

압전 소자 기반 구동 유닛의 히스테리시스 보상 강인 제어기 설계

김화수*, 김종원⁺

(논문접수일 2011. 10. 18, 심사완료일 2011. 12. 27)

A Robust Control System Design for Compensating Hysteresis of a Piezoelectric Actuator-based Actuation Unit

Hwa-Soo Kim*, Jong-Won Kim⁺

Abstract

In this paper, we presents a robust control system design for compensating hysteresis of a piezoelectric actuator-based actuation unit. First, the dynamics between the input voltage and the output displacement of the actuation unit are unravelled via a non-parametric system identification method. From the dynamic characteristics of those experimental transfer functions, a parametric model is then derived, whose dynamics match those of the non-parametric ones under various conditions on input voltages. A robust controller is constructed on the basis of this parametric model in order not only to effectively compensate the hysteresis of the actuation unit but also to guarantee the robust stability. Extensive experiments show that the proposed robust control system successfully mitigate the effect of the hysteresis and improve the tracking capability of the actuation unit.

Key Words : Piezoelectric actuator(압전 소자), Flexure hinge(유연 힌지), Actuation unit(구동 유닛), Hysteresis(히스테리시스), System identification(시스템 식별), Robust control(강인 제어)

1. 서론

반도체 제작 공정에서의 집적도 증가 및 첨단 디스플레이 기기에 대한 폭발적인 수요 증가 등에 따라 서브 마이크론 이하의 높은 분해능과 반복 정밀도를 구현할 수 있는 초정밀 가공 및 구동 기기에 대한 요구가 꾸준히 증가되어 왔다⁽¹⁾.

특히 나노 분야에 이용되는 계측 시스템의 경우, 위치 결정용 초정밀 스테이지의 개발은 필수적인 요건이라 할 수 있으며 이에 따라 초정밀 스테이지의 성능 조건을 만족시키기 위하여 다양한 구동기와 이동 가이드의 조합이 적용되어 왔다. 그 가운데에서도 빠른 응답 성능과 높은 분해능을 지닌 압전 소자(piezoelectric

actuator)와 탄성 변형을 통하여 부드럽고 연속적인 운동을 제공할 수 있는 유연 힌지(flexure hinge)의 조합이 널리 사용되고 있다^(2,3). 하지만, 압전 소자가 가지고 있는 대표적인 비선형성인 히스테리시스(hysteresis)로 인한 이동 변위의 변형 및 손실은 해결해야 할 문제로 남아 있다⁽⁴⁻⁶⁾.

히스테리시스의 특성을 제어하기 위해 여러 가지 방법으로 이를 모델링 해 왔는데 대표적으로 Jiles-Atherton 모델과 Preisach 모델이 있다⁽⁵⁾. Jiles-Atherton 모델의 경우 Preisach 모델과 비교할 때, 모델링에 필요한 해석 시간이 짧아 실시간 제어에 적합하나 다소 부정확하다는 단점이 있다. 이에 반해, Preisach 모델의 경우, 실제 측정값을 바탕으로 유도된 모델이므로 정확

* 교신저자, 경기대학교 기계시스템공학과 (hskim94@kgu.ac.kr)

주소: 경기도 수원시 영통구 이의동 산 94-6

+ 서울대학교 기계항공공학부

하지만 모델링에 필요한 해석 시간이 길어 실시간 제어에는 부적절한 단점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 시스템 식별 기법(system identification)을 적용하여 인가전압에 따라 변화하는 압전 소자 기반의 구동 유닛의 변위를 비 매개 변수 모델(non-parameter model)로 유도하고 이를 바탕으로 강인 제어기를 설계하여 히스테리시스를 보상하고 실시간 제어에 적용하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저, 2장에서는 초정밀 스테이지의 구동부로 설계된 압전 소자 기반의 구동 유닛(actuation unit)을 소개하고 시스템 식별 기법을 사용하여 인가전압과 출력 변위 사이의 비 매개 변수 모델을 유도한다. 한편, 인가전압의 크기 변화에 따른 구동 유닛의 출력 변위의 특성을 파악하고 이를 하나의 파라미터를 사용하여 파라미터 화 한다. 3장에서는 구동 유닛의 성능 조건에 대해 분석하고 2장에서 유도된 파라미터 화 된 모델을 바탕으로 이를 만족시키기 위한 강인 제어기를 설계한다. 마지막으로 4장에서는 설계된 강인 제어기를 적용한 다양한 입력 신호에 대한 시뮬레이션 및 실험을 통하여 설계된 강인 제어가 압전 소자의 히스테리시스를 효과적으로 보상함을 확인한다.

