

비선형성을 고려한 압전소자의 모델링 및 운동제어 Modeling and Motion Control of Piezoelectric Actuator

박은철* · 김영식** · 김인수**

Eun-Cheol Park, Yeung-Shik Kim and Insoo Kim

Key Words : Piezoelectric actuator(압전구동기), Inchworm(이송자벌레), Hysteresis model(히스테리시스모델), Sliding Mode Control(슬라이딩모드제어)

ABSTRACT

This paper proposes a new modeling scheme to describe the hysteresis and the dynamic characteristics of piezoelectric actuators in the inchworm and develops a control algorithm for the precision motion control. From the analysis of piezoelectric actuator behaviors, the hysteresis can be described by the functions of a maximum input voltage. The dynamic characteristics are also identified by the frequency domain modeling technique based on the experimental data. For the motion control, the hysteresis behavior is compensated by the inverse hysteresis model. The dynamic stiffness of an inchworm is generally low compared to its driving condition, so mechanical vibration may degenerate the motion accuracy of the inchworm. Therefore, the sliding mode control and the Kalman filter are developed for the precision motion control of the inch-worm. To demonstrate the effectiveness of the proposed modeling schemes and control algorithm, experiment validations are performed.

1. 서론

위치결정기술은 산업전반에 전체적으로 응용되는 기술로서 최근 반도체 제조장비, LCD 제조설비, 초정밀 공작기계, 정보기기, 세포 생물학, 광전자학, 측정학 등의 실용적 분야, 학문적 분야에서 그 활용도가 끊임없이 높아지고 있다. 이러한 활용도와 함께 고정도, 고정밀화, 소형화 등을 함께 요구하는 추세인데, 21세기 초에는 정밀도가 정밀가공분야에서는 10nm, 초정밀 가공분야에서는 1nm의 정도까지 도달할 것으로 예상되고 있다⁽¹⁾. 반도체 제조장비의 경우 위치결정 정도가 수십 nm가 되어야 함으로 초정밀 구동장치의 필요성은 더욱 증대되고 있다. 그러나 종래의 공압식, 유압식 액추에이터는 유체의 압축성과 가동중 유체의 열적 변화 등 유체 특유의 성질로 인해 서브마이크로 이하의 정밀도를 얻는 것이 어렵고, 소형화에도 한계가 있다. 또한 전기식 액추에이터는 제어기법을 이용하여 서브마이크로 이하의 정

밀도를 얻는 것이 가능하나, 회전운동으로 한정되어 있고 이것의 직선 변형은 복잡한 기계적 구조를 이용해야 하는 단점을 가지고 있다.

최근에는 정전, 자기, 압전, 유압, 열 혹은 열공압, 기억형상합금 등의 원리를 이용한 마이크로 액추에이터, 전도성 고분자 액추에이터⁽²⁾, IPMC (Ionic Polymer Metal Composite) 액추에이터 등을⁽³⁾ 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그중 압전소자는 기계적 입력에서 전기적 출력으로, 혹은 전기적 입력에서 기계적 출력으로 변환을 일으킬 수 있으며 이와 같은 특징을 이용하여 액추에이터뿐만 아니라 센서로서 활용되고 있다. 또한 압전소자는 고응답성, 고정밀도를 가지고 있으며 작고 가벼운 액추에이터로서의 특성을 가지고 있다⁽⁴⁾. 이러한 압전구동기는 반도체 분야에서의 광조리개 장치나 가공장치에, 통신 분야에서는 파이버 융착장치나 커넥터 가공장치에, 공작기계에서는 다이아몬드 가공기의 공구 등에 사용되고 있으며⁽⁵⁾, 여러 가지 다른 형태의 액추에이터로 변형되어 개발되고 있다. 예를 들어 충격 구동 방식

* 금오공과대학교 대학원 기전공학과

E-mail : israt@kumoh.ac.kr

Tel : (054) 467-4217, Fax : (054) 467-4472

** 금오공과대학교 기계공학과

(impact drive mechanism)을 이용하여 마찰면을 직선이동 하는 기구⁽⁶⁾, 세 개의 압전구동기들 간의 고정과 풀림을 반복하여 큰 변위를 얻는 이송자벌레(inchworm)의 형태⁽⁷⁾, 초정밀 표면 측정 장치의 스캐너에 많이 이용되는 튜브형 압전소자 형태⁽⁸⁾, 두 개의 적층형 압전구동기를 이용하여 마찰력을 발생하고 그 힘으로 슬라이더를 이송하는 형태⁽⁹⁾ 등이 있다.

한편 압전소자는 그 자체가 가지고 있는 비선형성으로 인해 반복 정밀도의 저하를 가져오게 된다. 히스테리시스(hysteresis) 특성은 입력전압과 출력변위 사이의 비선형성으로 인해 입력전압의 반복과정동안 대응 되는 출력변위가 다르게 나타나는 현상이다. 그리고 크립(creep) 특성은 압전구동기에 갑작스럽게 입력전압을 인가하면 짧은 시간동안 대응되는 변위를 발생하고 그 이후에 분극된 결정의 전계 배열 변화로 인하여 변위의 미세한 변화가 발생하는 현상이다.

