

이송자벌레를 위한 압전소자의 모델링 및 운동제어 :

2. 슬라이딩 모드법에 의한 이송자벌레의 운동제어

Modeling and Motion Control of Piezoelectric Actuator for the Inchworm : Part 2. Motion Control of Inchworm Using Sliding Mode Method

김영식* · 박은철* · 김인수**

Yeung-Shik Kim, Euncheol Park and In-Soo Kim

(2005년 5월 24일 접수 : 2005년 6월 14일 심사완료)

Key Words : Piezoelectric Actuator(압전구동기), Inchworm(이송자벌레), Hysteresis Model(히스테리시스 모델), Sliding Mode Control(슬라이딩 모드 제어), Discrete Time Control (이산시간제어)

ABSTRACT

This paper presents an algorithm for the precision motion control based on the dynamic characteristics of piezoelectric actuators in the inchworm. The dynamic characteristics are identified by the frequency domain modeling technique using 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. The Sliding mode controller and the Kalman filter are designed for motion control of the inch-worm.

1. 서 론

위치결정기술은 산업전반에 전체적으로 응용되는 기술로서 최근 반도체 제조장비, LCD 제조설비, 초정밀 공작기계, 정보기기, 세포 생물학, 광전자학, 측정학 등의 실용적 분야에서 그 활용도가 끊임없이 높아지고 있다. 이러한 활용도와 함께 고정도, 고정밀화, 소형화 등을 함께 요구하는 추세인데, 21세기 초에는 정밀도가 정밀가공분야에서는 10 nm, 초정밀 가공분야에서는 1 nm의 정도까지 도달 할 것으로 예상되고 있다⁽¹⁾. 반도체 제조장비의 경우 위치결정 정도가 수십 nm가 되어야 하므로 초정밀 구동장치의 필요성은

더욱 증대되고 있다. 그러나 종래의 공압식, 유압식 구동기는 유체의 압축성과 가동 중 유체의 열적 변화 등 유체 특유의 성질로 인해 서브마이크로 이하의 정밀도를 얻는 것이 어렵고, 소형화에도 한계가 있다. 또한 전기식 구동기는 제어기법을 이용하여 서브마이크로 이하 정밀도를 얻는 것이 가능하나, 회전 운동으로 한정되어 있고 이것의 직선변형은 복잡한 기계적 구조를 이용해야 하는 단점을 가지고 있다.

최근에는 정전, 자기, 압전, 기억형상합금 등의 원리를 이용한 마이크로 구동기, 전도성 고분자 구동기⁽²⁾, IPMC(ionic polymer metal composite) 구동기 등을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중 압전소자는 기계적 입력에서 전기적 출력으로, 혹은 전기적 입력에서 기계적 출력으로 변환을 일으킬 수 있으며 이와 같은 특징을 이용하여 구동기뿐만 아니라 센서로서 활용되고 있다⁽³⁾.

이와 같이 초정밀 미세 운동기구가 여러 연구분야에서 개발되고 있다. 그러나 빠른 속도의 운행에서는

* 책임저자 : 정희원, 금오공과대학교 기계공학부
E-mail : yskim@kumoh.ac.kr
Tel : (054) 478-7346, Fax : (054) 478-7319
* 금오공과대학교 대학원 기전공학과
** 정희원, 금오공과대학교 기계공학부

기계적 진동에 의한 운행성능과 정밀도의 저하를 가져올 수 있다. 이에 따라 이송자벌레의 정밀도 향상 및 안정적 구동의 보장을 위해서는 진동 저감이 요구된다.

최근 진동 저감을 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 기존에 연구 발표된 이송자벌레로의 압전소자 응용⁽⁴⁾에서는 유한요소해석에 의한 안정한 구동조건의 확보와 구동입력 신호를 컴퓨터 시뮬레이션으로부터 계산한 다음 이송자벌레의 구동 신호로 사용하는 방법이 제시되어 있으나 구동입력의 설계 시에 외란에 대해 보상을 할 수 없고 비능률적이다.