2. 구동 유닛의 모델링

2.1 구동 유닛의 구조 및 히스테리시트 거동

Fig. 1의 (a)는 초정밀 스테이지용 구동 유닛의 단면 모습 및 운동 메커니즘을 나타내고 있다. 압전 소자는 앞과 뒤로 각각 두 개의 원형 유연 힌지(circular flexure hinge)로 연결되어 압전 소자의 종 방향(longitudinal direction)의 힘은 전달하고 횡 방향(lateral direction)의 힘이나 모멘트에 대해서는 변형 및 파괴가 일어나도록 함으로써 횡 방향의 충격에 대하여 압전 소자를 보호하는 역할을 수행한다. 원형 힌지의 한 쪽은 스테이지의 바닥부에 고정되어 있고 다른 한 쪽은 두 개의 원형 힌지를 직렬로 연결한 pole의 구멍을 통하여 레버(lever)에 연결된다. 이때, 레버는 노치형 유연 힌지(notched flexure hinge)로 바닥부와 연결되어 회전 운동만을 하게 된다. 따라서, 구동 유닛은 압전 소자의 수평 방향 운동이 레버의 회전 운동을 통하여 pole의 수직 방향 운동으로 전환되는 운동 메커니즘을 갖게 된다⁽⁷⁾.

Fig. 1의 (b)는 3개의 구동 유닛이 적용된 3-자유도 (X, Y축 방향의 회전 및 Z축 방향의 병진 운동) 초정밀 스테이지의 모습을 도시하고 있다. 설계된 구동 유닛이 적용된 스테이지의 경우, 압전 소자를 수직 방향으로 배치하는 일반적인 초정밀 스테이지와 비교할 때, 압전 소자를 수평 방향으로 배치할 수 있으므로 그 높이를 크게 낮출 수 있으며 또한, 연속적인 유연 힌지 및 레버의 조합을 통하여 초정밀 스테이지의 수평 방향 강성을 증가시켜 수평 방향의 미세 진동이 초정밀 스테이지에

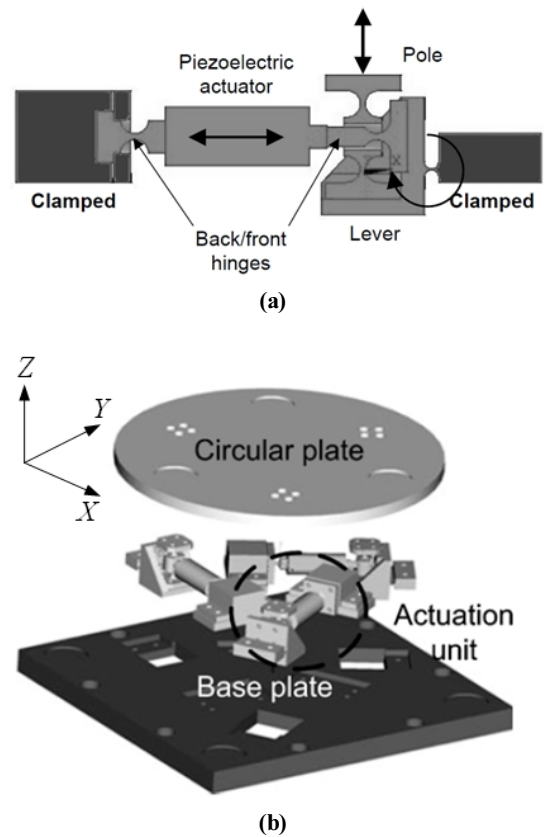


Fig. 1 (a) Schematic diagram of piezoelectric actuator-based actuation unit and (b) precision-stage using actuation unit

미치는 영향을 감소시킬 수 있다는 장점이 있다.

구동 유닛에 사용된 압전 소자는 Piezomechanik사의 PS500/10/25 모델로 0V~500V의 입력 전압에 대하여 최대 변위 25 μ m를 갖는다. 구동 유닛 조립 시 예압을 줌으로써 여유를 제거하고 또한, 동일 범위의 팽창 및 수축 효과를 가질 수 있도록 구동 유닛의 초기 변위로 12.5 μ m의 오프셋을 설정하였다. 전압은 전압 증폭기(Piezomechanik사의 SVR150)를 통하여 1000배 증폭되어 압전 소자에 입력되며 이 때 발생하는 구동 유닛의 수직 방향의 변위는 구동 유닛의 pole의 말단부에서 정전 용량 센서(Lion Precision사)를 통하여 측정되었다.

