

이송자벌레의 운동제어

윤재현*, 김영식**, 김인수**

Motion Control of Inch-worm

Jae Heon Yoon*, Yeung Shik Kim** and In Soo Kim**

ABSTRACT

Solid state deformation of PZT is effective for the micron scale displacement. Inch-worm gets large linear displacement by incrementally summing displacements of PZT actuators. Dynamic stiffness of inch-worm is generally low compared to its driving condition due to the small size and light weight of inch-worm. Mechanical vibration induced by low stiffness may degenerate the motion accuracy of the inch-worm.

In this paper, dynamic characteristics of the inch-worm are modeled by using the frequency domain curve fitting based on the experimental frequency response function. SMC (sliding mode control) is examined for motion control of the inch-worm. Simulation and experimental results show that the inch-worm with SMC scheme is feasible for the precise displacement device.

Key Words : Sliding Mode Control(슬라이딩 모드 제어), PZT(압전소자), Inch-worm(이송자벌레), Variable Structure Control(가변구조제어)

1. 서론

소형, 정밀 이송장치의 응용범위가 최근 급속도로 확대됨에 따라 단위 체적당 높은 출력을 발생시키는 작고 가벼운 작동기의 응용 연구가 활발히 진행되고 있다⁽¹⁾⁻⁽³⁾. 이송자벌레는 압전소자의 미세변위를 운동기구와 결합시켜 제한적인 이송량을 극복한 정밀 이송장치이다. 일반적으로 이송자벌레는 구동환경에 비해 동적 강성이 낮으므로 고속운동 시에는 기계적 진동이 유발되고 이에 따라 이송자벌레의 정밀도 및 안정성의 향상을 위해서는 진동 저감 하에서의 운동이 요구된다.

기존의 연구 발표된 이송자벌레의 구동방식은

⁽⁴⁾ 유한요소해석 및 모의실험을 통해 안정한 구동조건의 확보와 이송자벌레가 원활한 운동을 할 수 있도록 구동과형을 사전에 설계하여 압전작동기에 인가하는 방식을 취하고 있다. 이 같은 구동방식을 이용하는 경우에는 별도의 위치센서가 요구되지 않는 장점이 있으나 다양한 이송운동의 변화에 대해서는 적절히 대처하기가 어려우며 정밀 위치 제어에는 비능률적이며 한계가 있다.

Fig. 1은 이송자벌레의 구동 개념도로서 3개의 압전작동기에 순차적으로 전압을 인가하여 구동하는 방식이다. 통상의 이송자벌레는 전단 잠금부, 이송부, 후단 잠금부 및 이송가이드로 이루어져 있다.

^{***} 2002년 4월 4일 접수
* 금오공과대학교 기전공학과 대학원
** 금오공과대학교 기계공학부

본 연구에서는 이송자벌레의 정밀도 향상 및 진동 억제를 위한 이송부 운동 제어계를 구성하고자 한다.

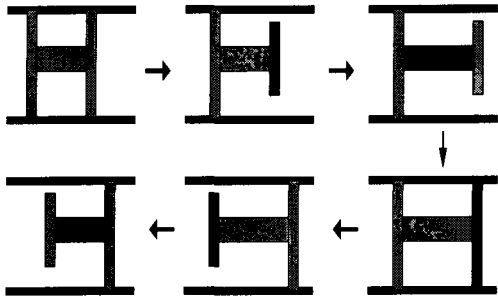


Fig. 1 Schematic diagram of inch-worm operation

이를 위해 실험을 통하여 이송자벌레에 대한 동적 특성을 수학적으로 규명하고 슬라이딩모드 제어기법에 기초한 이송자벌레 제어기를 설계한다. 슬라이딩모드 제어기법은 이송자벌레의 작동기인 압전 소자의 이력특성 및 이송기구의 비선형성^{(5),(6)} 등에 의해 유발될 수 있는 모델오차에 대해 제어기의 강인성을 확보하기 위함이다. 아울러 설계된 제어계의 모의실험과 이산신호 처리장치를 이용한 구동실험을 통해 이송자벌레의 운동 제어 가능성을 조명하고자 한다.