이에 이 연구에서는 압전구동기를 포함한 이송자벌레의 동특성을 주파수 영역에서의 커브 피팅(curve fitting) 방법으로 모델링하고 이송자벌레의 운동제어를 위해 슬라이딩 모드 제어 알고리즘을 적용하고자 한다. 또한 이송자벌레의 기준입력 추종성을 파악하기 위하여 동특성만을 근거로 하여 슬라이딩 모드 제어 알고리즘을 적용하였을 때와 히스테리시스 특성과 이송자벌레 동특성이 복합된 모델에 근거하여 슬라이딩 모드 제어 알고리즘을 적용하였을 때의 결과를 비교하고 정밀 이송장치로서의 타당성을 검증하고자 한다.

2. 이송자벌레 시스템

2.1 거동 특성

Fig. 1은 이송가이드에 장착되어 기어갈 수 있는 압전구동기가 내장된 이송자벌레를 보인 것이다. 이송자벌레는 전단 잠금장치, 추진장치, 후단 잠금장치, 이송 가이드 및 지지 프레임으로 이루어져 있다. 이송자벌레의 이송은 상기의 세 가지 장치에 전압을 순차적으로 인가하여 이루어진다⁽⁵⁾. 이 연구에서는 기준 이송거리를 $2.0 \mu\text{m}/\text{step}$ 로 하여 위치제어를 행하였다. 실험을 위한 시스템 구성은 Fig. 2와 같다.

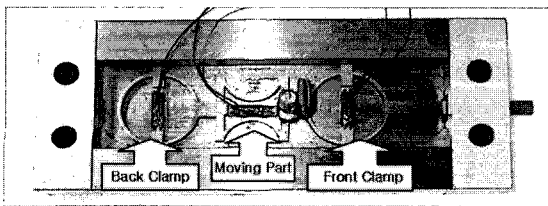


Fig. 1 Prototype of the inchworm

우선 입력전압에 따른 시스템 출력변위를 측정하기 위해 Fig. 3과 같이 2 Hz, 20 Volt, 삼각파형의 입력전압을 이송자벌레에 가하였다. 이것은 시스템의 동특성을 배제하고 정적인 상태의 히스테리시스 거동을 확인하기 위한 것이다. Fig. 4는 이송자벌레의 사각파 기준입력과 그에 따른 응답을 측정하는 것이다. 기준입력이 낮은 주파수임에도 불구하고 사각파이므로 계의 응답에는 동특성이 포함되어 있음을 알 수 있다. 첫 번째 주기 이후에는 입력전압이 0 Volt가 되더라도

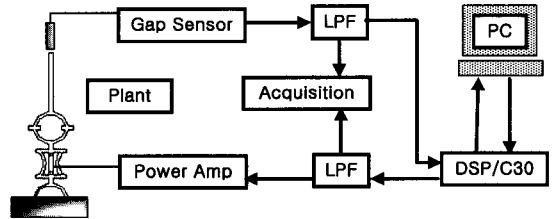


Fig. 2 Schematic of the experimental setup

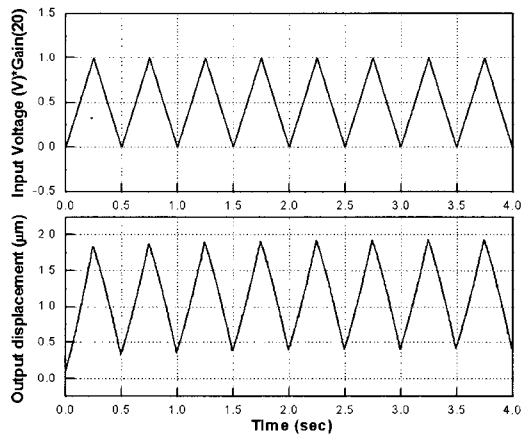


Fig. 3 (a) Regular triangle input voltage (b) Measured output displacement

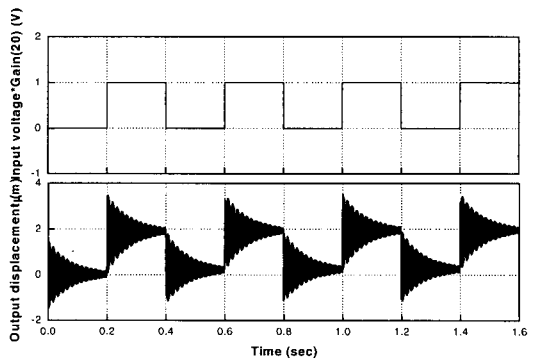


Fig. 4 Reference input and measured output of uncontrolled system

출력변위는 0m가 아닌 잔류변위를 가진 상태로 진동이 발생하는 것을 알 수 있다. 이것은 사용된 압전 구동기의 히스테리시스 특성과 추진장치의 동특성이 함께 반영된 결과이다.