압전 소자의 히스테리시스 거동을 살펴보기 위하여 여러 주파수의 사인파(sine wave)와 삼각파(triangular wave) 형태의 인가전압에 대한 구동 유닛의 출력 변위를 측정하였으며 Fig. 2의 (a)와 (b)는 3Hz 사인파 및 삼각파 형태의 인가전압에 대한 출력 변위의 관계를 도시하고 있다. Fig. 2의 (a)와 (b)에서 볼 수 있듯이 인가전압이 상승하다가 하강하는 경우, 또는 그 반대의 경우 압전 소자의 추종 성능이 저하되며 또한 이러한 추종 성능의 저하는 인가전압의 형태에 따라서도 영향을 받을 수 있다는 사실을 확인하였다⁽⁸⁾. 따라서, 인가전압의 파형에 따

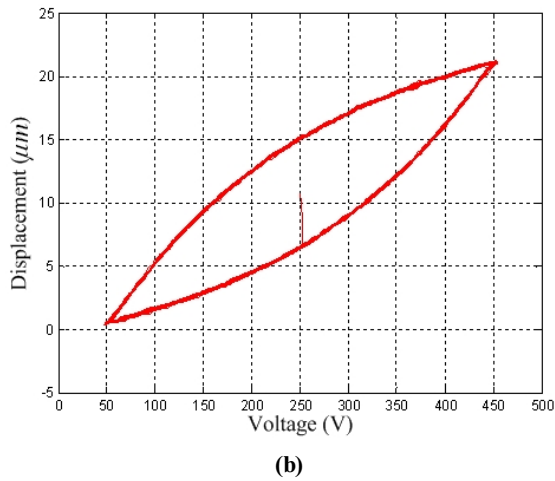
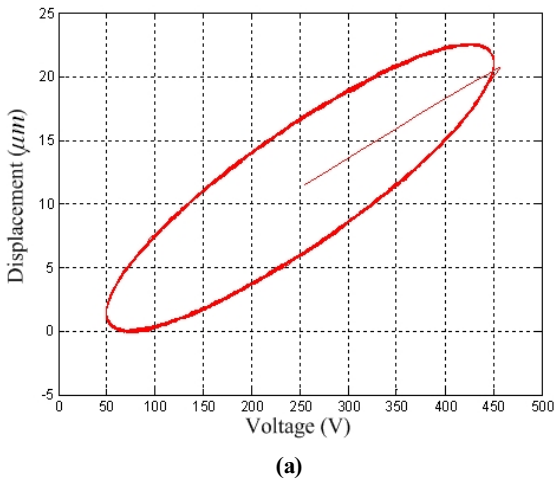


Fig. 2 Hysteresis trajectories of actuation unit between output displacement output and voltage input of (a) 3Hz sine and (b) 3Hz triangular waves

라서도 히스테리시스 궤적이 달라진다는 점에 비추어 볼 때, 임의의 형태로 주어지는 인가전압에 대하여 그에 따른 히스테리시스 궤적을 기존의 방법처럼 여러 개의 파라미터를 사용하여 수식화 된 모델로 유도하는 것은 어려운 것으로 판단된다.

2.2 구동 유닛의 비 매개 변수 모델링 및 파라미터 화

이 절에서는 시스템 식별 기법을 통하여 압전 소자의 인가전압으로부터 구동 유닛의 출력 변위까지의 전달함수를 비 매개 변수 모델로 유도하고 인가전압의 크기에 따라 변화하는 특성을 이용하여 하나의 파라미터를 사용하여 파라미터 화 한다.

먼저 시스템 식별을 위하여 5Hz ~ 300Hz의 주파수 밴드를 가지는 임의 형태의 파형(random wave)을 압전 소자에 인가한다. 이 때, 인가전압의 크기 변화가 시스템 동적인 특성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여, 인가전압의 최대 크기를 예압을 주기 위한 초기 전압 250 V로부터 일정한 분산을 가지며 100 V

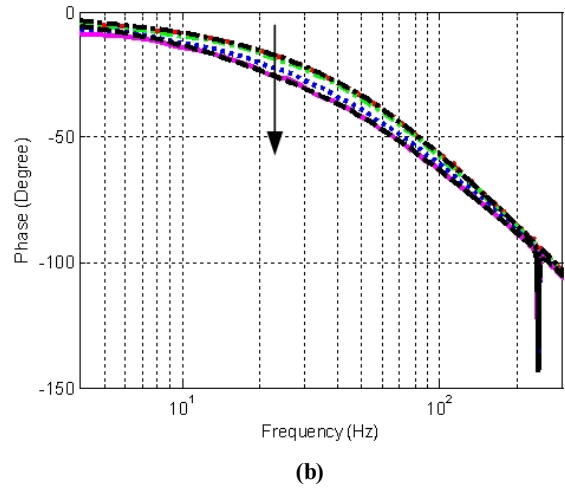
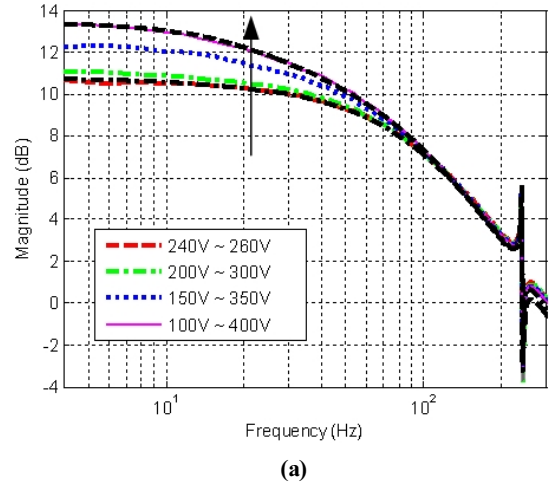