압전구동기를 이용한 많은 연구들이 이러한 비선형성을 보완하고 구동 정밀도를 향상시키기 위해 진행되고 있다. Kaizka 는 입력전압 증폭기와 압전구동기 사이에 캐패시터(capacitor)를 직렬로 연결하여 비선형성을 제거하였다. 하지만 이러한 방법은 같은 변위를 출력하기 위해서 상대적으로 매우 높은 전압을 인가해야 하는 단점을 가지고 있다⁽¹⁰⁾. 또한 Goldfarb 는 맥스웰 모델(Maxwell model)을 이용하여 히스테리시스 특성을 묘사하였다⁽¹¹⁾. 또한 Jouaneh 는 프리사체 모델(Preisach model) 모델을 이용하여 히스테리시스 특성을 모델링하고 이를 시스템에 적용시켰다. 하지만 이 모델은 일정하게 반복되는 주기적인 입력 신호에 대해서만 추종할 수 있다는 단점을 가지고 있다⁽¹²⁾. 그리고 Tzen 는 히스테리시스의 기하학적 형상을 지수함수에 접근시켜 수치적인 표현을 하였다⁽¹³⁾.

이에 본 연구에서는 압전구동기를 이송자벌레 형태의 정밀이송장치에 적용하여, 히스테리시스 특성을 모델링 하는 방법을 제안하고 타당성을 검증하고자 한다. 또한 압전구동기를 포함한 이송자벌레의 동특성을 주파수 영역에서의 커브 피팅(curve fitting) 방법으로 모델링하고, 그 특성을 검증하고자 한다.

마지막으로 이송자벌레의 기준입력을 강건하게 추종하기 위하여 히스테리시스 특성과 이송자벌레 동특성의 복합 모델링에 근거하여 슬라이딩 모드 제어 알고리즘을 개발하고 정밀 이송장치의 타당성을 검증하고자 한다.

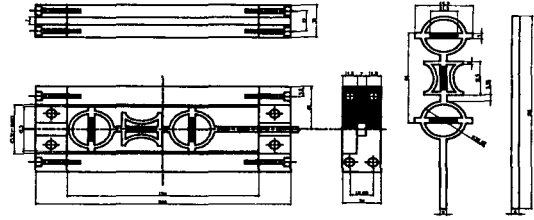


Fig. 1 The design of the inchworm (using sumitomo metal, PSA-15C, specification listed in Table 1)

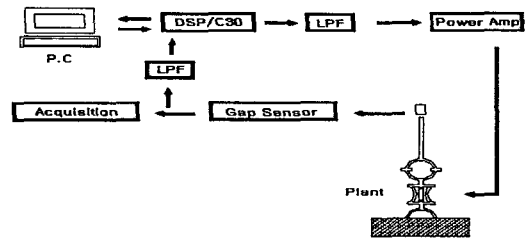


Fig. 2 Schematic of the experiment

Table 1 The Specification of piezoelectric actuator (from sumitomo metals LTD. manual)

MODEL	15C	Unit
Capacitance	900±20%	C(nF)
Insulation Resistance	>1×10 ⁸	Ro(Ω)
Max. Driving Field	150	Eo(V)
Effective Displacement	20±2	Xo(μm)
Xo/Eo	0.16	(μm/V)
Material	SPEM-5D	
Response time	20μsec	

2. 시스템 모델링

2.1 이송자벌레 시스템

압전소자 자체의 변형량은 수 마이크로미터에 불과하다. 또한 개별적인 압전소자를 연속적으로 쌓아 구성된 적층형 압전소자도 그 최대 변위는 수십 마이크로미터 이하이다. 따라서 단순히 압전소자의 변형량만으로 수 mm 이상의 대 변위 이송범위를 갖는 선형이송장치를 구성 할 수는 없다. 이 같은 한계를 극복하고 이송장치에 압전소자를 응용하기 위한 방안으로 압전소자에 이송 가이드면을 따라서 마찰력을 이용하여 벌레가 기어가는 것과 같은 방법을 이용한 것이 이송자벌레이다. Fig. 1 은 실제 제작된 이송자벌레의 도면이다.

본 연구에서는 이송자벌레의 추진부에 압전소자를 부착하여 기준전압을 인가하였다. 이것은 한 스텝 변위 과정에서 이송자벌레에 부착되어 있는

압전소자의 비선형 특성을 파악하기 위함이다. 따라서 Fig. 2 과 같이 이송자벌레의 아래 끝단을 고정하고 위 끝단에 변위센서 (gap sensor : ADE Technologies MicroSense2 5130)를 설치하였다. 사용된 압전구동기는 전체길이가 21mm 이고 150 층의 PZT 압전소자를 적층한 것 (SUMITOMO PSA-15C-5AT)으로서 Table 1 의 사양을 가지고 있다. 그리고 전압증폭기 (Power Amp : TECHRON 754)를 사용하여 20 배 증폭된 신호를 압전구동기에 인가하였다. 따라서 모든 그래프의 전압 값은 게인(gain)을 포함하여 실제 인가전압이 된다.

