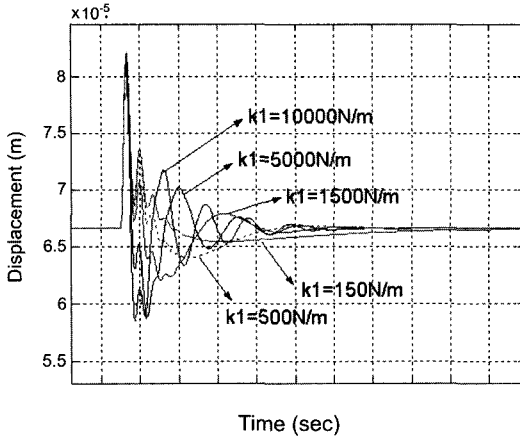
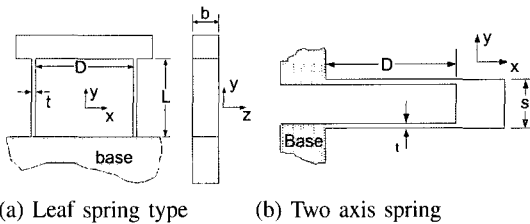


Fig. 4. Coupled motion of a fine stage(k_1 variable)



(a) Leaf spring type (b) Two axis spring
Fig. 5. Applied flexure hinges

은 낮게 나타났다.

3.2. 힌지 조인트 메카니즘

Flexure hinge 메카니즘은 하나의 단일 구조로 되어 있기 때문에 정밀 변위를 구현하는데 매우 효과적이다. Flexure hinge는 탄성변형과 소성변형으로부터 운동성이 구현된다. 또한 그것의 움직임은 마찰이 없이 부드럽고 연속적인 특성을 구현할 수 있다. Fig. 5은 메카니즘에 적용된 박판 스프링형(Leaf spring type)과 2축 스프링형(Two axis spring type) 힌지 조인트이다[9].

Leaf type flexure hinge는 조동 스테이지에 적용하였으며 two axis type flexure hinge는 미동 스테이지에 사용하였다. 복수의 flexure hinge를 사용함으로써 축대칭 구조를 구현하였다. 대칭 구조를 이용으로써 구동시 발생하는 구동축 방향 이외의 부가적인 움직임을 무시할 수 있었다.

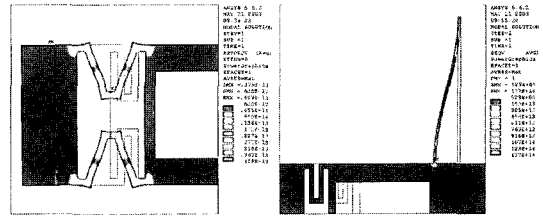
식 (2)와 (3)은 flexure hinges의 강성을 나타내고 있다.

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

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

where,

E : Modulus of elasticity I_{zz} : Moment of inertia z-axis
 b : width of flexure t : thickness of flexure
 L : Length of flexure



(a) Fine part (b) Coarse part
Fig. 6. FEM analysis results

Fig. 6은 적용된 힌지 조인트의 FEM해석 결과이다. 해석 결과 우려할 만한 응력 집중은 없었으며 설계한 힌지 조인트의 강성을 검증할 수 있었다. 메카니즘 본체와 힌지 조인트의 재질은 알루미늄이며 방전가공을 하였다.

3.3. 보이스코일모터의 모델링

조동 스테이지의 구동기인 VCM은 전자기 부분과 메카니즘 부분으로 나누어 Fig. 7와 같이 모델링을 할

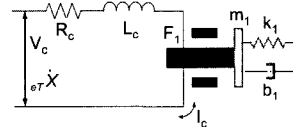


Fig. 7. Schematic of Coarse part (VCM)

수 있다. 전자기 부분의 지배 방정식은 식(4)와 같다.

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

$(e_T = NBI)$

where,

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

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.