2. 제어기 설계

본 연구에서는 가변구조제어(variable structure control)의 한가지 형태로 분류되는 슬라이딩모드 제어기법을 적용하여 제어기를 설계하기로 한다⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾. 슬라이딩모드 제어기 설계는 원하는 동특성을 제어기에 가하는 초평면을 설계하고 초평면 근방에서 슬라이딩 모드가 발생하는 조건을 설계함으로써 이루어진다.

2.1 초평면 설계

이산 선형 시불변계를 다음의 상태공간 모델로 표현하기로 한다.

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

A는 상태행렬, B는 입력행렬, x는 상태변수, u는 입력이다. 설계될 초평면 S를 도입하여 전환함수를 가정하면 다음과 같다.

$$s(k) = Sx(k) \quad (2)$$

직교행렬 T_r 에 의해 좌표변환을 수행하면,

$$z(k) = T_r x(k) \quad (3)$$

다음의 슬라이딩 모드 표준계로 표현 될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} z_1(k+1) \\ z_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1(k) \\ z_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B_2 \end{bmatrix} u(k) \quad (4)$$

$$s(k) = S_1 z_1(k) + S_2 z_2(k) \quad (5)$$

계의 상태가 슬라이딩면에 유지되고 있는 동안($k \geq k_s$) $s(k) = 0$ 이고 표준계는 다음과 같이 표현된다. k_s 는 상태 x가 슬라이딩모드를 일으키기 시작하는 순간이다.

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

최적제어에 기초하여 초평면을 설계하는 경우 일반적으로 다음과 같은 성능지수를 도입한다.

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=k_s}^{\infty} x^T(k) Q x(k) \quad (7)$$

여기서 Q는 양의 한정인 대칭행렬이고, $Q_{12} = Q_{21}^T$ 이다.

$$T_r Q T_r^T = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} \\ Q_{21} & Q_{22} \end{bmatrix} \quad (8)$$

위의 최적제어 문제를 풀고 Riccati 방정식의 유일해 P_1 을 이용하면 다음의 결과를 얻는다⁽⁸⁾.

$$M = -Q_{22}^{-1}(A_{12}^T P_1 + Q_{21}) \quad (9)$$

M을 저 차원화된 극점이라 하고 초평면 행렬 S는 다음 관계로부터 결정된다.

$$S T_r^T = [M \ I_m] \quad (10)$$

I_m 은 입력 수 m차의 단위행렬이다.

2.2 슬라이딩모드제어기 설계

설계된 초평면을 기초로 슬라이딩 모드의 존재를 보증하는 제어기를 설계해야 한다. 기지의 불확실 성분 $f(k, x, u)$ 을 갖는 상태공간 모델은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + f(k, x, u) \\ y(k) &= Cx(k) + Du(k) \end{aligned} \quad (11)$$

y 는 출력 벡터이다. 슬라이딩 모드 제어항은 선형부 u_1 과 비선형부 u_n 로 분류할 수 있으며 채터링(chattering) 문제를 고려하여 시그넘 함수를 사용하면 제어항은 식(12)~(14)으로 표현된다⁽⁸⁾. 시그넘 함수는 식(15)로 표현되며 δ 가 크면 기울기가 완만해지고 작으면 기울기가 커진다.

$$u(k) = u_1(k) + u_n(k) \quad (12)$$

$$u_1(k) = -\Lambda^{-1}(SA - \Phi S)x(k) \quad (13)$$

$$u_n(k) = -(\eta \|\Lambda\|^{-1} \|s(k)\| + \beta)f(s(k)) \quad (14)$$

$$f(s(k)) = \frac{s(k)}{|s(k)| + \delta} \quad (15)$$

여기서 $\kappa = SB$, η 와 β 는 불확실 성분과 관련된 제어기의 변수, Φ 는 전환함수의 고유치이다.

2.3 슬라이딩모드 관측기 설계

일반적으로 불확실한 비선형 성분의 경계치만 알 수 있다면 슬라이딩모드 강인 관측기를 설계하는 것이 가능하다. 본 연구에서는 다음과 같은 가정하에 Walcott⁽¹⁰⁾이 제안한 슬라이딩모드 관측기 설계법을 이용하기로 한다.