2.2 히스테리시스 모델링

시스템의 정밀이송이 가능하기 위해서는 정확한 시스템 규명이 선행되어야 한다. 본 시스템의 출력 거동은 압전구동기의 히스테리시스 특성과 동특성을 함께 포함하고 있다. 우선 압전구동기의 히스테리시스 특성만을 측정하기 위해서 동특성을 배제할 수 있는 낮은 주파수의 삼각파 신호를 입력전압으로 사용하였다. 히스테리시스 거동은 일정하게 반복되는 인가전압에 대해서 초기상승 입력전압에 대응되는 초기상승 출력변위, 반복상승 입력전압에 대응되는 반복상승 출력변위, 반복하강 입력전압에 대응되는 반복하강 출력변위 등 세 부분으로 나누어 고려하였다.

Fig. 3 은 최대치가 선형적으로 감소하는 2Hz 삼각파를 입력전압으로 사용하였을 때 출력변화를 나타낸 것이다. 위 결과로부터 히스테리시스를 모델링하기 위한 거동의 몇 가지 특징을 확인 할 수 있다. 첫째, 입력전압 대 출력변위 사이의 히스테리시스 거동은 초기상승곡선, 반복하강곡선, 반복상승곡선의 세 가지 다른 형태의 곡선들로 나누어 짐을 확인할 수 있었다. 둘째, 입력전압의 최대값 (V_{max})이 변화할 때 히스테리시스 곡선의 형태는 V_{max} 에 따라 달라진다. 셋째, 히스테리시스 특성 중에서 잔류변위 (residual displacement : 반복적인 전압의 인가 과정에서 전압이 0 Volt 가 되더라도 출력은 0 μm 가 되지 않고 변위를 갖는 현상)의 크기는 V_{max} 에 의해 달라진다. V_{max} 는 입력전압의 방향이 바뀌는 지점 즉, Fig. 3 에서 V_{pd} 와 V_{pu} 으로 표시된 전압 중 가장 큰 전압을 의미한다.

본 연구에서는 이와 같은 몇 가지 특징들을 이용하여 히스테리시스 곡선을 크게 두 가지 상승과 하강형태로 분리하여 각각을 2차 함수로 식(1)과 (2)와 같이 표현하였다.

$$X_r = D_r + C_{r1} \times V_{in} + C_{r2} \times V_{in}^2 \quad (1)$$

$$X_f = D_f + C_{f1} \times V_{in} + C_{f2} \times V_{in}^2 \quad (2)$$

여기서 V_{in} 은 입력 전압, X_r 과 X_f 은 상승과 하강시 출력 변위, D_r 과 D_f 는 상승과 하강시 잔류변위, C_{r1} 과 C_{r2} 는 상승곡선 계수, C_{f1} 과 C_{f2} 는 하강곡선 계수이다.

다양한 입력전압의 변화에 대해서 히스테리시스 특성을 정확히 모델링하기 위해서는 각 계수들을 입력전압의 변화에 따라 변경하여야 한다. 앞에서 밝힌 바와 같이 히스테리시스 곡선은 연속적인 입력전압의 변화에서 V_{max} 에 의해 전체 곡선의 형태와 잔류변위가 달라진다. 우선 입력전압의 변곡점 V_p 변화에 따른 히스테리시스 곡선의 형태 변화와 잔류변위의 크기를 파악하기 위해 주파수는 2Hz 로 고정하고 삼각파형 입력전압을 6Volt 부터 120Volt 까지 6Volt 씩 증가시켜 히스테리시스 거동을 각각 측정하였다.

각각의 히스테리시스 거동을 측정하고 커브 피팅(curve fitting)을 하여 상승함수와 하강함수의 각 계수를 결정하였다.

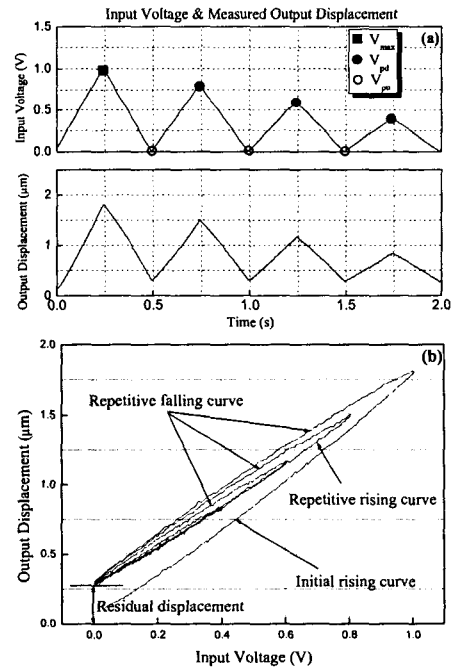


Fig. 3 Hysteresis behavior; (a) input voltage and measured output displacement, (b) measured hysteresis loop

이 결과로부터 함수 $X_r(V_{in})$ 과 $X_f(V_{in})$ 의 D_r , D_f , C_{r1} , C_{r2} , C_{f1} , C_{f2} 계수들은 V_{max} 함수로 표현됨을 알 수 있었으며, 각 계수들의 변화를 V_{max} 의 함수로 표현하면 Fig. 4와 같다. 이 결과로부터 각 계수들은 각각의 커브 피팅을 통하여 결정되었다.