각 스텝에서의 기준 입력 값은 20 V이고 주기는 0.4초이다. 최대 오버슈트는 3.8 μm이고 진동이 1/2 스텝 주기인 0.2초 이후에도 지속됨을 알 수 있다.

2.2 시스템 모델링

시스템의 실시간 제어를 위해서는 가능한 낮은 차수의 엄밀한 시스템 모델이 요구된다. 이에 적합한 주파수 영역에서의 모델링 기법은 행렬분수 표현(matrix-fraction description)을 이용하는 커브피팅 방법이다⁽⁶⁾. 이 방법은 커브피팅 과정이 선형이 되도록

하고 반복계산을 요구하지 않는 이점이 있다. 추진장치가 포함된 이송부의 주파수 응답함수를 동적 응답 실험을 통해 취득하고 상기의 모델링 방법을 이용하여 이송부의 모델을 규명하였다. 시스템 모델 차수는 3차로 하였고 관심 주파수 영역은 635 Hz를 중심으로 1 kHz 범위로 설정하였다. Fig. 5는 실제 시스템의 주파수 응답과 모델의 주파수 응답을 보인 것으로서 모델오차가 미미함을 알 수 있다.

Fig. 6은 Part 1에서 규명된 히스테리시스 모델과 상기의 동적 모델이 합쳐진 이송부의 모델을 이용하여 시뮬레이션한 응답을 보인 것이다. Fig. 4에 보인 이송부 실제응답과 시뮬레이션된 응답이 잔류변위특성을 포함하여 일치하고 있음을 알 수 있다.

3. 제어기 설계

3.1 슬라이딩 모드 제어

가변구조 제어기 이론 중에서 체계화되어 있는 것 중의 하나가 슬라이딩 모드 제어법으로서 제어계의 상태는 전환함수의 경계지역 안에 놓이게 된다. 슬라이딩 모드 제어계의 동적특성은 전환함수의 선택에 의해서 결정되고 모델오차에 대해 제어계의 강건성이 유지될 수 있다⁽⁷⁾.

슬라이딩 모드 제어기 설계는 두 가지 단계에 걸쳐서 수행된다. 첫째, 제어계의 원하는 동특성을 설정하고 이에 기초하여 초평면을 설계한다. 둘째, 초평면 근방에서 슬라이딩 모드가 발생하는 조건을 설계하여 상태변수를 전환면에 구속, 제어한다. 실험을 통해 규명된 선형 시불변계는 다음과 같이 상태공간 모델로 표현된다.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \tag{1}$$

$x(k) \in R_n$ 는 상태변수, $u(k) \in R_m$ 는 입력이다. 전환함수는 다음과 같이 가정한다.

$$s(k) = Sx(k) \tag{2}$$

초평면 $S = \{x \in R_n : s(k) = 0\}$ 로 정의된다. 또한 직교행렬 T_r 와 새로운 좌표 $z(k) = T_r x(k)$ 에 의해서 식 (1)과 (2)는 슬라이딩 모드 표준계로서 식 (3), (4)과 같이 표현된다.