첫째, 관측기 이득행렬 L 에 의해 관측기 극이 단위 원 내에서 존재한다.

$$A_o = A - LC \quad (16)$$

둘째, 행렬 F 에 대해서 다음 식이 성립한다.

$$C^T F^T = PB \quad (17)$$

여기서 P 는 다음의 Liapunov 방정식의 해이고 Q 는 임의의 양의 대칭행렬이다.

$$A_o P A_o^T - P + Q = 0 \quad (18)$$

셋째, 어떤 기지의 스칼라 함수 $\alpha(\cdot) > 0$ 과 $r > 0$ 에 대해서 다음의 경계조건이 성립한다.

$$\|f(k, x, u)\| \leq r \|u\| + \alpha(k, y) \quad (19)$$

상기의 가정하에 관측기 방정식은 다음과 같이 정리된다.

$$\hat{x}(k+1) = A_o \hat{x}(k) + M(\hat{x}, y, \rho) + Bu(k) \quad (20)$$

$$M(\hat{x}, y, \rho) = \begin{cases} -\frac{BFCe(k)}{\|FCe(k)\|} \rho, & \|FCe(k)\| \geq \kappa \\ -\frac{BFCe(k)}{\kappa} \rho, & \|FCe(k)\| < \kappa \end{cases} \quad (21)$$

ϵ_0 는 오차케도 반경에 의존하는 경계치 이다

$$e(k) = \hat{x}(k) - x(k). \quad (22)$$

여기서 $\rho(\cdot)$ 는 양의 상수 η 가 존재할 때 다음이 성립되도록 선정한다.

$$\rho(k, y, u) = r \|u\| + \alpha(k, y) + \eta \quad (23)$$

3. 시뮬레이션 및 실험결과

3.1 실험장치 구성

Fig. 2 는 이송자벌레의 이송부를 보인 것으로서 압전작동기에 의해 구동된다. 이송부는 스테인레스강을 이용하여 제작되었고 내장된 압전작동기가 충격 및 전단력에 의해 파손됨을 방지하고 원활한 신장 수축이 일어나도록 반원형 스프링 외곽부를 설치하였다. 사용된 압전작동기는 길이가 21mm 이고 150 층의 PZT 소자를 적층한 것(Sumitomo PSA15C)이다. 이송부의 동적특성을 규명하기 위해 실험적으로 측정된 주파수 응답함수에 주파수영역에서의 커브피팅(curve fitting)법을 적용하였다⁽¹¹⁾.

이송부의 주파수 응답함수를 얻기 위하여 계의 입력신호로는 랜덤 노이즈(random noise)를 함수 발생기(HP9904)로부터 발생시킨 후 전력증폭기(TECHRON7540)에서 증폭된 신호를 압전 작동기에 인가하였다. 이송부의 변위신호는 이송부 끝단에 설치된 갭 센서(gap sensor, AEC5706PS)로 검출하였고 고주파 잡음을 제거하기 위해 4 차의 아날

로그 저역통과 필터를 이용하였다. 이산신호 처리 장치 및 주변장치들의 시간지연 등의 동특성을 주파수응답함수에 포함시키기 위하여 이송부의 변위 신호는 16bit A/D 변환기, 이산신호처리 장치(TMS320C30), 16bit D/A 변환기를 거친 후 데이터 획득 장치(DI-2200)에 저장되도록 하였다.

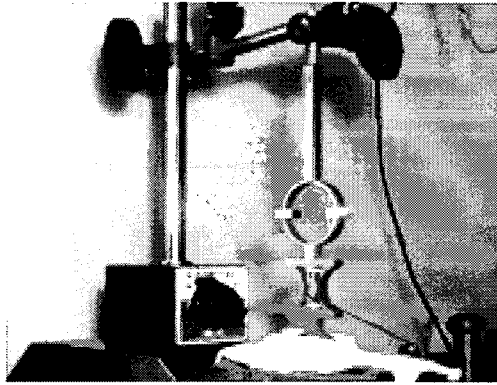


Fig. 2 Experimental setup

저역통과 필터의 차단 주파수는 이송부의 공진주파수가 620 Hz 임을 고려하여 2.5 kHz 로 하였다. Fig. 3 은 측정 및 4 차로 모델링된 이송부의 주파수 응답함수를 보인 것이다.

