

이중서보제어루프와 디지털 필터를 통한 서보모터-압전구동기의 초정밀위치결정 시스템 개발

이동성*, 박종호*, 박희재**

Ultra Precision Positioning System for Servo Motor-piezo Actuator Using the Dual Servo Loop and Digital Filter Implementation

Dong Sung Lee*, Jong Ho Park*, Heui Jae Pakh**

ABSTRACT

In this paper, an ultra precision positioning system has been developed using dual servo loop control. For positioning system having long distance with ultra precision, the combination of global stage and micro stage was required. A servo motor based ball screw is used as a global stage and the piezo actuator as a micro stage. For the improvement of positional precision, the digital Chebyshev filter is implemented in the developed to dual servo system. Therefore, the positional repeatability has been achieved within ± 10 nm, and this technique can be applied to develop precision semiconductor equipments such as lithography steppers and probers.

Key Words : piezo actuator(압전소자 구동기), servo motor(서보 모터), dual servo loop(이중 서보 루프), global stage(글로벌 스테이지), micro stage(마이크로스테이지), digital filter(디지털 필터)

1. 서론

정밀공학의 발달과 초정밀 미세 기술의 발달로 인해 초정밀 미세 운동에 관한 기술은 근래에 들어 실질적인 중요한 기술중의 하나로 대두되고 있다.

현재 100mm 이상의 긴 이송 안에서 1 μ m이하의 분해능을 구현하려는 연구는 여러 가지 방법으로 진행 중에 있으며 그중 실제적으로 산업계에 적용하기에 적합한 형태는 이중 서보기구를 이용하는 방법이다⁽¹⁾. 서보 모터와 볼 스크류를 이용하는

* 서울대학교 기계설계학과 대학원

** 서울대학교 공과대학 기계항공공학부

일반적인 위치결정기구는 비교적 긴 이송 거리(최대 250mm)를 가지고 있으나 백래시, 스틱슬립 등에 의하여 구현할 수 있는 분해능의 한계를 안고 있으며 정밀 가공을 통한 기계적 특성의 향상도 가공상의 현실적인 제약에 의해 초정밀 미세 운동의 구현은 기존의 방법만으로는 불가능하다. 또한 초정밀 미세 운동기구는 높은 분해능을 구현하고 있으나 일반적 위치결정기구에 비하여 행정거리가 매우 작으므로 실제 산업계에 적용하는데 있어서 여러 가지 제한이 있게 된다. 따라서 두 가지 기구의 장점을 살려 하나의 시스템으로 통합한 이중서보 스테이지는 기존의 위치결정기구의 긴 이송거리를 가지며 또한 초정밀 미세 위치 결정기구의 높은 분해능을 구현한다. 그리고 이중서보 스테이지의 성능은 미세 운동 기구의 성능에 좌우되므로 미세 운동 기구의 설계와 제어가 매우 중요한 요소라 할 수 있다. 현재 가장 보편적으로 사용되고 있는 초정밀 미세 운동 기구는 구동부로 압전소자 구동기(Piezo-Actuator)와 탄성힌지를 이용하며 레이저 인터페로미터를 이용하여 변위를 측정한다. 이중서보 스테이지의 가장 많은 산업적 응용의 하나는 반도체 장비 분야이다. 현재 우리 나라의 반도체 산업은 급속한 발전을 이루고 있으며 이와 더불어 반도체의 고집적화가 가속되고 있다. 이러한 고집적의 반도체의 생산에 있어서 집적도의 한계는 광원의 물리적 특성과 더불어 웨이퍼 스테퍼(Wafer Stepper)와 같은 리소그래피 스테퍼(Lithography stepper)의 위치 결정 정도가 주요한 요인이 된다. 따라서 수십 nm의 초정밀 위치 결정 시스템의 개발은 서브마이크론 급의 선폭(Line and Space)을 생산하는데 있어서 필수적인 전체 조건이 된다. 이는 반도체 웨이퍼 등의 제조공정인 리토그래피 공정에서 원판인 필름으로부터 나온 이미지를 매우 정밀하게 반도체 웨이퍼 표면에 노광시키는 작업공정 중에서 원판의 이미지와 웨이퍼를 정밀하게 정렬시키는 공정에 중요하게 사용된다. 현재 국내의 반도체 산업은 세계적인 수준에 있지만 대부분의 반도체 생산장비는 국내에서 자체적으로 생산하지 못하고 있는 실정에 있다. 그러므로 초정밀 위치결정 시스템의 개발은 고집적 반도체의 생산과 더불어 반도체 생산 장비의 국산화 측면에서 큰 의미가 있다. 따라서 본 연구에서는 이에 부합하기 위하여

10nm 수준의 위치결정 정밀도를 가지는 초정밀 위치 결정 기구의 설계, 제작을 목적으로 하며 또한 긴 행정거리에 대한 초정밀 위치 결정이 가능한 이중 서보 방식에 의한 고급 제어기술을 구현하도록 한다. 구체적으로 미소 이송을 위한 마이크로 스테이지가 제작되었으며, 긴 이송 거리에서의 높은 분해능을 구현하기 위한 이중 서보 제어 시스템이 구현되었고 이송 정밀도를 향상시키기 위해서 디지털 필터를 도입하였다. 제안된 시스템이 구체적으로 제작 구현되어 전체 이송거리에서 약 ±10 nm의 위치정밀도를 가지는 초정밀시스템이 구현되었다.