피팅 결과 상승함수 식(1)의 계수들과 하강함수 식(2)의 계수들을 V_{max} 의 함수로 표현할 수 있다. 만약 어느 한 시점에서 과거의 V_{max} 보다 더 큰 전압이 인가된다면, 이 순간 V_{max} 의 값은 변경되며 이로 인해 $X_r(V_{in})$ 과 $X_f(V_{in})$ 의 계수가 변경된다. 따라서 입력전압의 변화에 적응하여 히스테리시스 곡선의 형태를 추종하도록 모델링하였다.

최초로 전압이 인가될 때 시뮬레이션이 시작된다. 초기상승 함수의 계수들 D_r , C_{r1} , C_{r2} 는 식(1)에 대입된다. 초기상승 함수의 계수들은 입력전압의 방향이 변경될 때 까지 유지되며, 입력전압의 변곡점 V_p 에 도달하는 순간 전압이 상승에서 하강하는 변곡점인 V_{pd} 인지 또는 하강에서 상승하는 변곡점인 V_{pu} 인지를 판단하게 된다. 관심을 가져야 할 부분은 입력전압이 상승에서 하강으로 변경되는 V_{pd} 이다. 이때의 입력 전압이 최초의 변곡점 V_p 라면 이것은 새로운 V_{max} 가 된다. 새로운 V_{max} 가 결정되면 함수 $X_f(V_{in})$ 의 계수들이 변경된다. 이렇게 V_{max} 가 결정되면 새로운 V_{max} 가 결정될 때까지 현재의 상태를 유지하게 된다.

새로운 V_{max} 란 현재의 V_{max} 값보다 더 큰 V_{pd} 전압이 인가되는 경우의 전압이다. 시뮬레이션을 위한 이러한 과정을 순서도로 나타내면 Fig. 5와 같다.

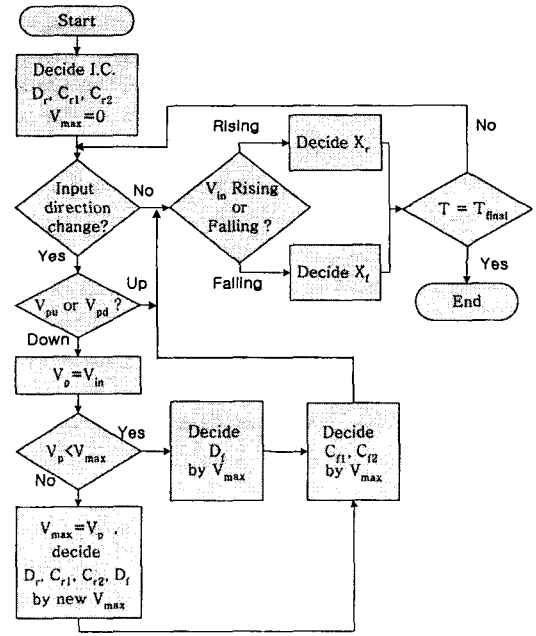


Fig. 5 Flow chart for hysteresis loop modeling

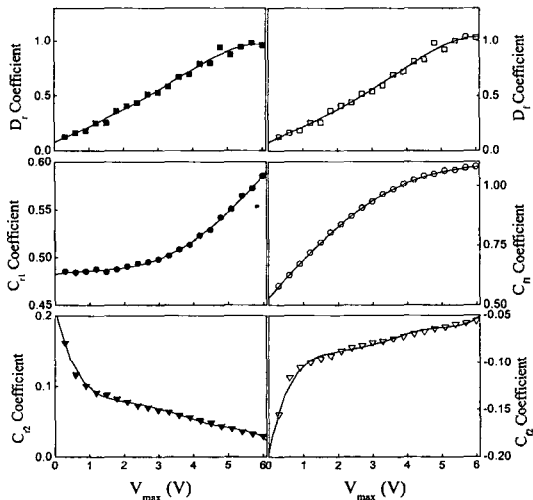


Fig. 4 The Curve fitting of coefficients

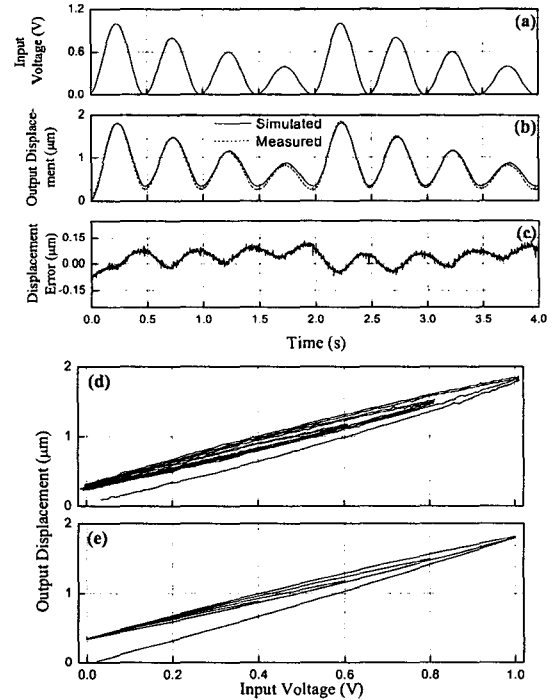


Fig. 6 Comparisons of simulated and measured data; (a) input voltage, (b) measured displacement (dashed) and simulated displacement (solid), (c) modeling error, (d) measured hysteresis loop, (e) simulated hysteresis loop