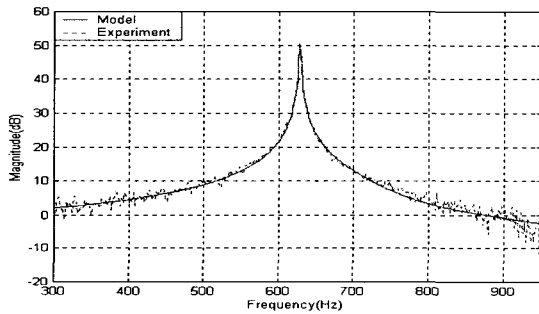


Fig. 3 Measured and modeled FRF of inch-worm

3.2 이송부 제어실험 및 모의실험

앞 절에서 기술된 슬라이딩 모드 제어기를 설계한 후 이송부 제어계의 응답특성을 파악하기 위하여 다양한 모의실험 및 구동실험을 수행하였다. Fig. 4 는 상태변수 및 관측기 상태변수의 초기치 를 임의로 입력한 후 설계된 이송부 제어계의 위

상평면에서의 상태응답 거동을 보인 것이다. 상태 변수가 전환면을 따라 0 으로 수렴함을 알 수 있다. 입력된 상태변수 초기치는 $x_1=5.0$, $x_2=0.01$, $x_3=0.05$, $x_4=0.01$ 이고 관측기 상태변수 초기치는 $\hat{x}_1=3.0$, $\hat{x}_2=0.02$, $\hat{x}_3=0.07$, $\hat{x}_4=0.0$ 이다. Fig. 5 는 이송부 제어계의 출력을 나타낸 것으로서 출력의 전환면 도달양상을 보이고 있다. 제어계 응답의 채터링 정도는 제어기 설계시에 고려된 비선형항의 상대적 크기에 따라 결정되며 설계된 제어기의 강인성 부여정도에도 관련된다. 시그넘함수의 적용 유무에 따른 제어계의 응답의 특성을 파악하기 위해 모의실험에서는 시그넘 함수를 적용하였을 경우(실선)와 적용하지 않았을 경우(점선)를 병행하여 수행하였다. Fig. 4, 5 는 시그넘함수를 적용함으로써 제어계의 채터링을 상당부분 제거할 수 있음을 보이고 있다.

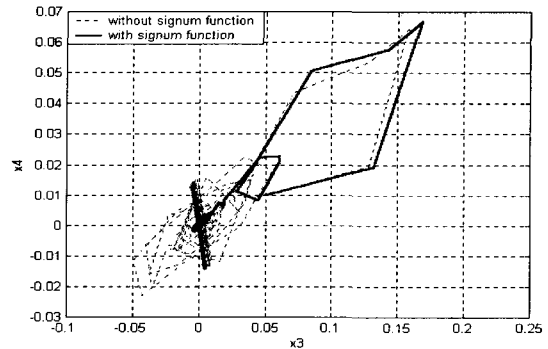


Fig. 4 Controlled states at phase plane

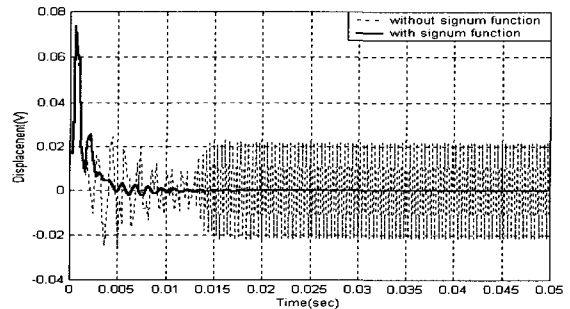


Fig. 5 Controlled output

시그넘 함수가 적용된 제어기에서는 채터링 현상을 일으키지 않아 수렴하는 임펄스응답을 얻을 수 있다. Fig. 6 은 슬라이딩 모드 제어기의 임펄

스응답에 대한 푸리에(Fourier) 변환 결과를 보인 것으로서 이송부의 620Hz 부분에서는 공진특성성이 $\frac{1}{6}$ 이하로 줄어들 수 있음을 알 수 있다.