Fig. 3 A set of empirical transfer function estimates for the actuation unit with respect to varying input voltages

~400 V의 범위에서 순차적으로 변화시키면서 실험을 반복적으로 수행한다. 데이터의 채집은 2kHz의 sampling rate(표본화 주파수)으로 이루어지며, 매 실험마다 입출력 데이터 사이의 coherence(기여도)를 계산하여 실험의 신뢰성을 확인한다⁹⁾.

Fig. 3의 (a)와 (b)는 주파수 영역에서 유도된 인가전압과 구동 유닛의 출력 변위 사이의 실험적 전달 함수(Empirical Transfer Function Estimate)의 크기와 위상의 모습이다. 화살표는 인가전압의 분산이 증가할 때, ETFE의 크기와 위상이 변화하는 양상을 가리키고 있으며, Fig. 3으로부터 인가전압의 분산이 증가할 때, ETFE의 크기는 증가하는 방향으로, 위상은 감소하는 방향으로 변화하고 있음을 확인할 수 있다. 이 때, 100Hz 이하의 주파수 영역에서 크기의 차이는 최대 3dB, 위상의 차이는 최대 10°까지 발생함을 알 수 있다.

여기서, 주목할 점은 최소 및 최대 분산을 가진 인가전압에 대하여 얻어진 ETFE를 그 경계로 하여 기타 인가전압에 대하여 얻어진 ETFE가 그 내부에 머물고 있다는 사실이다. 이러한 사실

을 이용하여 인가전압의 크기에 따라 변화하는 여러 ETFE를 하나의 파라미터를 사용하여 보다 간결하게 나타낼 수 있다.

최소 및 최대 분산의 인가전압에 대응하는 비 매개 변수 모델을 각각 $P_1(s)$ 와 $P_2(s)$ 라 할 때, Fig. 3에서 두 ETFE의 경계 내에 존재하는 임의의 ETFE $\tilde{P}(s)$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\tilde{P}(s) = P(s) + \lambda W(s) \quad (1)$$

여기서, $P(s)$ 와 $W(s)$ 는 각각 공칭 전달 함수(nominal transfer function)와 외란에 대한 전달 함수(perturbation transfer function)로 다음과 같이 주어진다.

$$P(s) = \frac{P_1(s) + P_2(s)}{2} \quad (2)$$

$$W(s) = \frac{P_1(s) - P_2(s)}{2}$$

$P_1(s)$ 와 $P_2(s)$ 는 다음과 같이 주어지며, Fig. 3에서 각각 검은 썸선 및 점선으로 표시되었다.

$$P_1(s) = \frac{-0.04s^4 + 1957s^3 + 1.43e^5s^2 + 4.5e^9s + 4.92e^{11}}{s^4 + 720s^3 + 2.35e^6s^2 + 1.62e^9s + 1.43e^{11}}$$

$$P_2(s) = \frac{-0.022s^4 + 1868s^3 + 3.43e^5s^2 + 4.32e^9s + 8.34e^{11}}{s^4 + 705s^3 + 2.37e^6s^2 + 1.57e^9s + 1.78e^{11}}$$

한편, λ 는 절대값이 1보다 작은 임의의 실수로서 $\lambda = 1$ 일 때, $\tilde{P}(s) = P(s) + W(s) = P_1(s)$ 이 되는 반면 $\lambda = -1$ 일 때, $\tilde{P}(s) = P(s) - W(s) = P_2(s)$ 가 된다. 따라서, 변화하는 인가전압의 크기에 대하여 Fig. 3의 ETFE 집합을 단 하나의 파라미터 λ 만을 사용하여 간단하게 표현할 수 있게 된다. 이는 다음 장에서 논의되는 제어기 설계 측면에서 바라볼 때, 불확실성에 대한 구속 조건을 보다 유연하게 설정함으로써 수치적으로 이루어지는 강인 제어기의 최적화 문제에 대하여 빠른 수렴을 보장할 수 있다는 장점이 있다.