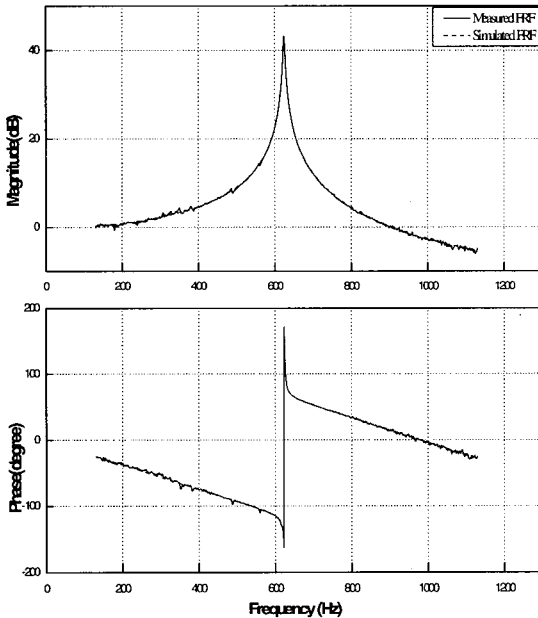


Fig. 5 Frequency response functions of system and model

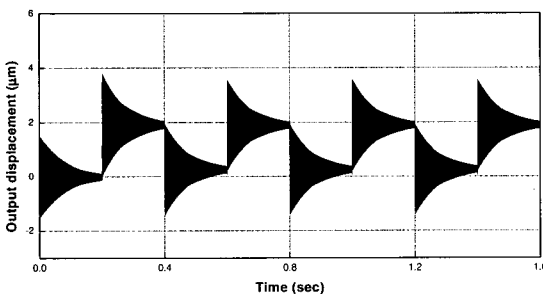


Fig. 6 Simulated output of uncontrolled system

$$\begin{aligned} z_1(k+1) &= A_{11}z_1(k) + A_{12}z_2(k) \\ z_2(k+1) &= A_{21}z_1(k) + A_{22}z_2(k) + B_2u(k) \end{aligned} \quad (3)$$

$$s(k) = S_1z_1(k) + S_2z_2(k) \quad (4)$$

식 (3)에서의 행렬들은 다음의 관계로 표현된다.

$$T_r A T_r^T = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad T_r B = \begin{bmatrix} 0 \\ B_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

시스템 상태가 슬라이딩면에 유지되고 있는 동안 ($k \geq k_s$) $s(k) = 0$ 이고 표준계의 상태변수는 다음과 같이 된다.

$$z_1(k+1) = (A_{11} - A_{12}M)z_1(k) \quad (6)$$

시스템이 점근적으로 안정하기 위한 조건은 시스템이 슬라이딩 운동이 일어나는 동안 $z_1(k) \rightarrow 0$ 이 만족되어야 한다. 이를 위해서는 $M = S_2^{-1}S_1$ 로 표현되는 초평면의 $n-m$ 개의 극점들이 단위원내에 존재하여야 한다. M 을 저차원화 된 극점이라 하고 초평면 행렬 S 는 다음 관계로 부터 결정된다.

$$S T_r^T = [M \quad I_m] \quad (7)$$

I_m 은 입력수 m 차의 단위행렬이다. 최적의 초평면은 다음의 성능지수의 도입으로 결정될 수 있다.

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=k_s}^{\infty} x^T(k) Q x(k) \quad (8)$$

여기서 Q 는 양의 한정인 대칭행렬이며 Q 는 다음과 같은 좌표변환에 의해 구성된다.

$$T_r Q T_r^T = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} \\ Q_{21} & Q_{22} \end{bmatrix} \quad (9)$$

위의 최적제어 문제를 풀고 Riccati 방정식 유일해 P_1 을 이용하면 다음의 결과를 얻는다.

$$M = -Q_{22}^{-1}(A_{12}^T P_1 + Q_{21}) \quad (10)$$

식 (7)과 식 (10)으로 부터 초평면 S 는 결정된다.

다음으로 초평면을 설계한 후 슬라이딩모드의 존재를 보증하기 위한 제어기를 설계해야 한다. 기지의

불확실 성분을 가진 다음의 계을 가정한다.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + f(t, x, u) \quad (11)$$

$$f(t, x, u) = B\xi(t, x, u) \quad (12)$$

여기서 ξ 는 불확실성 또는 비선형성이다. 제어법칙은 선형부와 비선형부의 합으로 식 (13)과 식 (14)로 표현된다. 비선형부에는 채터링(chattering) 문제를 고려하여 시그넘(signum) 함수가 사용되어 있다.

$$u(k) = u_l(k) + u_n(k) \quad (13)$$

$$u_l(k) = -\Lambda^{-1}(SB - \Phi S)x(k) \quad (14)$$

$$u_n(k) = -(\eta \| \Lambda \|^{-1} \| s(k) \| + \beta) \frac{s(k)}{|s(k)| + \delta} \quad (15)$$

또한 여기서 $\Lambda = SB$, Φ 는 전환함수의 고유값, η 과 β 는 비선형계수, δ 는 전환시간의 완급을 조절하는 시그넘함수의 계수다. 상태변수 $x(k)$ 는 칼만 필터를 이용하여 관측되었다⁽⁵⁾.