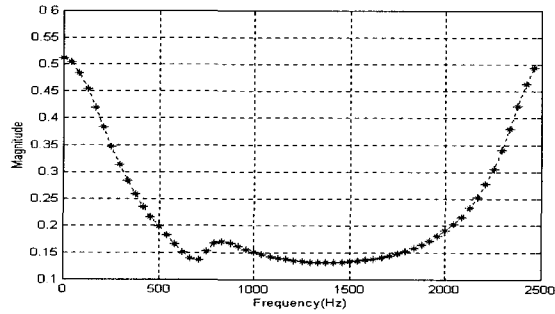


Fig. 6 The FRF of designed controller

3.3 모의실험 및 제어실험 결과

Fig. 7 과 Fig. 8 은 각각 제어되지 않은 상태에서의 이송부의 충격 입력 및 계단(step) 입력에 대한 응답을 깎 센서에 의해 측정된 것이다. 깎 센서 단위 전압 당 실제 변위는 $2.5 \mu m / V$ 이다. 입력시에 잔류진동의 지속시간은 0.7 초 이상이며 계단 입력에 대해서는 계단 입력 주기보다 길게 잔류진동이 지속됨을 알 수 있다. 계단 입력 시에 위 부분의 변위 응답이 아래부분의 변위응답에 비해 진동 진폭이 작게 나타나는 주된 이유는 이송부 구조면에서 압전소자가 끼워지는 스프링 지지부의 강성이 압전소자의 변위가 커짐에 따라 커지기 때문이다(Fig. 2 참조).

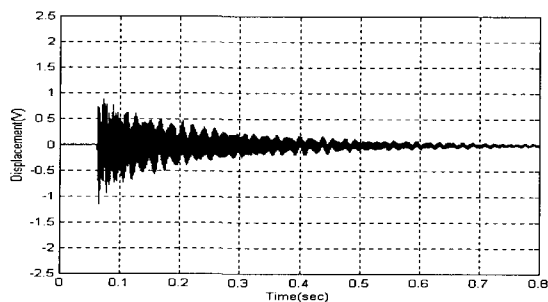


Fig. 7 Measured response on impulse input

일반적으로 슬라이딩모드 제어기 설계 시에 제어기 설계계수가 제어계 성능에 미치는 영향을 미리

정량적으로 평가하는 것은 용이하지 않다. 또한 압전소자의 이력특성 및 스프링 강성의 비선형성 등을 포함한 이송부의 비선형특성을 정확하게 규명하는 것도 용이하지 않은 것으로 사료된다.

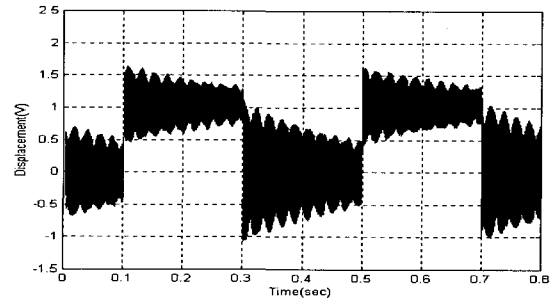


Fig. 8 Measured response on step input

이에 따라 본 연구에서는 제어기 설계계수 선정 시에 시행착오적(trial-error) 방법을 적용하였다. 선정된 설계계수는 다음과 같다.

I 제어기: $\eta = 0.07, \beta = 0.01, \delta = 0.055, \rho = 0.01, \epsilon_0 = 0.05$

II 제어기: $\eta = 0.002, \beta = 0.001, \delta = 0.035, \rho = 0.01, \epsilon_0 = 0.05$

I 제어기에 비해 II 제어기는 비선형 관련계수를 적게 설정하였다(식(12)~(14), (20),(23) 참조).