3. 강인 제어기 설계

3.1 요구 성능 조건

Fig. 4는 히스테리시스 보상을 위한 폐회로(closed-loop) 제어 시스템의 block diagram(블록선도)을 도시하고 있다. 여기서, r 는 기준 입력신호, e 는 오차신호, u 는 구동 유닛에 주어지는 인가전압, y 는 구동 유닛의 출력 변위이다. 이 때, $\tilde{P}(s)$ 는 식 (1)에서 주어진 구동 유닛에 대한 전달 함수이고 K 는 앞으로 설계될 피드백 제어기(feedback controller)를 나타낸다. 위

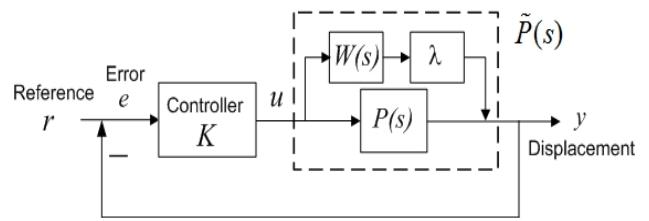


Fig. 4 Block diagram of the closed-loop control system for compensating hysteresis of the actuation unit

Fig. 4의 피드백 제어기 K 의 설계는 다음의 요구 성능 조건을 만족할 수 있도록 이루어진다.

- (1) 전달 함수의 변화에 대하여 강인한 안정성(robust stability)을 보장할 수 있어야 한다. Fig. 3에서 확인한 바와 같이, 인가전압의 크기에 따라 구동 유닛의 전달 함수는 변화한다. 따라서, 설계될 제어기는 식 (1)의 형태로 주어지는 전달 함수의 집합 안에 존재하는 모든 전달 함수에 대하여 그 안정성을 보장할 수 있어야 한다.
- (2) 폐회로로 구성되는 전체 시스템의 전달 함수(closed-loop transfer function)의 변화를 최소화해야 한다. 만약, 기준 입력 r 에서 출력 y 까지의 폐회로 전달 함수가 입력 r 의 크기 변화에 의해 영향을 받는다면, 구동 유닛의 히스테리시스 거동을 완벽하게 보상하는 것은 더욱 어려울 것이다. 그러므로, 제어기 K 는 다음의 식 (3)으로부터 확인할 수 있듯이, 공칭 시스템(nominal system) $P(s)$ 와 섭동된 시스템(perturbed system) $\tilde{P}(s)$ 에 대한 폐회로 전달 함수 $T(s)$ 와 $\tilde{T}(s)$ 사이의 차이를 최소화할 수 있어야 한다.

$$\min_K \left\| \frac{\tilde{T} - T}{T} \right\|_{\infty}$$

$$= \min_K \left\| \frac{\tilde{P} - P}{P} \times \frac{1}{1 + K\tilde{P}} \right\|_{\infty} \quad (3)$$

여기서, $T = KP/(1 + KP)$ 이고 $\tilde{T} = K\tilde{P}/(1 + K\tilde{P})$ 이다. 위 식 (3)으로부터 요구 성능 조건 (2)를 만족시키기 위해서는 섭동된 시스템에 대한 민감도 함수 $\tilde{S} = 1/(1 + K\tilde{P})$ 를 최소화해야 한다는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 향후 구동 유닛이 적용될 응용 분야가 능동형 미소 진동 제어용 초정밀 스테이지임을 고려하여 5Hz 이하의 주파수 영역에서 최대 -20dB까지 민감도 함수를 최소화하는 것으로 설정하였다.

- (3) 인가전압의 크기는 일정한 범위 내에서 제한되어야 한다. 구동 유닛의 출력 변위의 포화(saturation)는 또 다른 비선형 문제를 발생시키는 한편, 시스템을 불안정하게 하기도 하므로 구동 유닛에 주어지는 인가전압은 포화되지 않는

범위로 한정되어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 압전 소자의 초기 오프셋 $12.5\mu\text{m}$ 를 기준으로 $\pm 5\mu\text{m}$ 의 범위로 압전 소자의 구동 범위를 제한하며 특히 고주파 영역에서 모델링되지 않은 불확실성에 의하여 시스템의 안정성이 영향을 받지 않도록 그 크기가 감소되도록 가중 함수를 설계한다.

위의 세 가지 요구 성능 조건을 충족할 수 있는 제어기 설계를 위하여 다음 절에서는 Fig. 4의 오차 신호 e 와 제어기의 출력 신호 u 에 대하여 가중 함수(weighting function) $W_e(s)$ 와 $W_u(s)$ 를 선정하고 제어기를 설계한다.

3.2 가중 함수 및 강인 제어기 설계

3.1절의 요구 성능 조건 (2)와 (3)을 만족시키기 위한 가중 함수 $W_e(s)$ 와 $W_u(s)$ 는 아래와 같이 선정되었다.

$$\begin{aligned} W_e(s) &= \frac{0.833s + 628.3}{s + 6.283} \\ W_u(s) &= \frac{1.35s + 848}{s + 3140} \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)의 가중 함수를 적용하여 위의 요구 성능 조건을 만족하는 강인 제어기를 설계하는 것은 다음 식 (5)의 혼합 민감도(mixed sensitivity) 문제의 해를 구하는 것으로 표현될 수 있으며 이에 대한 block diagram(블록선도)이 Fig. 5에 도시되고 있다⁽¹⁰⁾.