2. 미소이송장치 용 마이크로 스테이지 시스템

2.1 마이크로 스테이지의 설계 및 정적 성능

미소 이송을 구현하는 효율적인 방법중의 하나는 탄성 힌지(flexure hinge)를 이용하는 것으로서, 탄성 힌지에 의한 미소 이송 메카니즘은 탄성 변위에 의한 이송을 구현하므로 마찰이 없고, 부드럽고 연속적인 운동을 할 수 있다는 면에서 많이 사용되고 있는 현실이다. Fig.1에 기본적인 탄성 힌지의 형상을 보이고 있으며, 힌지 형상에 따라 노치힌지(Notched Flexure), 원형힌지(Circular Flexure 또는 Universal Joint)등으로 대별된다. 탄성 힌지를 설계할 때 중요한 설계 포인트인 굽힘 강성(Bending Stiffness)은 Paros⁽²⁾, Smith⁽³⁾ 등에 의해서 알려져 있다.

Fig.1의 노치 힌지에서 노치 반경을 R, 노치 두께를 t, 노치의 폭을 b라 하면, $2R+t \approx b$ 일 때 굽힘강성 K_B 는

$$K_B = \frac{2Ebt^{5/2}}{9\pi R^{1/2}} \text{ ----- (1)}$$

이 되고 원형힌지의 경우 굽힘강성 K_B 는

$$K_B = \frac{Et^{7/2}}{20R^{1/2}} \text{ ----- (2)}$$

가 된다. 여기서 E는 영률(Young's modulus)을 의미한다. 이와 같은 탄성힌지는 운동의 대칭성 및 효율성, 연속성 등을 고려하여 복수개의 힌지가

연계되어 마이크로 스테이지를 구현한다. Fig.2는 본 연구에서 설계된 마이크로 스테이지를 보이고 있으며, 1방향의 미소 이송운동을 구현하기 위해서 8개의 노치 힌지로 구성되어 있다. 설계된 마이크로 스테이지의 이송방향(q)의 강성 K는 에너지 법칙으로부터 다음과 같이 유도된다. 마이크로 스테이지가 q만큼 이송할 때, L을 스테이지(Stage)의 중심으로부터 탄성힌지 까지의 유효거리라고 하면, 각각의 힌지는 q/2L 만큼의 각도로 회전하게 된다. 따라서 이송 스테이지의 전체 탄성에너지 U는 각각의 힌지에서 회전에 의한 탄성에너지의 합과 같다. 즉, n을 힌지의 개수라고 할 때 전체 탄성에너지는

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} K_B \left(\frac{q}{2L} \right)^2 \quad \text{---- (3)}$$

$$= \frac{n}{2} K_B \left(\frac{q}{2L} \right)^2$$

이 되고 힌지의 개수 n=8이므로

$$U = K_B \frac{q^2}{L^2} \quad \text{----- (3')}$$

이 된다. 따라서 에너지 법칙으로부터 q방향의 힘 F_q 는 전체 탄성에너지 U의 q 방향의 편미분 값과 같아지므로

$$F_q = \frac{\delta U}{\delta q} = 2K_B \frac{q}{L^2} \quad \text{----- (4)}$$

가 되어 q 방향의 강성 λ_q 는 노치 힌지의 경우에

$$\lambda_q = \frac{F_q}{q} = \frac{2K_B}{L^2} = \frac{4Ebt^{5/2}}{9\pi L^2 R^{1/2}} \quad \text{--- (5)}$$

이 된다.

2.2 마이크로 스테이지의 동적성능

마이크로 스테이지의 동적 성능은 스테이지의 고속성, 응답성 및 진동 흡수 특성들과 관련한 매우 중요한 특성치가 된다. 설계한 마이크로 스테이지의 동적 성능에 대한 분석은 다음과 같이 Lagrangian⁽⁴⁾ 원리를 이용하여 수행한다. 마이크로 스테이지가 q 방향의 속도 q', 가속도 q''를 가지고 움직인다고 할 때 스테이지의 운동에너지 T는

$$T = \frac{1}{2} Mq'^2 + 4 \times \frac{1}{2} I_o \left(\frac{q'}{L} \right)^2 \quad \text{----- (6)}$$

이 된다. 여기서 M은 스테이지 이송부의 질량, I_o

는 탄성힌지 몸통부의 관성모멘트로서 탄성힌지를 기준 축으로 하는 값이다.

$$\text{즉, } I_o = \frac{ml^2}{12} + m \left(\frac{l}{2} \right)^2 = \frac{ml^2}{3} \quad \text{---- (7)}$$

여기서 m은 탄성힌지 몸통부의 질량, l은 탄성힌지 몸통부의 길이이다.