4. 제어 시뮬레이션 및 실험

4.1 비선형 모델을 이용한 정적상태의 개루프 제어

이송자별례 변위에 대한 히스테리시스 모델법은 Part1에서 제시하였다. 이를 이용하여 입력전압과 변위 사이의 관계를 선형화 하기 위해서는 역히스테리시스(inverse hysteresis) 과정이 필요하다. 이 과정은 히스테리시스와 관련된 비선형 변위를 제거할 수 있는 보상전압 u_{com} 을 히스테리시스 모델을 이용하여 산출하고 입력전압에 보상전압을 더해 주는 것으로 이루어진다. 보상전압은 다음의 식을 이용하여 산출된다.

$$u_{com}(k) = V_r(k) - X_r(k) \times R$$

$$u_{com}(k) = V_r(k) - X_f(k) \times R \quad (16)$$

여기서 이득 R 은 선형화 된 변위에 대한 입력전압의 비로서 모델로부터 $R=0.5479$ 로 설정하였다. $V_r(k)$ 는 기준입력전압, $X_r(k)$ 과 $X_f(k)$ 는 히스테리시스 모델 출력변위이다.

보상된 후의 입력전압 $V(k) = V_r(k) + u_{com}(k)$ 은 이송부의 압전구동기에 가해진다.

Fig. 7은 제어전과 제어후의 입력전압 대 이송자별레의 변위를 보인 것이다. 기준입력은 2 Hz, 1 Volt의 삼각파로 하였다. 제어전과 제어후의 이송자별레의 변위를 비교해보면 제어전에는 초기 상승부와 반복하강부, 반복상승부로 구분되는 히스테리시스 특성이

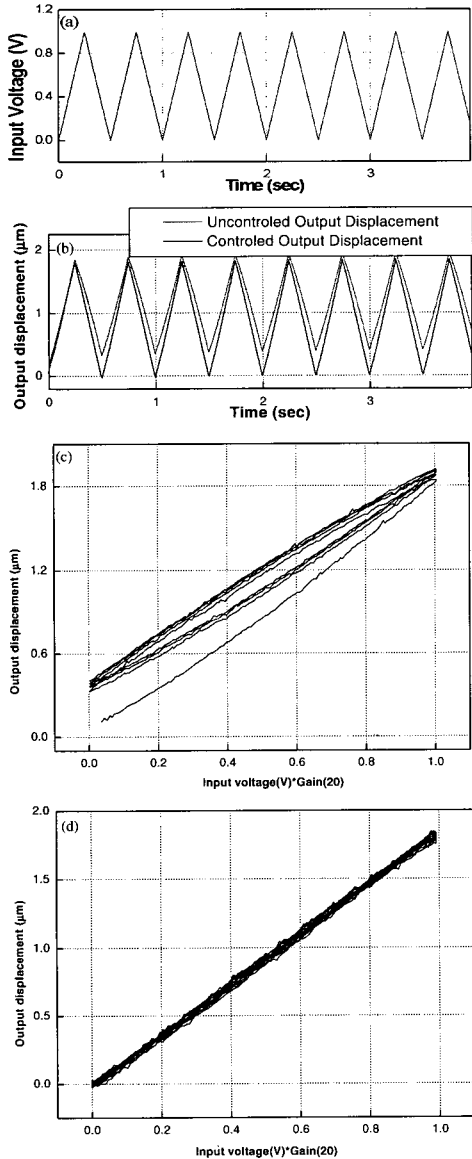


Fig. 7 Open loop control result for triangle signal: (a) input voltage (b) measured displacements for uncontrolled system and controlled system (c) measured hysteresis loop for uncontrolled system (d) measured hysteresis loop for controlled system

확연히 나타나고 있지만 제어후의 결과에서는 입력전압에 대한 변위특성이 선형화 되어 있음을 확인 할 수 있다.