$$\min_K \left\| \begin{matrix} W_e S \\ W_u K S \end{matrix} \right\| < \gamma \quad (5)$$

표준 시스템 $G(s)$ 는 공칭 시스템 $P(s)$ 와 가중 함수 $W_e(s)$ 와 $W_u(s)$ 로 구성되며 이 때, 표준 시스템 $G(s)$ 에 대한 입력 신호는 기준 입력 r 과 제어기 출력 u , 출력 신호는 가중 함수의 출력 z_1 및 z_2 , 그리고 오차 신호 v 가 된다. Fig. 5를 바탕으로 표준 시스템 $G(s)$ 와 입력 신호 r, u 및 출력 신호 z_1, z_2, v 사이의 관계는 식 (6)과 같이 유도될 수 있다.

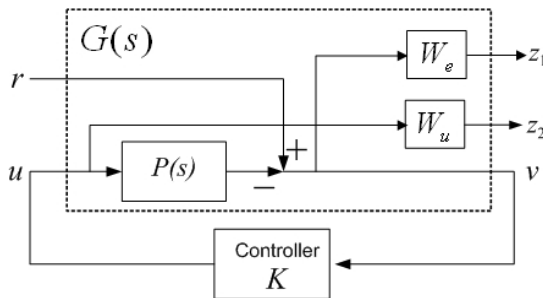


Fig. 5 Block diagram of the H_∞ closed-loop control system

$$\begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ v \end{pmatrix} = G \begin{pmatrix} r \\ u \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_p - W_p P \\ 0 & W_u P \\ 1 & -P \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r \\ u \end{pmatrix} \quad (6)$$

식 (6)의 관계를 바탕으로 Matlab의 Robust Toolbox를 사용하여 강인 제어기를 설계하였으며 그 결과 아래의 제어기를 얻었다.

$$K(s) = \frac{-0.0025s^5 + 1.77e^5s^4 + 1.27e^8s^3 + 4.14e^{11}s^2 + 2.85e^{14}s + 2.5e^{16}}{s^5 + 5.42e^5s^4 + 7.7e^7s^3 + 1.24e^{12}s^2 + 1.48e^{14}s + 8.83e^{14}}$$

이 때, 두 회로 전달 함수(loop system transfer function) $L_1(s) = K(s)P_1(s)$ 와 $L_2(s) = K(s)P_2(s)$ 의 이득 여유(gain margin)와 위상 여유(phase margin)은 각각 37.8dB와 42.7 dB, 90° 와 83.7° 로 주어진다. 따라서, Fig. 4의 폐회로 시스템의 $\tilde{P}(s)$ 가 주어질 두 경계 $P_1(s)$ 와 $P_2(s)$ 내에서 천천히 변화할 때, 항상 안정함을 알 수 있다.

4. 제어기 성능 평가

3.2절에서 설계된 강인 제어기에 대하여 인가전압의 크기 변화가 최소 및 최대일 때, 폐회로 시스템의 전달 함수(closed-loop transfer function)와 민감도 전달 함수(sensitivity transfer function)의 크기를 Fig. 6에서 비교하였다.

먼저, Fig. 3의 전달 함수와 비교할 때, 폐회로 시스템의 전달 함수의 크기 차이는 100Hz까지 거의 무시할 수 있을 정도로 감소했으며 그 크기가 모두 '1'에 가까워졌음을 확인할 수 있다. 둘째, 민감도 전달 함수의 경우도 크기 차이가 2dB 미만으로 감소하였으며, 특히 5Hz 이하의 주파수 영역에서 -20dB 이하로 성능 요구 조건 (2)를 만족하고 있음을 알 수 있다.

설계된 강인 제어기를 적용한 경우 히스테리시스 거동에 대

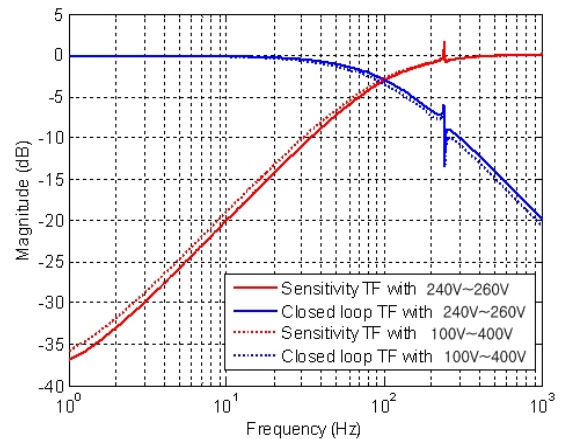


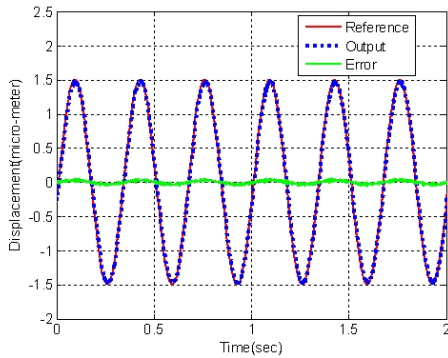
Fig. 6 Comparison of closed-loop and sensitivity transfer functions with respect to varying input voltages

한 응답 특성을 살펴보기 위하여 인가전압의 크기와 주파수를 변화시켜가면서 실험을 수행하였다.