그러므로 식(5)에서

$$T = \frac{1}{2} Mq'^2 + 4 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{ml^2}{3} \cdot \frac{q'^2}{L^2} \quad \text{(7')}$$

$$= \frac{1}{2} Mq'^2 + \frac{2ml^2 q'^2}{3L^2}$$

한편 스테이지의 탄성 위치에너지 U는 λ_q 를 q 방향의 강성이라고 할 때

$$U = \frac{1}{2} \cdot \lambda_q \cdot q^2 \quad \text{----- (8)}$$

가 된다. 따라서 Lagrangian Multiplier L은

$$L = T - U = \frac{1}{2} Mq'^2 + \frac{2ml^2 q'^2}{3L^2} - \frac{1}{2} \lambda_q q^2 \quad \text{----- (9)}$$

그러므로 마이크로 스테이지의 운동방정식은

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta q'} \right) - \frac{\delta L}{\delta q} = 0 \quad \text{----- (10)}$$

이므로

$$\frac{\delta L}{\delta q'} = Mq' + \frac{4ml^2 q'}{3L^2}, \quad \frac{\delta L}{\delta q} = -\lambda_q \cdot q$$

를 (10)에 대입하면

$$\left(M + \frac{4m}{3} \frac{l^2}{L^2} \right) q'' + \lambda_q q = 0 \quad \text{----- (10')}$$

그러므로 마이크로스테이지의 고유진동수 ω_n 은

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\lambda_q}{M + \frac{4ml^2}{3L^2}}}$$

$$= \sqrt{\frac{4Ebt^{5/2}}{9\pi R^{1/2} L^2 \left(M + \frac{4ml^2}{3L^2} \right)}}$$

$$= \sqrt{\frac{4Ebt^{5/2}}{9\pi R^{1/2} L^2 M + 12\pi R^{1/2} ml^2}} \quad \text{(rad/sec)}$$

----- (11)

가 된다.

따라서 마이크로 스테이지의 설계와 관련한 강성,

동적 성능 등을 분석하였으며, 이는 탄성 힌지를 이용한 마이크로 스테이지 설계 및 구동에 매우 핵심적인 데이터가 된다. 설계 제작된 마이크로 스테이지가 Fig.2에 나타나 있다.

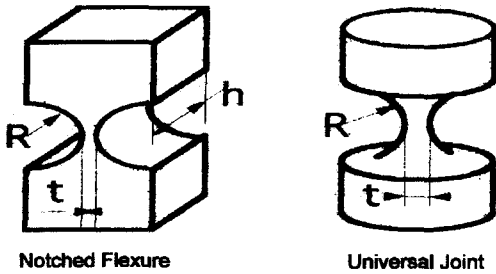


Fig. 1 Typical flexure hinges : notched flexure, circular flexure(universal joint)

3. 이중서보 제어 루프 알고리즘

3.1 이중서보시스템의 구성

이중서보제어 시스템은 압전소자와 탄성힌지를 이용한 마이크로 스테이지와 서보모터와 볼 스크류 결합으로 이루어진 글로벌 서보 스테이지로 이루어 진다. 글로벌 서보에 의해 1차적으로 위치 결정을 이루며 서보 마이크론의 정밀 위치 결정은 글로벌 서보 스테이지 위에 장착된 마이크로 스테이지가 2차적으로 담당하게 된다. 이에 대한 이중서보시스템의 개략도가 Fig.3에 나와있다. 글로벌 서보는 DC 서보 모터(Servo Motor) 및 볼 스크류(Ball Screw)에 의해 구현되고 있으며 PC에 장착된 DSP (Digital Signal Processor) 보드에서 PID (Proportional Integral Derivative) 제어루프에 의해 구동되고 있다. 피드백신호는 DC 서보 모터(Servo Motor)에 부착 되어있는 인코더(Encoder)를 통해 DSP 보드에 입력된다. 인코더(Encoder) 분해능은 0.5um이며 볼스크류의 정밀도는 대략 4um