Fig. 6 은 측정 및 시뮬레이션된 시스템의 히스테리시스 루프를 나타낸다. 모델링 오차 그래프에 나타난 바와 같이 측정된 출력 변위와 시뮬레이션 출력 변위의 오차가 $\pm 0.125 \mu\text{m}$ 이내로 나타남을 알 수 있다.

2.3 동특성 모델링

추진장치를 포함한 이송프레임의 실시간 제어를 위하여 주파수 응답을 실험을 통해 취득하고 이를 기초로 시스템을 모델링하였다. 주파수 응답을 이용하여 동특성을 규명하는 기법중 커브피팅을 Matrix-fraction description 을 사용하여 모델링 차수를 낮추도록 하였다.⁽¹⁴⁾ Fig. 7 은 실제 시스템의 주파수 응답과 모델링 된 시스템의 주파수 응답을 함께 나타낸다. 시스템 모델링 차수는 3 차로 하였다. 관심 주파수 영역은 635Hz 를 중심으로 1kHz 범위를 갖도록 하였다.

Fig. 8 은 본 연구에서 서보 제어 시스템 구동을 위한 기준 입력과 실제 시스템의 응답이다. 낮은 주파수임에도 불구하고 사각파 입력으로 인해 동특성이 포함되어 있는 출력 결과를 나타냄을 알 수 있다. 각 스텝에서의 기준 입력 값은 1V 를 단위 크기로 정의하여 전압단위(voltage unit)로 적용하였고 또한 각 스텝의 주기는 0.4 초로 하였다. 시스템의 동특성과 압전구동기의 히스테리시스 영향이 함께 나타남을 알 수 있다. 최대 오버슈트는 $3.8 \mu\text{m}$ 이고 진동이 1/2 스텝 주기인 0.2 초 이후에도 큰 출력 값을 가지고 지속됨을 알 수 있다.

3. 제어기설계

3.1 슬라이딩 모드 제어(Sliding Mode Control)

본논문에서는 모델오차, 시스템의 불확실성, 외란 등에 대하여 강건한 슬라이딩 모드제어⁽¹⁵⁾ 이송자별래의 이송제어에 적용하기 위한 제어기법을 개발하고자 한다.

슬라이딩 모드 제어기 설계는 두 가지 단계에 걸쳐서 수행된다. 첫째, 원하는 동특성을 제어계에 가하는 초평면(hyperplane)을 설계한다. 둘째, 그 초평면 근방에서 슬라이딩 모드가 발생하는 조건을 설계하여 상태들(states)을 전환면에 구속하여 제어하고자 한다. 동특성 모델링으로부터 선형 시불변 시스템을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (3)$$

(A,B)는 가제어 쌍이며 B 는 전계수(Full Rank)이다. 전환함수(Switching Function)는 다음과 같이 가정한다.

$$s(k) = Sx(k) \quad (4)$$

초평면 $s(k)$ 는 참고문헌 (15)에 의해 설계되었다. 시스템의 불확실성 f 를 가진 시스템은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + f(t, x, u) \quad (5)$$

여기서 $f: \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^m$

$$f(t, x, u) = B\xi(t, x, u) \quad (6)$$

여기서 ξ 는 불확실성 또는 비선형성이다. 슬라이딩 모드제어기법에 의하여 제어입력 u 는 선형제어부 u_l 와 비선형제어부 u_n 의 합으로 이루어지며, 채터링 문제를 해결하기 위하여 평활함수(signum function)를 사용하면 식(7)과 같이 쓸 수 있다.