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

$$(e_v = NBI)$$

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

$$G(s) = \frac{e_v}{m_1 s^2 + \left(b_1 + \left(\frac{e_v e_T}{L_C s + R_C} \right) \right) s + k_1} \cdot \frac{1}{L_C s + R_C}$$

$$= \frac{e_v}{m_1 L_C s^3 + \alpha s^2 + \beta s + k_1 R_C} \quad (7)$$

where, $\alpha = m_1 R_C + b_1 L_C + L_C e_v e_T$
 $\beta = b_1 R_C + R_C e_v e_T + k_1 L_C$

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

G(s)를 2차 모델로 근사화 함으로써 코일의 인덕턴스와 BEMF의 효과를 무시할 수 있다. 식(7)은 G(s)의 2차 모델을 나타내고 있다.

$$G_n(s) = \frac{NBI}{m_1 s^2 + b_1 s + k_1 s} \cdot \frac{1}{R_C} \quad (7)$$

4. 이중 서보 시스템 설계

4.1. 이중 서보 시스템의 구조

VCM과 PZT의 제어기에 의해 각각의 구동기에 제어 입력이 인가되며 조동 스테이지의 끝단에 설치 되어있는 capacitive 센서에 의해 변위를 측정한다.

4.2. 초정밀 위치 제어를 위한 제어기 설계

VCM과 PZT두개의 구동기(Actuator)를 이용한 일반

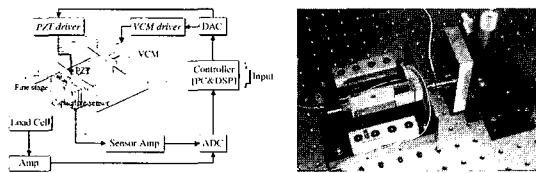
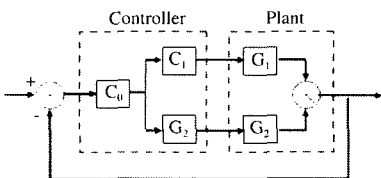


Fig. 8. Picture and Schematic of dual servo system



G₁: Fine Actuator (PZT) G₂: Coarse Actuator (VCM)

Fig. 9. Dual-input/Single-output block diagram⁴⁾

적인 이중 서보 시스템의 제어기와 구동기는 Fig. 9과 같은 블록선도로 나타낼 수 있다.

제어 시스템의 보상기를 설계하는데 있어서 중요한 요소 중 하나는 안정성(Stability)이다. 시스템의 안정성은 전달함수 G₁C₁과 G₂C₂의 병렬 연결에 의해 만들어진 DISO시스템의 전달함수에서 영점(Zeros)의 위치에 따라 정하여 진다. 왜냐하면 불안정 영역에 존재하는 영점은 폐루프 시스템의 대역폭을 제한하기 때문이다 [10]. DISO시스템의 전달함수는 식(8)과 같다.

$$T \cdot F = \frac{C_0(G_1 G_1 + G_2 G_2)}{1 + C_0(G_1 G_1 + G_2 G_2)} \quad (8)$$

제어시스템에서 G₁과 G₂의 출력의 위상(Phase) 또한 중요한 요소이다. 만일 어떤 주파수에서 같은 크기의 출력이 위상차가 180°에 가깝다면 전체 출력의 크기는 서로 상쇄되어 크게 떨어질 것이다. 본 논문에서는 시스템의 영점이 안정한 영역 내에 있도록 설계하고 각각의 출력이 중첩될 수 있도록 위상을 설정하였다.

4.3. PQ 설계법

PQ 설계법은 Messner등이 제안한 제어기 설계방법으로 이중 서보 시스템을 2개의 단일 서보 시스템으로 각각 해석하여 제어기를 설계하고 있다. PQ 설계법에서는 DISO 시스템에 대해 다음 Fig. 10과 같이 SISO 시스템으로 상사시킨다[5],[10].

$$G_{SISO} = C_1 G_1 + C_2 G_2 \quad (9)$$

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

P와 Q는 식(9)과 같이 정의된다. 주파수 응답에서 P를 안정화 시키는 제어기 Q를 설계한다. 저주파수 영역에서는 PQ의 크기가 크고 고주파수 영역에서는 PQ의 크기가 작다. 즉 고주파 영역에서는 G₁이 G₂보다 상대적으로 많이 작동하며, 저주파수 영역에서는 G₂가 G₁보다 상대적으로 많이 작동한다. Q를 설계할 때, PQ의 위상여유가 60° 이상이 되어야 한다. 이러한 조건에서 두개의 구동기(Actuator)는 서로 중첩되는 효과를 기대할 수 있다.