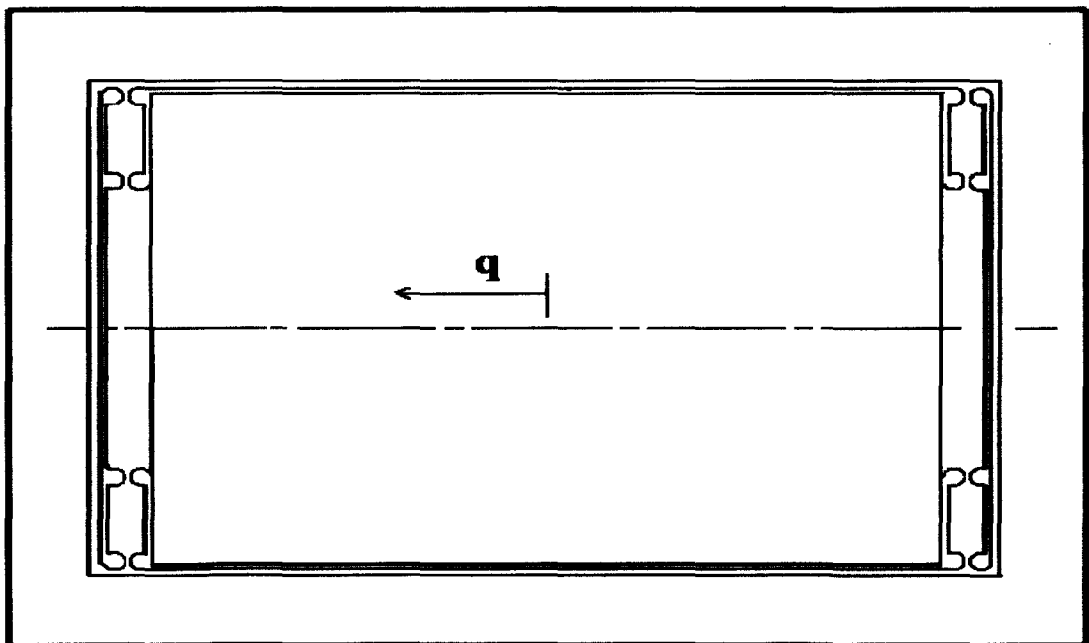


Fig. 2 Designed micro stage

성도이고 글로벌 서보의 스테이지는 이상적인 분해능이 0.5 μm 이나 실제 기계적인 정밀도는 기구적인 마찰 및 백래시 등의 영향으로 이보다 떨어지게 된다. 그러므로 글로벌 스테이지 위의 마이크로 스테이지가 이에 대한 보상을 해주어야 한다. 마이크로 스테이지의 구동은 압전소자의 초정밀 스테이지에 의해 이루어지고 레이저인터페로미터에 의한 피드백(feedback)을 받으며 PC에 의한 콘트롤에 의해 위치제어를 하게 된다. 마이크로 스테이지를 글로벌 스테이지에 올리지 않고 방진 테이블 위에 바로 장착한 상태에서는 약 $\pm 10\text{nm}$ 수준의 정밀도를 얻을 수 있었으나 글로벌 스테이지 위에 마이크로 스테이지를 장착한 경우에는 이보다 정밀도가 떨어지는 결과를 얻었다. 따라서 정밀도를 향상시키기 위한 기술로서 디지털 필터를 구현하였으며 이에 대한 상세한 논의는

흐름도(flow chart)가 Fig.4에 나와 있다. 즉, 시스템 목표 제어 위치(system target position)가 입력되면 글로벌 스테이지가 일차적으로 압전소자의 구동 범위인 $\pm 10\mu\text{m}$ 의 위치 오차 범위 내로 이송된다. 일차적인 이송에서 오차 범위가 $\pm 10\mu\text{m}$ 범위를 벗어나게 되면 글로벌 스테이지는 원래의 시스템 목표 제어 위치(system target position)과 현재의 실제 위치(real position)의 차이를 새로운 목표 위치(target position)으로 하여 상대적인 이송을 하게 된다. 이런 과정을 거쳐서 글로벌 스테이지가 $\pm 10\mu\text{m}$ 의 위치 오차 범위 이내로 들어오면 글로벌 스테이지는 정지되고, 2차적으로 글로벌 스테이지 위의 마이크로 스테이지의 압전소자가 위치결정을 담당하게 된다. 마이크로 스테이지에 입력되는 목표 위치(target position)은 시스템 목표 제어 위치(system target position)에서 현재의 실제 위치(Real

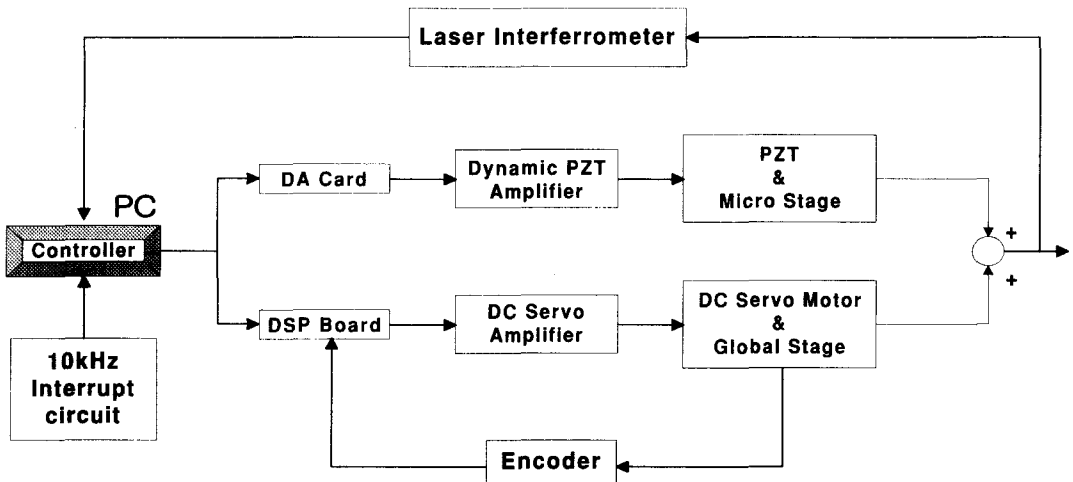


Fig. 3 Block diagram of the dual servo loop for positioning system

4절에서 설명된다. 또한 정확한 샘플링 타임(sampling time)을 얻기 위하여 타이머/카운터(timer/counter) 카드를 이용하여 하드웨어 인터럽트 루틴을 사용하였다. 이를 통하여 10kHz의 샘플링 타임(sampling time)을 구현하여 제어 루프를 구성하였다.

3.2 이중 서보 제어 알고리즘

본 논문에서 사용된 이중 서보 제어 알고리즘의

Position)의 차가 된다. 10kHz 마다 수행되는 인터럽트 루틴 안에서는 레이저 인터페로미터에 의해 현재의 변위가 측정되고 이를 통한 제어 루프 계산을 하게 된다. Fig.4에서 글로벌 스테이지 제어 루프는 위치지령에 따른 서보모터 구동제어회로를 의미하고, 마이크로 스테이지 제어 루프는 마이크로 스테이지 위치지령에 따른 압전소자 구동 제어 회로를 의미한다. 각 구동제어 회로의 상세한 블록선도는 4.3절 Fig.10에서 설명된다.