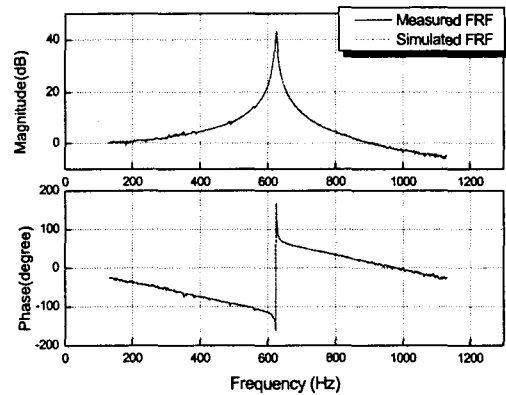


Fig. 7 Measured and simulated FRF of the system

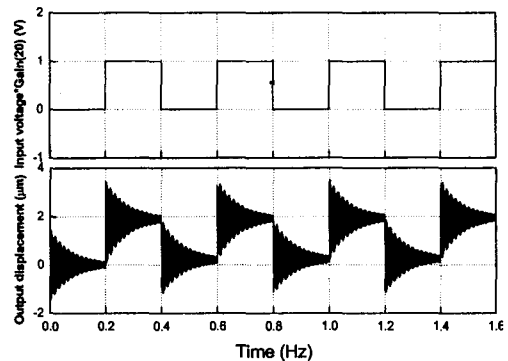


Fig. 8 Reference input voltage and measured output displacement

$$u(k) = u_i(k) + u_n(k) \quad (7)$$

$$u_i(k) = -\Lambda^{-1}(SB - \Phi S)x(k)$$

$$u_n(k) = -(\eta \|\Lambda\|^{-1} \|s(k)\| + \beta) \frac{s(k)}{|s(k)| + \delta} \quad (8)$$

여기서 $\Lambda = SB$, η, β 는 양수인 제어계수, Φ 는 초평면의 고유치, 평활함수 $s(k)/(|s(k)| + \delta)$ 의 기울기는 δ 에 의해 결정된다.

3.2 관측기 설계(Observer Design)

제어기의 상태가 모두 측정되지 않고 관측기에 의해서 계산이 되면 실제 상태 피드백 제어입력은 식(9)로서 주어진다. $\hat{x}(k)$ 는 여기서 칼만 필터(Kalman filter)에 의해서 계산된 상태(State) 값이며, 관측기는 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + Bu(k) + L(y(k) - C\hat{x}(k) - Du(k)) \quad (9)$$

여기서 A, B, C, D 는 시스템 matrix, y 는 측정변위, L 은 칼만 필터 이득행렬이며 오차 값의 공분산을 최소로 하기 위한 식으로부터 결정되며 다음식과 같이 쓸 수 있다.

$$L = APC^T(R_0 + CPC^T)^{-1} \quad (10)$$

여기서 P 는 리카티 방정식(Riccati Equation)의 해이고 다음과 같이 표현된다.

$$P = APA^T - APC^T(R_0 + CPC^T)^{-1}CPA^T + LQ_0L^T \quad (11)$$

여기서 R_0 와 Q_0 는 이득행렬이다.

4. 시뮬레이션 및 실험

4.1 히스테리시스 모델링을 이용한 개루프 제어 시스템의 히스테리시스 특성을 모델링하는 방법은 2.2 절에서 기술하였으나, 실제 제어를 목적으로 하기 위해서는 일반적으로 알려진 역히스테리시스 모델(inverse hysteresis model)이 필요하다. 이는 입력전압과 출력변위 사이의 히스테리시스 특성을 제거하여 선형적인 특성을 보이기 위한 것으로 입력전압에 보상입력을 더하여 출력변위가 입력전압에 선형적으로 대응하기 위함이다.

우선 입력전압과 히스테리시스 모델의 출력변위

를 서로 1:1 대응이 되도록 출력변위에 일정한 상수값(rate)을 곱하고, 그리고 입력전압과 출력변위 사이의 차를 구하였다. 마지막으로 입력전압과 출력변위의 차를 입력전압에 보상하여 새로운 입력전압, 즉 보상된 입력 전압을 구할 수 있었다. 이는 식 (12)과 같이 표현된다.

$$u_{com}(k) = v_r(k) - X_r(k) \times R \quad (12)$$

$$u_{com}(k) = v_r(k) - X_f(k) \times R$$

여기서 $R(\text{rate})=0.5479$, $v_r(k)$ 는 기준입력전압, $X_r(k)$ 과 $X_f(k)$ 는 히스테리시스 모델 출력변위, $u_{com}(k)$ 는 히스테리시스 보상입력 전압이다. 이와 같은 방법으로 개루프제어(open loop control)를 수행한 결과는 다음과 같다. 기준입력은 히스테리시스 모델을 이용하여 새롭게 보상된 기준입력으로 하고 이를 실제 시스템에 적용시켜 보았다. Fig. 9는 제어전의 입력전압 대 출력변위의 형태와 개루프제어 후의 입력전압 대 출력변위의 형태를 보여준다.

기준입력은 2Hz, 1Volt의 사인파로 하였다. 제어 후와 제어 전의 히스테리시스 출력결과를 비교해보면 제어 전 히스테리시스 특성에서 초기 상승부와 반복하강, 반복상승부로 확연히 구분되는 비선형성을 관측할 수 있다. 하지만 제어후의 결과에서는 입력전압 대 출력변위가 선형화 되어있는 것을 확인할 수 있다.

4.2 동특성모델링에 근거한 슬라이딩 모드 제어 전체적인 시스템제어를 블록선도로 나타내면 Fig. 10과 같다.