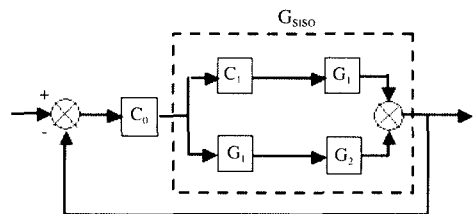


Fig. 10. Equivalent SISO system⁴⁾

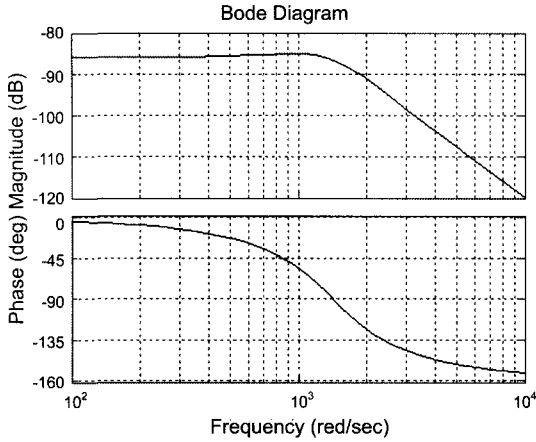


Fig. 11. Bode plot of G1 (Fine, PZT)

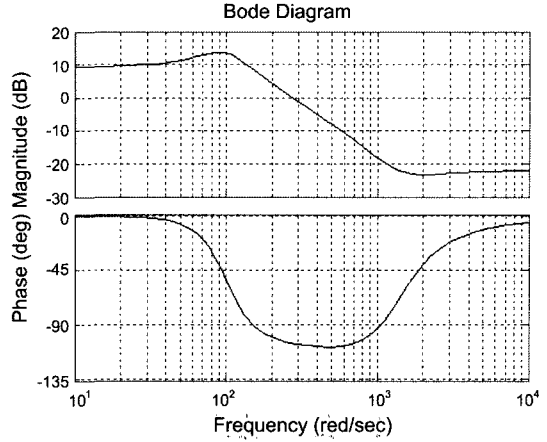


Fig. 13. Frequency response of PQ

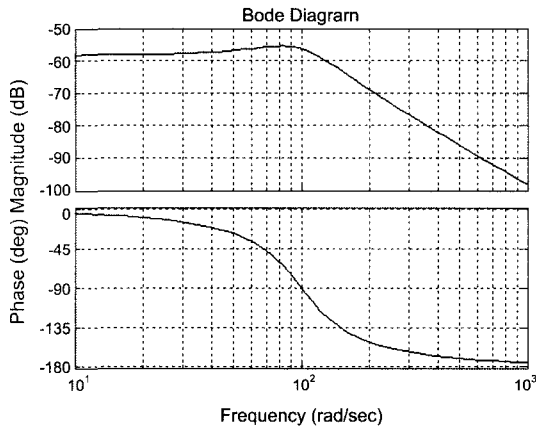


Fig. 12. Bode plot of G2 (Coarse, VCM)

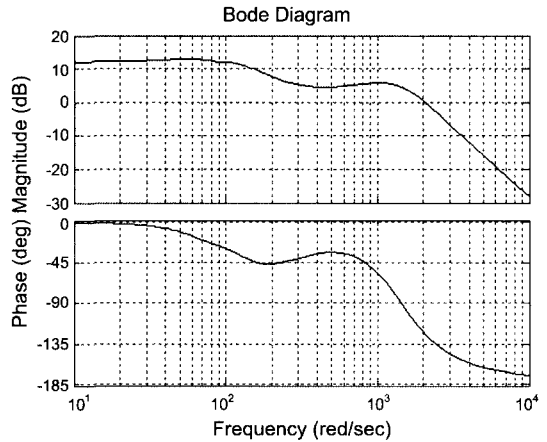


Fig. 14. Frequency response of C₀G_{SISO}

4.4. 이중서보를 위한 제어기 설계

제어기의 설계목표로 이중 서보 시스템의 이득통과 주파수(Crossover frequency)는 1500(rad/s)이상으로 하였고, 위상여유(phase margin)는 45°이상으로 설정하였다. G₁과 G₂의 전달함수의 주파수 응답은 각각 그림 Fig. 11와 Fig. 12과 같다.