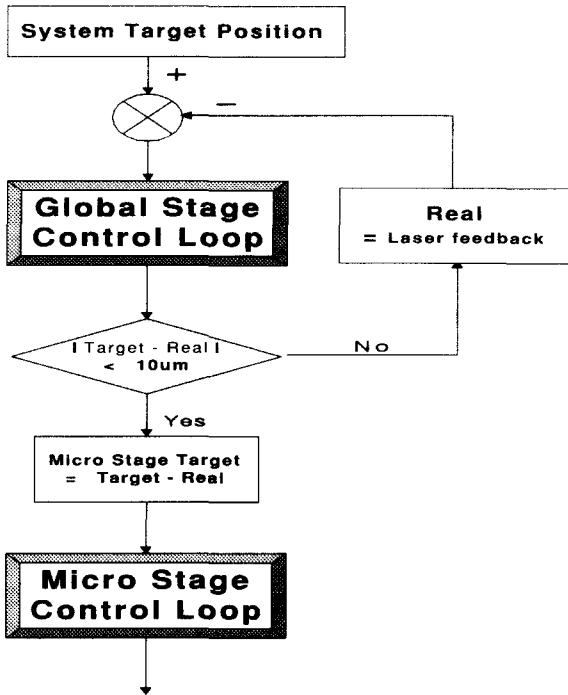


Fig. 4 Flow chart for dual servo loop algorithm

변위도 높이만큼의 배로 증가하여 측정 결과에 포함되어 오차성분이 된다. 마그네틱척의 진동은 실제 스테이지의 변위와는 무관하게 측정오차를 유발시키며 이는 실제 변위가 아님에도 불구하고 위치제어 시 변위에 포함되어 피드백 되므로 시스템의 제어 성능을 떨어뜨리는 결과를 가져온다. 따라서 이러한 시스템의 노이즈 성분을 제거함으로써 시스템의 제어성능을 향상시키기 위한 디지털 필터를 설계하였다.

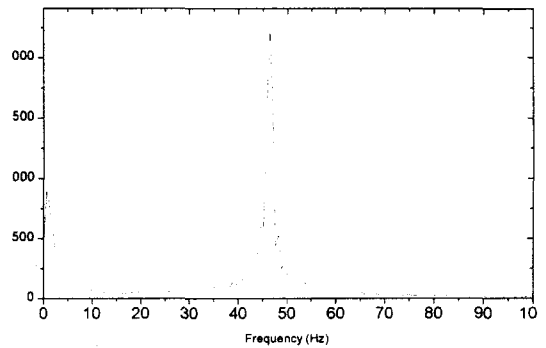


Fig. 5 Frequency spectrum of the stage response

4. 시스템의 위치결정 정밀도 향상을 위한 디지털 필터의 구현

4.1 주파수 성분 분석

실제 시스템 구현 시에는 예기치 못한 노이즈 성분들이 시스템의 성능을 떨어뜨리는 역할을 하게 된다. 구성된 이중서보제어 시스템에서는 이러한 요인들을 파악하여 위치 결정 정밀도를 향상하기 위해서 다양한 지령에 대한 응답 특성을 실험하였다. 측정된 응답 특성을 주파수 성분(Fig.5)으로 분석하였으며 약 30 nm 정도의 크기에 46Hz 정도의 주파수를 가지는 노이즈 성분이 발견되었으며, 이에 대한 원인 중 가장 큰 것은 Fig.6에 있는 것처럼 마그네틱척과 바를 통해서 구성된 인터페로미터의 유틱스 고정치구의 진동성분으로 분석되었다. Fig.6 에서 글로벌 스테이지에 마이크로 스테이지가 올라간 경우는 그 올라간 높이 만큼 레이저 측정선이 높아지게 된다. 따라서 미세한 진동

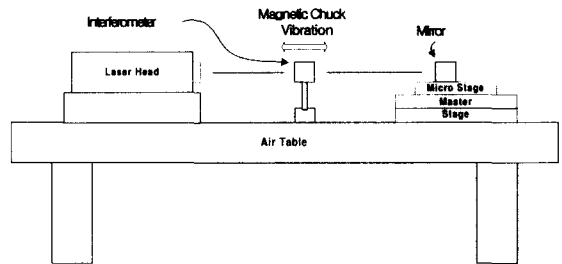


Fig. 6 Measurement system setup demonstrating magnetic chuck vibration

4.2 디지털 필터의 설계

시스템의 노이즈 성분으로 작용하는 진동 주파수 대역인 46Hz 근처의 주파수를 차단하는 Chebyshev 필터⁽⁵⁾를 설계하여 Fig.7과 같이 이를 시스템에 도입하였다. 시스템에 사용된 일반적인 n차의 디지털 필터의 전달 함수(H(z))는 다음과 같다.