4.2 선형 모델을 이용한 슬라이딩 모드 제어

이송자별레 이송부의 제어계를 블록선도로 나타내면 Fig. 8과 같다. 일반적으로 슬라이딩 모드 제어기 설계 시에 제어기 설계변수가 제어계 성능에 미치는 영향을 미리 정량적으로 평가하는 것은 용이하지 않다. 이에 따라 이 연구에서는 제어기 설계계수 선정 시에 시행오차(trial-error)법을 적용하였으며 비선형 제어기 출력과 관련하여 설정된 제어 계수 $\eta = 0.002$, $\beta = 0.0002$ 이다. 제어기 설계 시에 사용된 이송자별레 이송부 모델은 2.2절에서 언급된 선형모델을 이용하였다.

Fig. 9는 기준입력에 대한 이송자별레 변위의 제어 결과를 보인 것이다. 제어후의 이송자별레 변위의 정착 시간은 제어전 0.5초 이상에서 0.02초로 단축 되었고, 최대오버슈트도 $3.7 \mu\text{m}$ 이상에서 $2.25 \mu\text{m}$ 로 억제

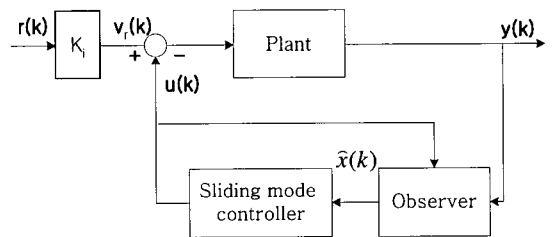


Fig. 8 Servo control system with sliding mode control

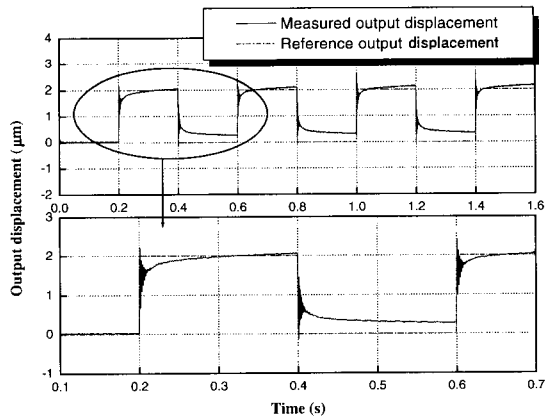


Fig. 9 Response of the sliding mode control system

되었음을 알 수 있다. 하지만 입력신호의 반복으로 인하여 기준입력이 0 Volt가 되더라도 출력변위는 0 μm 가 되지 못하는 히스테리 특성이 2번째 주기 이후에도 계속해서 나타남을 알 수 있다.

4.3 히스테리시스 모델이 포함된 슬라이딩 모드 제어

선형 모델에 기초한 이송자별레 제어계만으로는 압전구동기로 인한 히스테리시스 특성을 제거할 수 없음을 알 수 있었다(Fig.9 참조). 이에 따라 압전구동기의 히스테리시스 특성을 포함하는 정적 비선형 모델과 이송자별레의 구조적 진동특성을 표현하는 선형 모델을 합쳐 이송자별레 제어계 모델로 사용하였다.

전체 제어계의 블록선도는 Fig. 10과 같고 이송자별레 이송부(plant)에 인가되는 제어기 출력 $u_{total}(k)$ 는 다음의 식으로 표현된다.