$P=G_2/G_1$ 의 주파수 응답 특성은 Fig. 12에 나타나 있다. VCM과 PZT의 특성과 설계 목표에 따라 PQ의 이득 통과 주파수는 270(rad/s)로 선정하였으며 PQ위상여유는 74°로 결정하였다. Q는 식(10)로 나타내어진다. Fig. 13은 PQ의 주파수 응답 특성을 나타낸다.

$$Q = 2.87 \frac{0.00885 S + 1}{0.0016 S + 1} \quad (10)$$

$$C_0 = \left(\frac{0.0108 S + 1}{0.006 S + 1} \right) \left(\frac{S^2 + 63S + 9025}{S^2 + 114S + 9025} \right) \quad (11)$$

PQ법에 의해 구하여진 Q로부터 C₁=1, C₂=Q로 결정

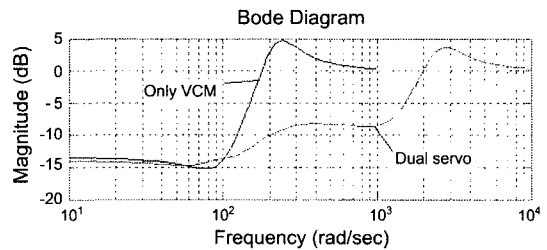


Fig. 15. Sensitivity function of dual servo system

되어진다. G_{SISO}를 위한 C₀의 설계는 주파수 응답을 이용한 진상제어기(Lead compensator)와 노치 필터(Notch filter)로 설계하였고 식 (11)는 C₀의 전달 함수를 나타낸다. C₀G_{SISO}의 주파수 응답 특성은 Fig. 14과 같다. 그래프에 나타난 전체 시스템의 이득통과 주파수는 2052(rad/s)를 나타내고 있다. 이때 위상여유는 55°이다. 설계한 이득통과 주파수와 위상여유가 제어기의 설계 목표를 만족함을 알 수 있다.

Fig. 15는 VCM만을 사용한 단일 서보와 이중서보에 대한 민감도 함수를 나타낸 것이다. 저주파 영역에서는 이중 서보와 단일 서보가 외란에 대한 민감도가 비슷하지만 고주파 영역에서는 이중 서보 방식이 단일 서보 방식보다 외란에 대해 민감도가 덜한 것을 알 수 있으며, 이는 이중서보가 단일 서보 보다 외란에 대해 강한 성능을 가지고 있음을 나타낸다.