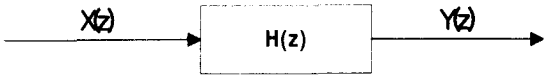


Fig. 7 Block diagram of Chebyshev filter

$$H(z) = K \frac{1 + b_1z^{-1} + \dots + b_nz^{-n}}{1 + a_1z^{-1} + \dots + a_nz^{-n}}$$

, $K = b_0$

----- (12)

여기서 n 은 디지털 필터의 차수이며 $K, a_i, b_i (i=1, 2, \dots)$ 는 결정되어야 할 계수이다. 본 논문에서는 10차의 필터를 고려하였으며 이를 실제 제어 루틴에 사용하기 위해서 10차의 분수다항식을 2차의 분수다항식 5개의 곱으로 근사화하여 사용하였다.

즉,

$$H(z) = K * H_1(z) * H_2(z) * H_3(z) * H_4(z) * H_5(z)$$

----- (13)

이 되고, 여기서 $H_1(z) \sim H_5(z)$ 는 2차의 디지털 필터를 의미한다. 그리고 각 디지털 필터의 구체적인 입력신호와 계수들은 Fig.8과 같다. 위의 Chebyshev 필터는 Fig.8의 입력력 신호들을 각 샘플링 시간에서의 디스크리트(discrete) 신호로 변환하여 구현된다. $X_i(k)$ 를 X_i 신호의 현재 시간에서의 값, $X_i(k-n)$ 를 현재 보다 n 샘플링 시간 전의 값이라고 하고, Z 변환(Z-Transform)의 식인 $L\{f(k-n)\} = z^{-n}F(z)$ 을 기억하면 Fig. 8의 근사화 된 필터들과 입출력 신호와의 관계는 식(14)와 같이 된다⁽⁶⁾.

여기서 $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, Y$ 는 Fig.8에서 보인 필터의 입출력을 의미한다. 그리고 10kHz의 샘플링 시 46Hz 근처의 주파수 성분을 차단하기 위하여 컷오프 대역 주파수(Cut off bandwidth frequency) 40~55Hz, 리플(ripple) 0.3, 차수는 10차로 하여 MATLAB을 통하여 최적 계수값을 구하였다. 소수점 4자리의 유효자리수를 갖는 구체

$$X_1(k) = -a_{11}X_1(k-1) - a_{12}X_1(k-2) + X(k) + b_{11}X(k-1) + b_{12}X(k-2)$$

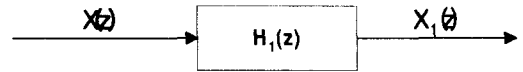
$$X_2(k) = -a_{21}X_2(k-1) - a_{22}X_2(k-2) + X_1(k) + b_{21}X_1(k-1) + b_{22}X_1(k-2)$$

$$X_3(k) = -a_{31}X_3(k-1) - a_{32}X_3(k-2) + X_2(k) + b_{31}X_2(k-1) + b_{32}X_2(k-2)$$

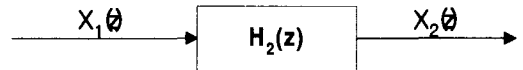
$$X_4(k) = -a_{41}X_4(k-1) - a_{42}X_4(k-2) + X_3(k) + b_{41}X_3(k-1) + b_{42}X_3(k-2)$$

$$X_5(k) = -a_{51}X_5(k-1) - a_{52}X_5(k-2) + X_4(k) + b_{51}X_4(k-1) + b_{52}X_4(k-2)$$

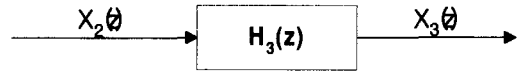
$$Y(k) = KX_5(k) \tag{14}$$



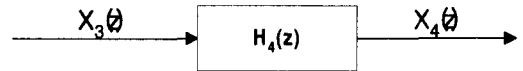
$$H_1(z) = \frac{1 + b_{11}z^{-1} + b_{12}z^{-2}}{1 + a_{11}z^{-1} + a_{12}z^{-2}}$$



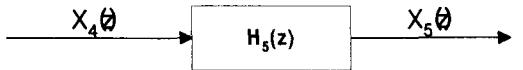
$$H_2(z) = \frac{1 + b_{21}z^{-1} + b_{22}z^{-2}}{1 + a_{21}z^{-1} + a_{22}z^{-2}}$$



$$H_3(z) = \frac{1 + b_{31}z^{-1} + b_{32}z^{-2}}{1 + a_{31}z^{-1} + a_{32}z^{-2}}$$



$$H_4(z) = \frac{1 + b_{41}z^{-1} + b_{42}z^{-2}}{1 + a_{41}z^{-1} + a_{42}z^{-2}}$$



$$H_5(z) = \frac{1 + b_{51}z^{-1} + b_{52}z^{-2}}{1 + a_{51}z^{-1} + a_{52}z^{-2}}$$

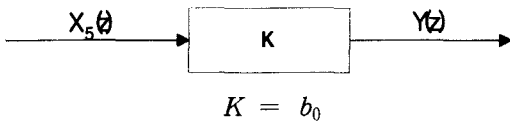


Fig. 8 Approximated digital filters, $H_1(z)$ to $H_5(z)$

적인 필터 계수값이 Table 1에 있으며, 구현된 Chebyshev 필터의 주파수 특성이 Fig.9에 나타나 있다.