$$u_{total}(k) = r(k) \times K_i + u_{com}(k) - u(k) \quad (17)$$

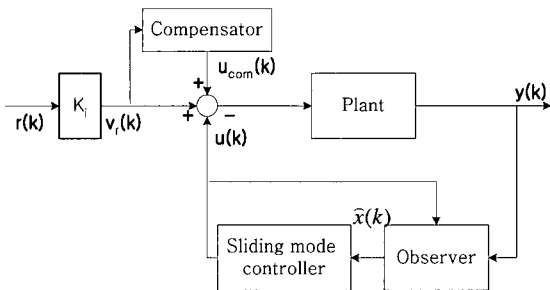


Fig. 10 Servo control system with sliding mode controller and compensator

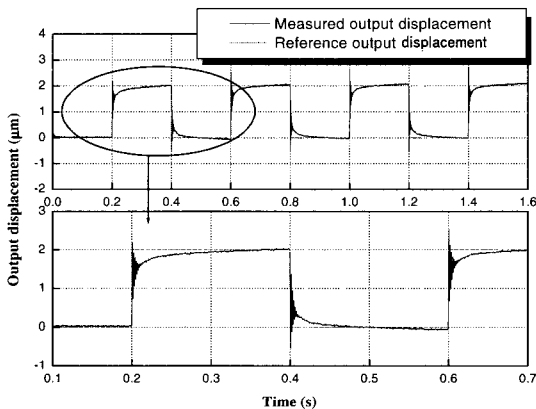


Fig. 11 Measurement of the controlled system with sliding mode control and compensator

여기서 $r(k)$ 는 기준입력, K_i 는 서보(servo)제어를 위한 비례이득, $u_{com}(k)$ 는 히스테리시스 모델에 의한 보상기 출력, $u(k)$ 는 슬라이딩 모드 제어기 출력을 나타낸다.

기준입력에 대한 이송자별레 변위의 제어결과는 Fig. 11과 같다. 선형모델 만에 기초한 슬라이딩모드 제어 시에는 두 번째 주기부터 히스테리시스에 의해 발생하는 약 0.25 μm 이상의 잔류변위가 나타났으나 Fig. 11에서는 이러한 잔류 변위가 히스테리시스 모델을 이용한 앞먹임 보상기의 적용에 의해 제거되었음을 확인할 수 있다.

5. 결론

이송자별레의 변위제어를 위해 압전구동기의 히스테리시스 특성을 포함하는 비선형 정적 모델과 이송부의 기계적 진동특성을 포함하는 동적 모델에 기초하여 제어기를 구성하였고 이것의 유용성을 확인하였다. 구동제어 실험을 통하여 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 비선형 모델을 이용한 앞먹임 보상기법을 이용하여 이송자별레 내에 장착된 압전구동기의 히스테리시스 특성을 보정할 수 있다.

(2) 이송자별레 구조적 진동특성은 주파수 영역에서의 행렬 분수를 이용하는 커브피팅 방법에 의해 효과적으로 모델링 될 수 있으며 이 모델에 기초한 슬라이딩 모드 제어기를 이용하면 동적 특성 향상을 기할 수 있다.

(3) 이송자별레를 기준 입력을 추종하는 서보계로 이용하기 위해서는 상기의 두 가지 제어기를 병행 사용해야 하며, 각각과 기준입력에 대한 구동 실험결과 잔류변위에 의한 추종오차를 제거 할 수 있고 정착시간을 1/25배로 줄일 수 있음을 확인하였다.

참고 문헌

- (1) 김정용, 2002, "역 히스테리시스 모델과 신경 회로망을 이용한 압전구동기의 정밀 위치제어," 공학석사 논문, 울산대학교 기계자동차 공학부.
- (2) 안호정, 2001, "공기중에 동작하는 전도성 고분자 구동기의 제작," 대한전기학회 하계학술대회는 문집, C권, pp. 1878~1889.

- (3) 유완동, 김진오, 박광훈, 2005, "압전필름을 센서로 사용한 접촉식 계수장치 개발," 한국소음진동공학회논문집, 제 15 권 제 2 호, pp. 239~247.
- (4) Pandall, T. and Garcia, E., 1996, "Design of a Piezoelectric Caterpillar Motor," Proceedings of ASME Aerospace Division, AD-Vol. 52, pp. 627~648.
- (5) 윤재현, 채재희, 김인수, 2001, "이송자별레로의 압전소자 응용," 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 877~880.
- (6) Juang, J. N. 1994, Applied System Identification, Frequency-domain State-space System Identification chapter 7, Prentice Hall.
- (7) Edward, C. and Spurgeon, S. K., 1998, Sliding Mode Control Theory and Applications, Taylor and Francis Ltd, pp. 1~18.