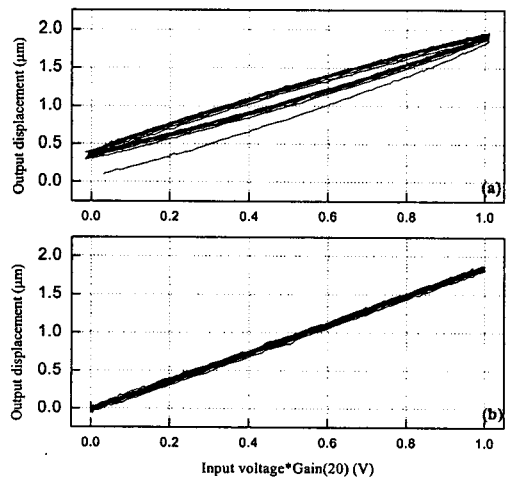


Fig. 9 Experimental results; (a) measured data of the uncontrolled hysteresis loop (b) measured data of the controlled hysteresis loop

2.3 절에서 3.2 절의 상태방정식 (9)에 대입되는 시스템의 상태행렬 (state matrix) A 와 입력행렬 (input matrix) B 의 값은 Matrix-fraction description 의 모델링법에 의해 얻었다. 전환함수의 S 는 $-1.0744, -0.0904, 0.0781$ 로 하였다.

시스템 제어 입력 $u(k)$ 의 선형 제어 입력항의 선형 제어기 이득 값은 상태 피드백 제어 법칙에 의해 $0.5130, -1.6069, 1.1001$ 로 얻어진다. 또한 비선형 제어 입력에서 제어 계수는 $\eta=0.002, \beta=0.0002$ 로 각각 결정하였다.

다음으로 관측기 방정식 (9)의 관측기 이득행렬 L 은 리카티 방정식의 해 P 에 의해 $0.0040, 0.5771, 0.3558$ 과 같이 결정되었다. 이제 Fig. 8 에서의 기준 입력에 대한 실제 시스템 출력변위의 제어 측정결과를 살펴보면 Fig. 11 과 같다. Fig. 11 과 같이 시스템 출력의 정착 시간은 제어 전 0.5 초 이상에서 0.02 초로 단축 되었고, 최대오버슈트도 $3.7 \mu\text{m}$ 이상에서 $2.25 \mu\text{m}$ 로 억제되었음을 알 수 있다. 하지만 입력신호의 반복으로 인하여 기준 입력 이 0Volt 가 되더라도 시스템 출력은 $0 \mu\text{m}$ 가 되지 못하는 히스테리시스 특성이 2 번째 주기 이후에 계속해서 나타남을 알 수 있다.

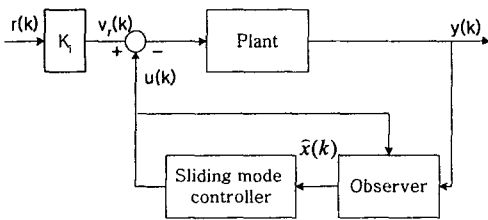


Fig. 10 Schematic of the servo control system with sliding mode control

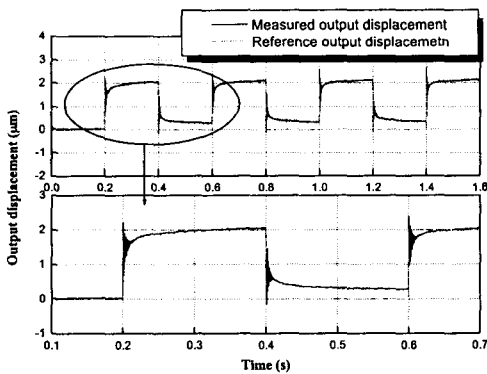


Fig. 11 Measurement of the controlled system with sliding mode control

4.3 히스테리시스와 동특성모델링에 근거한 슬라이딩 모드 제어

4.2 절의 결과로부터 동적모델링만으로는 압전 구동기의 히스테리시스 특성을 제거할 수 없음을 알 수 있었다. 따라서 압전구동기의 히스테리시스 특성과 이송자별레의 동특성을 함께 모델링하여 제어하고자 하며, 제어실험을 위한 전체 시스템의 블록선도는 Fig. 12 와 같다.

슬라이딩모드제어에 관한 모든 설정은 4.2 절과 동일하게 하였다. 단 시스템 모델링만은 Fig. 12 에서와 같이 기준입력을 히스테리시스 모델링을 이용하여 보상하는 개루프 제어를 이용하였다.

Fig. 13 은 제어된 실제 시스템의 출력 결과이다. Fig. 11 과 Fig. 13 을 비교해 보면 두 번째 주기부터 출력결과와의 차이를 알 수 있다. Fig. 11 에서는 약 $0.25 \mu\text{m}$ 이상의 잔류변위가 존재하였지만 Fig. 13 에서는 이러한 잔류 변위가 역 히스테리시스 모델링을 이용한 보상기의 적용에 의해 완전히 제거되었음을 확인 할 수 있다.