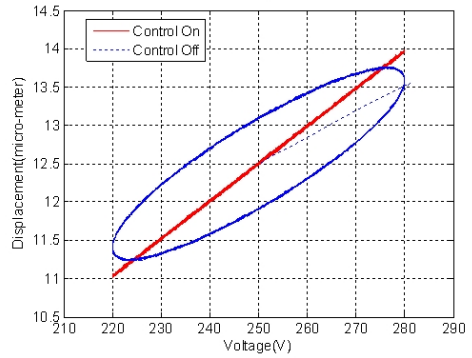
Fig. 7의 (a)와 (b)는 크기 $1.5\mu\text{m}$ 의 3Hz 사인파 형태의 인가 전압을 구동 유닛에 입력했을 때의 출력 변위와 히스테리시스 거동을 도시하고 있다. Fig. 7의 (a)에서 볼 수 있듯이, 구동 유닛의 출력 변위는 기준 입력 신호를 잘 추종하고 있으며 강인 제어를 적용했을 때와 적용하지 않았을 때의 RMS(root mean square) 오차를 비교하면, 무려 95% 이상 추종 성능이

향상되었음을 알 수 있었다. 이는 Fig. 7의 (b)에서도 다시 확인할 수 있는데, 강인 제어를 적용했을 때, Fig. 2에서 나타났던 구동 유닛의 히스테리시스 거동이 사라짐에 따라 출력 변위가 기준 입력을 완벽하게 복원하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8의 (a)와 (b)는 크기 $3\mu\text{m}$ 의 3Hz 삼각파 형태의 인가 전압을 구동 유닛에 입력했을 때의 출력 변위와 히스테리시스 거동을 도시하고 있다. 입력 신호 파형의 종류에 관계없이 구동 유닛의 출력 변위는 히스테리시스 거동이 사라짐에 따라 기준

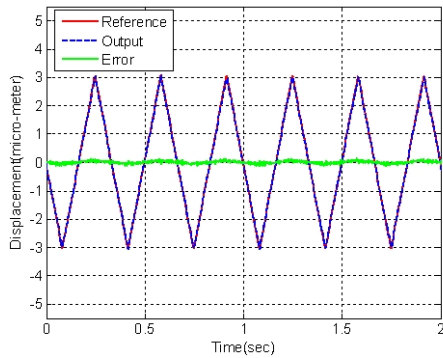


(a)

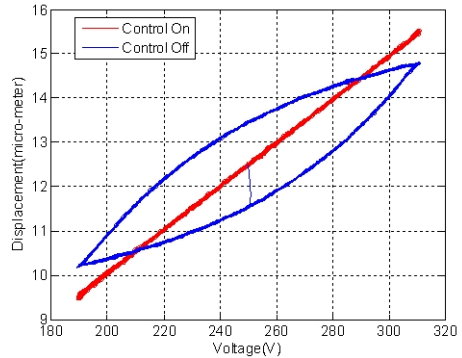


(b)

Fig. 7 (a) Experimental result and (b) comparison of displacement outputs with voltage input of 3Hz sine wave

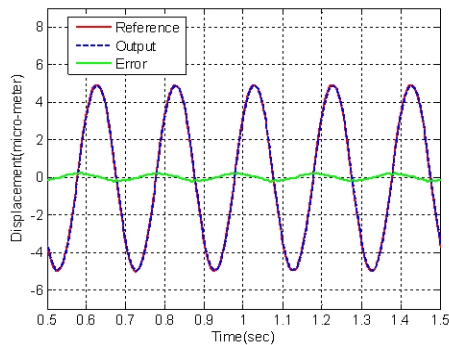


(a)

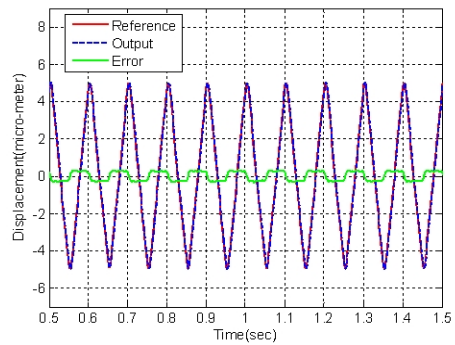


(b)

Fig. 8 (a) Experimental result and (b) comparison of displacement outputs with voltage input of 3Hz triangular wave



(a)



(b)

Fig. 9 Experimental results with voltage input of (a) 5Hz sine and (b) 10Hz triangular waves

입력 신호를 잘 추종하고 있음을 확인할 수 있다. 한편, 크기 $5\mu\text{m}$ 의 5Hz 사인파와 10Hz 삼각파 형태의 인가전압을 구동 유닛에 입력했을 때의 출력 변위의 거동이 Fig. 9의 (a)와 (b)에 각각 도시되고 있다. Fig. 7과 8의 결과와 비교할 때, 입력 주파수가 증가함에 따라 오차가 다소 증가하고 있기는 하지만 히스테리시스 거동으로 인한 출력 변위의 손실이나 변형은 개선되어 그 영향이 미비함을 확인할 수 있다.