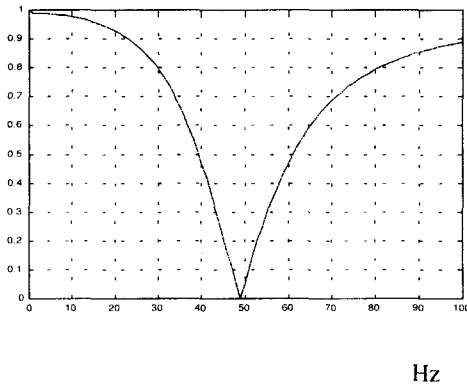


Fig. 9 Characteristic of the Digital Chebyshev filter

Table 1 Digital Chebyshev filter coefficients

i \ j	a_{ij}		b_{ij}	
	1	2	1	2
1	-1.6658	0.8483	-1.8901	1.0000
2	-1.7900	0.9681	-1.8901	1.0000
3	-1.6080	0.7015	-1.8901	1.0000
4	-1.8537	0.9116	-1.8901	1.0000
5	-1.9147	0.9802	-1.8901	1.0000

$$K = 0.9782$$

4.3 대역 필터를 통한 이중서보 루프 시스템의 위치제어

Chebyshev 필터가 추가된 시스템의 블록선도가 Fig. 10에 나와 있다. 즉, 레이저 측정장치로부터의 위치 피드백신호가 PC에 입력되면, PC 제어가 수행되어 이중서보 제어 루프를 구동하고 마이크로 스테이지와 글로벌 스테이지의 운동을 통해서 정밀위치제어를 수행한다. 본 연구에서는 마이크로 스테이지의 운동제어는 PI제어를 글로벌 스테이지의 운동제어에는 PID 제어를 수행하였으며, 마이크로 스테이지에서는 속도 피드백을 직접 받을 수 없으므로 미분제어기는 사용하지 않았다. 그리고 각 제어 루프의 비례상수는 실험적 방법으로 구하여 사용하였다. Fig. 11a와 11b는 500nm 스텝 입력에 대한 응답곡선으로서, 설계된 Chebyshev 필터를 사용한 것과 사용하지 않은 것을 비교하여 위치 제어를 수행한 결과이다. 필터 사용 전(Fig. 11a)과 비교해보면 필터 사용 후에는 $\pm 10\text{nm}$ 정도의 위치정밀도를 가지는 것으로 나타났다. 한편 개발된 이중서보 시스템의 효율성을 실험하기 위해서 100um의 위치 지령에 대하여 글로벌 스테이지만을 구동하고 마이크로 스테이지는 구동하지 않은 경우와, 글로벌 스테이지와 마이크로 스테이지를 모두 구동하는 경우를 구분하여 응답특성을 관찰하였다. Fig.12a는 글로벌 스테이지만을 구동하는 경우로서 약 3um의 계통 오차 성분과 함께 노이즈 성분이 들어 있는 것을 알 수 있다. Fig.12b는 글로벌 스테이지와 마이크로 스테이지를 함께 구동할 때의 응답 특성으로서 계통 오차 성분은 존재하지 않으며 노이즈 성분도 디지털 필터의 구현으로 10nm 이내에 드는 것을 알 수 있다. 따라서 이중서보 시스템의 효율성이 입증되었으며, 정확한 위치결정 시스템으로서의 기능이 가능해졌다. 또한 실제 시스템 구현 시 측정 장치의 노이즈 성분 이외에도 전원 노이즈 등 시스템에 영향을 줄 수 있는 요인들은 디지털 필터에 의해 차단함으로써 시스템의 성능을 높일 수 있다는 결론을 얻었다.