5. 성능 실험 및 결과

피로하중 굽힘시험을 위해 본 논문에서 개발한 시험

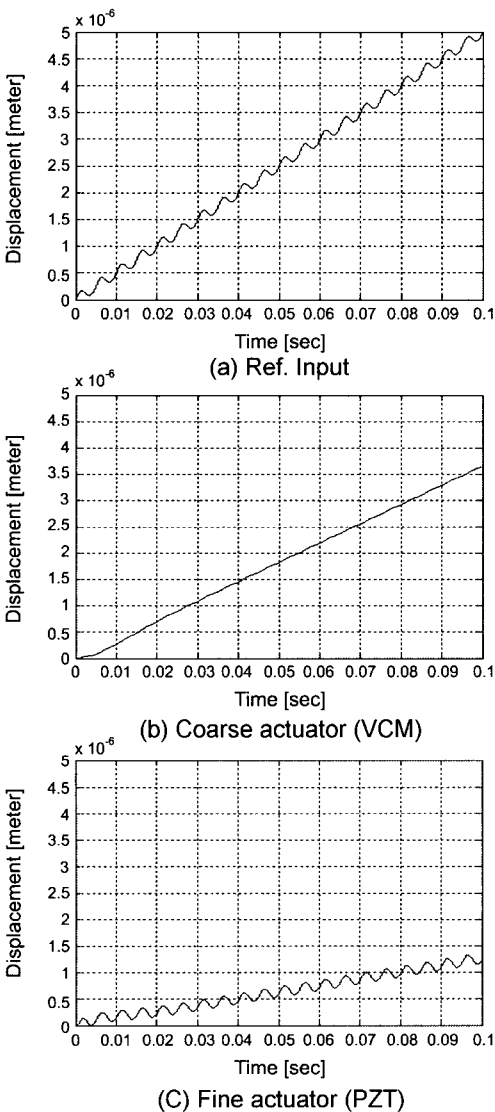


Fig. 16. Experiment result

시스템에 Fig. 15(a)와 같은 형태의 하중인가 조건을 설정하였다. 시험조건은 0.1초 동안 5 μm 의 변위를 가지며 동시에 진폭 100 nm와 200 Hz의 주파수 성분이 포함되어 있다.

실험결과 PZT와 VCM 각각에 고주파수와 저주파영역으로 나누어 구동 신호가 입력되는 것을 확인할 수 있었다. 각각의 위치 변위는 Fig. 16(b), (c)와 같다.

본 논문의 시험장치에서 구현된 사양은 다음과 같다.

Table. 1 System spec

가능한 시험	굽힘, 피로, 파괴시험		
최대변위	500 μm	변위분해능	5 nm
최대하중	5 N	하중분해능	30 mN
최대반복주파수	200 Hz		

6. 결 론

박막의 굽힘시험을 위해 시험장치를 개발하였다 높은 반복 주파수와 변위 그리고 정밀도를 구현하기 위해 두개의 구동기를 이용한 이중서보 시스템을 제안하고 제어기를 설계하였다.

설계된 이중서보 시스템은 실험결과 굽힘 시험에 적합한 주파수 성능과 위치 정밀도를 가지고 있었으며 이로써 초미세 부품에 대한 평가 시험장치로 적절함을 알 수 있었다.

향후 하중에 대한 분해능의 성능향상을 위해 하중센서의 보완과 노이즈 처리에 대한 연구가 필요하다고 사료된다.

감사의 글

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. Pakh, H.J., 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, 41, pp 51-63, (2001).

2. 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", 한국전기학회, 48B-5-3, pp. 241-248 (1999).
3. Cheung, N.C., et al, "Modeling and control of a High Speed, Long Travel, Dual Voice Coil Actuator", IEEE Conf. On Power Electronics and Drive Systems, 1, pp. 270-274 (1997).
4. Chroeck, S.S., and Messner, W.C. "On Compensator Design for linear time-invariant dual-input/single-output systems" Proc. American Control Conf., pp. 4122-4126 (1999).
5. Lichuan, Li. "Copper Loss Reduction of a Voice-Coil Motor for Cutting Tool Positioning Using an Auxiliary Rotary Motor", IEEE Trans on Industrial Electronics, 46(1), pp. 227-229 (1999).
6. Suh, S.-M., Chung, C.C., and Lee, S.-H., "Discrete-Time LQG/LTR Dual-Stage Controller Design in Magnetic Disk Drives", IEEE Trans. On Magnetics, 37(4), pp. 1891-1895 (2001).
7. Smith, S.T., "Flexure, Elements of elastic mechanisms", Gordon and Breach Science Publishers.
8. Schroeck, S.J., and Messner, W.C. "On Compensator Design for Linear Time-Invariant Dual-Input Single-Output Systems", IEEE Trans on Mechatronics, 6(1), pp. 50-57 (2001).
9. Ogata, K. "Modern control engineering, 4rd Edition", Prentice Hall, (2002).
10. Greek, S., and Johansson, S. "Tensile Testing of Thin Film Microstructures", Proc. SPIE, 3224, pp. 344-351 (1997).
11. Sharpe Jr, W.N., "An Interferometric Strain/Displacement Measurement System", NASA Technical Memorandum 101638, August, (1989).
12. Yi, T., "Microscale Material Testing of Single Crystalline Silicon", A dissertation for the degree of doctor of philosophy, University of California, LA, (2000).
13. 히고야지, 다카시마 가스키, "마이크로/나노테크놀로지를 뒷받침하는 평가계측기술", 기계&자동화, pp. 14-22 (2003).