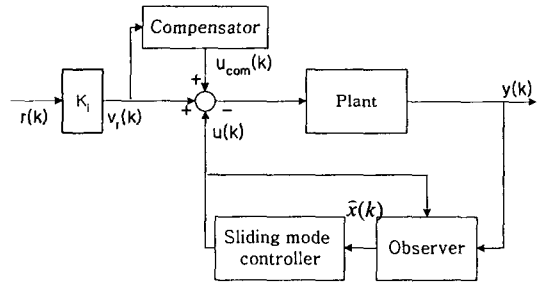


Fig. 12 Schematic of the servo control system with sliding mode control and compensator

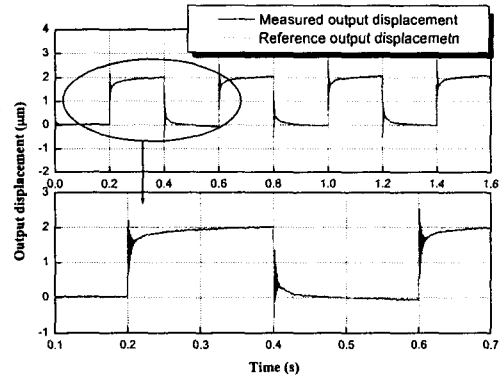


Fig. 13 Measurement of the controlled system with sliding mode control and compensator

5. 결 론

본 논문에서는 압전구동기의 히스테리시스를 최대인가 전압의 변화에 대응하도록 모델링 하는 방법을 제안하였으며, 그 결과 최대인가 전압이 변화하더라도 그에 상응하여 실제 히스테리시스 거동을 잘 묘사할 수 있었다.

압전구동기 작동시 발생하는 잔류진동을 제어하기 위하여 이송자별레 시스템의 동특성은 주파수 영역에서 Matrix-fraction description 커브피팅 방법을 이용하여 모델링 하였다.

마지막으로 제안된 이송자별레의 모델링에 근거하여 기준 입력을 추종하도록 히스테리시스의 보상기와 작동시 나타나는 잔류진동을 감쇠하기 위하여 슬라이딩 모드 제어기와 Kalman filter 를 개발하였다. 개발된 제어기의 타당성을 실험한 결과 기준입력에 대한 출력변위의 최대 오버슈트가 $1.5 \mu\text{m}$ 에서 $0.2 \mu\text{m}$ 로 억제되었고, 잔류진동도 0.2sec 이상 지속되던 것이 제어 후 0.015sec 로 제한되었으며, 또한 히스테리시스 특성으로 인해 발생한 $0.3 \mu\text{m}$ 잔류변위도 완전히 제거되었음을 알 수 있다.

참고문헌

- (1) 김정용, 2002, "역 히스테리시스 모델과 신경회로망을 이용한 압전구동기의 정밀 위치제어", 공학석사 논문, 울산대학교 기계자동차 공학부.
- (2) 안호정 등, 2001, "공기중에 동작하는 전도성 고분자 액추에이터의 제작", 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, C 권, pp. 1878~1889.
- (3) Pak, J., Cha, S. E., "Fabrication of Ionic Polymer Metal Composites by Electroless Plating of Pt.", Proceedings of 1st Intelligent Mir.
- (4) Slocum, A., 1992, Precision Machine Design, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, pp.666~674.
- (5) 최덕권, 2000, "정밀제어를 위한 자동화요소의 발전 동향", 제어.자동화.시스템공학회지 제 6 권 1 호, pp.33~38.
- (6) T. Higuchi, M. Watanade, and K. Kudoh, , Nov. 1988, "Precise Positioner Utilizing Rapid Deformations of a Piezoelectric Element" J. Japan Society of Precision Engineering, Vol.54, No.11 , pp.2107~2112.
- (7) Kim, J. H., Kim J., May, 2002, "A hybrid inchworm linear motor", Mechatronics, Vol. 23, Iss. 3, pp. 525~542.
- (8) 정희원, 2000, "압전소자 구동기의 이력과 크립 현상의 분석 및 응용에 관한 연구", 공학 박사논문, 한국과학기술원 기계공학부.
- (9) Kim, S. C., Kim, S. H., Dec., 2001, "A precision linear actuator using piezoelectrically driven friction force", Mechatronics, Vol. 11, Iss. 8, Dec., 2001, pp. 969~985.
- (10)Kaizuka, H., and Byron, S., MAY, 1988, "A Simple Way to Reduce Hysteresis and Creep When Using Piezoelectric Actuators", Japanese Journal of Applied Physics, Vol.27, No.5, pp. L773~L776
- (11)M. Goldfarb, N. Celanovic, Sep., 1997, "A Lumped Parameter Electromechanical Model for Describing the Nonlinear Behavior of Piezoelectric Actuators", Transactions of the ASME Vol. 119, pp 478~485.
- (12)Ping Ge and Musa Jouaneh, July, 1995 "Modeling hysteresis in piezoceramic actuators ", Precision Engineering, Vol. 17 No. 3, July, 1995, pp. 211~221.
- (13)J. Tzen , S. Jeng, W. Chieng, 2002 "Modeling of piezoelectric actuator for compensation and controller design", Precision Engineering, 5310, pp. 1~17.
- (14)J. N. Juang, 1994, Applied System Identification, Prentice Hall.
- (15)C. Edward, S. K. Spurgeon, 1998, Sliding mod control, Theory and applications, Taylor and Francis Ltd, pp. 1~18.