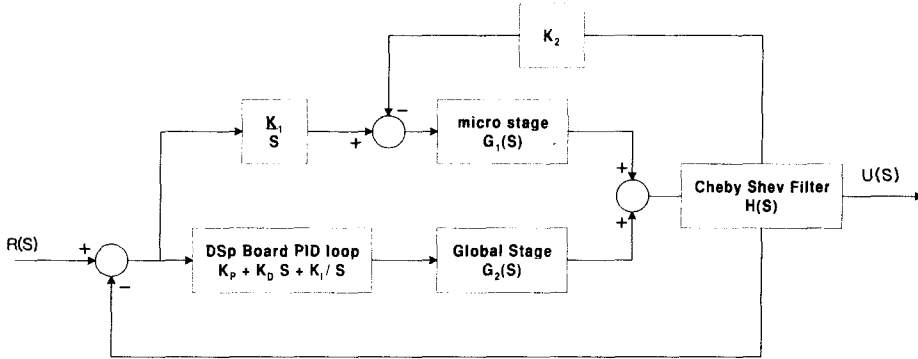


Fig. 10 Block diagram for the dual servo loop implementing digital filter

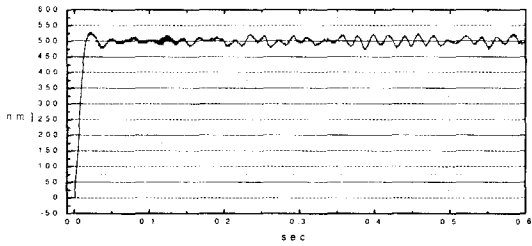


Fig. 11a 500nm step response without Chebyshev filter

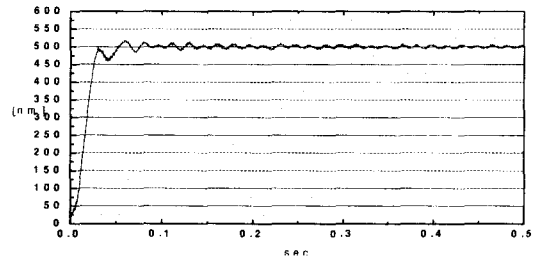


Fig. 11b 500nm step response with Chebyshev filter

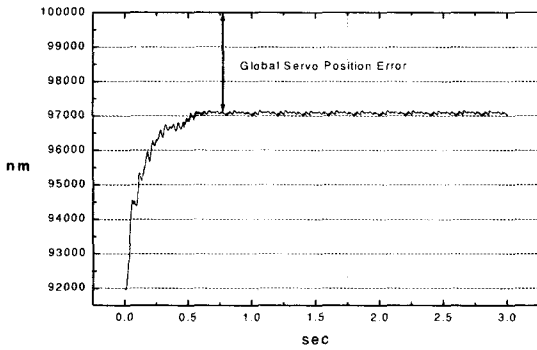


Fig. 12a Response of global stage under 100um command showing 3um positional error with noise components

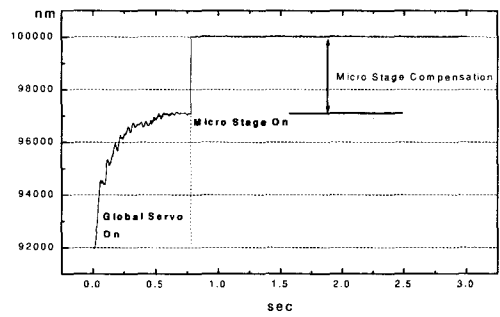


Fig. 12b Response of global-micro stage under 100um command showing about 10 nanometre noise components

5. 결론

서보모터-압전구동기로 구성되는 이중서보 제어 시스템이 구현되었으며 결론은 다음과 같다.

- (1) 서보모터(글로벌스테이지), 압전구동기(마이크로스테이지)로 구성되는 이중서보제어 시스템이 구현되어 약 200mm의 행정거리에 대해서 10nm의 위치정밀도를 가지는 시스템이 개발되었다.
- (2) 초정밀 위치결정을 위한 마이크로 스테이지가 설계되었으며, 정적성능, 동적성능 등의 스테이지 성능평가가 이루어졌고, 결과로서 마이크로 스테이지에 대한 설계 변수의 정량화가 가능하여 다양한 초정밀 위치결정 분야로의 응용이 기대된다.
- (3) 이중서보제어루프의 위치정밀도를 향상시키기 위해서 오차 진동성분에 대한 주파수 분석이 수행되어 측정 광학계의 마그네틱척의 진동임이 밝혀졌으며, 이는 디지털 필터를 통해서 매우 효율적으로 처리될 수 있었다. 따라서 실제 시스템에서는 주파수 성분 분석을 통하여 시스템에 영향을 주는 노이즈 성분을 분석하고 디지털 필터를 이용, 이의 주파수 영역을 차단하여 시스템의 위치결정 성능을 높일 수 있다.
- (4) 측정신호의 진동성분을 제거하기 위한 디지털 필터로서 10차의 Chebyshev 필터가 구현되었으며, MATLAB 환경에서 계수 최적화를 통하여 매우 효율적인 Chebyshev 필터가 설계, 구현되었다.
- (5) 이중서보시스템의 효율성을 확인하기 위하여 글로벌 스테이지만을 구동하는 경우와 글로벌 스테이지와 마이크로 스테이지가 함께 구동되는 경우를 100um의 위치 지령에 대한 시스템의 응답특성을 관측하였으며 전자의 경우에는 명확한 계통오차 성분과 노이즈 성분이 남아있는데 반해 후자의 경우에는 약 10nm정도의 노이즈 성분만이 남아있어서 개발된 이중서보시스템의 효율성이 입증되었다.
- (6) 개발된 이중서보시스템은 스테퍼, 프로버 등과 같은 초정밀 반도체 장비뿐만 아니라 정밀 기계장비에도 사용될 수 있는 핵심기술로서 응용분야가 매우 광범위하게 기대되고 있다.

후기

이 논문은 1996년 한국 학술 진흥재단의 학술연구비에 의하여 지원되었음

참고문헌

1. 박종호, "압전소자와 유니버설 원형 굽힘 힌지를 이용한 초정밀 6자유도 운동시스템 개발" 서울대 석사학위논문
2. J.M.Paros and L.Weisbold, "How to design Flexure Hinges," Machine Design, 1965.
3. S.T.Smith and D.G. Chetwynd, "Foundation of ULTRAPRECISION MECHANISM DESIGN" Gordon and Breach Science Publishers, pp.99-100, 1994.
4. Leonard Meitrovitch, "Elements Of Vibration Analysis," McGraw-Hill International Editions, 1986.
5. R.G. Brown "Signals And Applied Kalman Filtering," Wiley, 1985.
6. 이동성, 박희재, "이중서보제어루프와 chebyshev 필터를 이용한 반도체 장비용 초정밀 위치결정 기술 개발," 한국정밀공학회 춘계 학술대회 논문집, p874-878, 1998.