본 연구의 목적이 압전 소자 기반의 구동 유닛의 히스테리시스 거동을 보상함에 있다는 것에 비추어 볼 때, 설계된 강인 제어기는 인가전압의 변화에 따라서 대응되는 전달함수가 변화하는 저주파 영역에서 그 영향을 크게 줄임으로써 히스테리시스 거동을 보상할 수 있다는 것을 위의 실험 결과들을 통하여 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 초정밀 스테이지용 구동 유닛의 모델링과 이를 위한 강인 제어기의 설계를 논의하였다.

- (1) 먼저 인가전압으로부터 구동 유닛의 출력 변위에 대한 비매개변수 전달 함수를 유도하였다. 그리고 인가전압의 크기에 따라 경계 내에서 변화하는 전달 함수의 특성을 이용하여 하나의 파라미터만을 사용하여 파라미터 화 하였다. 하나의 파라미터만을 사용하여 히스테리시스 거동으로 인한 모델의 불확실성을 기술할 수 있게 됨으로써 강인 제어기 설계 시 부과되는 구속 조건을 보다 유연하게 할 수 있었다.
- (2) 유도된 파라미터 모델을 바탕으로 요구 성능 조건을 만족하는 제어기를 H_∞ 최적화 기법을 이용하여 설계하였다. 설계된 제어기는 경계 내에서 변화하는 모든 모델에 대해 강인한 안정성을 보장하였다.
- (3) 인가전압으로부터 출력 변위까지의 전달함수가 가장 크게 변화하였던 저주파 영역에서 실시간으로 구동 유닛의 히스테리시스 거동을 완전히 보상함으로써 구동 유닛의 추종 성능을 향상 시킨다는 것을 다양한 실험을 통하여 확인하였다.
- (4) 향후, 본 연구의 결과를 여러 개의 구동 유닛이 함께 사용되는 초정밀 스테이지에 적용하기 위하여 multi-loop 제어 시스템을 구성하는 연구와 추가적으로 수행할 계획이다.

참고 문헌

- (1) Park, J., and Jeong, K., 2006, "Robust Control for a Ultra-Precision Stage System," *Trans. of KSME(A)*, Vol. 30, No. 9, pp. 1094~1101.
- (2) Yang, R., Jouaneh, M., and Schweizer, R., 1996, "Design and Characterization of a Low-Profile Micro Positioning Stage," *Precision Engineering*, Vol. 18, No. 1, pp. 20~29.
- (3) Ryu, J., Lee, S., Gweon, D., and Moon, K., 1999, "Inverse Kinematic Modeling of a Coupled Flexure Hinge Mechanism," *Mechatronics*, Vol. 6, No. 6, pp. 657~674.
- (4) Kim, H., Lee, S. H., Lee, B., and Ahn, K., 2005, "Precision Position Control of Piezoelectric Actuator using Feedforward Hysteresis Compensation and Neural Network," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 22, No. 7, pp. 94~101.
- (5) Lee, A., and Lee, J., 2008, "Preisach Model based Real-Time Control for Systems with Hysteresis," *The institute of Electronics Engineers of Korea - System and Control*, Vol. 45, No. 1, pp. 31~40.
- (6) Bae, G., Choi, S., and Hong, S., 2009, "Dynamic Modeling and Performance Improvement for Micro-Stage in Consideration of Piezo-Actuator Hysteresis," *Proc. of KSMTE Spring Conference*, pp. 63~68.
- (7) Kim, H. S., and Cho, Y. M., 2009, "Design and Modeling of a Novel 3-DOF Precision Micro-Stage," *Mechatronics*, Vol. 19, No. 5, pp. 598~608.
- (8) Oh, H. S., Lee, S. J., Choi, S. C., Park, J. W., and Lee, D. W., 2007, "Behavioral Characteristics of Nano-Stages According to Hinge Structure," *Trans. of KSMTE*, Vol. 16, No. 3, pp. 23~30.
- (9) Ljung, L., 1999, *System identification : theory for the use*, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, USA.
- (10) Balas, G. J., Doyle J. C., Glover, K., Packard, A., and Smith, R., 2006, *Robust control toolbox user's guide*, MathWorks, Inc.