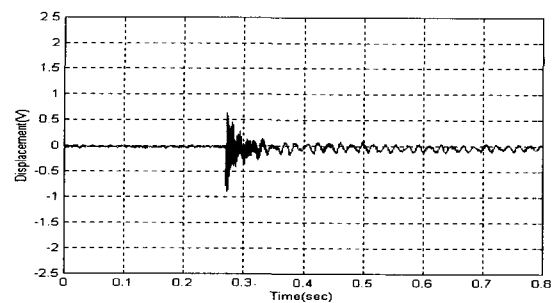


Fig. 9 Measured response of case I on impulse input

Fig. 9 는 충격 외란에 대한 I 제어계의 응답을 보인 것으로서 계의 잔류진동 지속시간이 0.04 초 이내이며 제어하지 않는 경우에 비해 잔류진동 지속시간이 17 배정도 줄어들고 있음을 알 수 있다 (Fig. 7 참조). 이는 이송부의 구동속도를 빠르게 할

수 있게 되어 결과적으로 이송자벌레의 이송속도를 증가시킬 수 있음을 의미한다. 충격 입력에 대한 II 제어계의 응답도 Fig. 9 와 유사함을 알 수 있었다. Fig. 10 은 모의 실험을 통해 얻어진 I 제어계의 계단 입력에 대한 응답이다. 초기의 최대 오버슈트(overshoot)는 13%이고 응답의 정착시간은 0.02 초 이내 이다.

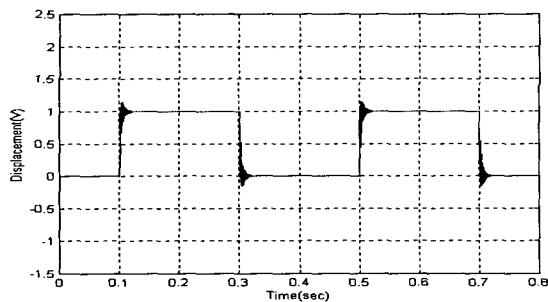


Fig. 10 Simulated response of case I on step input

Fig. 11 은 제어실험을 통해 얻어진 계단입력에 대한 I 제어계의 응답을 보인 것이다. 초기의 최대 오버슈트는 25%이고 응답의 정착시간은 0.04 초 이내이다. 모의실험 결과에 비해 제어실험 결과가 제어성능 면에서 좋지 않은 것은 이송부의 비선형성 등으로 인하여 제어기 설계 시에 사용된 이송부 모델과 차이가 존재하고 갭 센서에 유입된 측정잡음에 기인하는 것으로 사료된다.

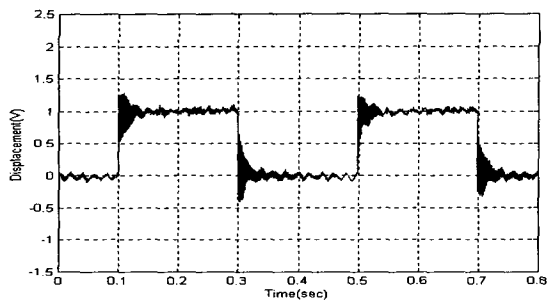


Fig. 11 Measured response of case I on step input

Fig. 12 는 계단입력에 대한 II 제어계의 모의실험 응답으로서 오버슈트는 발생되지 않았고 상승시간은 0.04 초 이내이다. Fig. 13 은 계단입력에 대한 II 제어계의 제어실험 결과를 측정 한 것으로서 모의실험 결과와 마찬가지로 오버슈트는 발생되지

않았고 상승시간 및 응답 파형 면에서도 유사함을 알 수 있다. 다만 제어실험 결과에는 응답 초기에 약간의 진동이 발생되고 있음을 알 수 있다. 또한 I 제어계에 비해 II 제어계가 응답속도는 낮으나 잔류진동 제어면에서는 효과적임을 알 수 있다(Fig. 11, Fig. 13 비교).

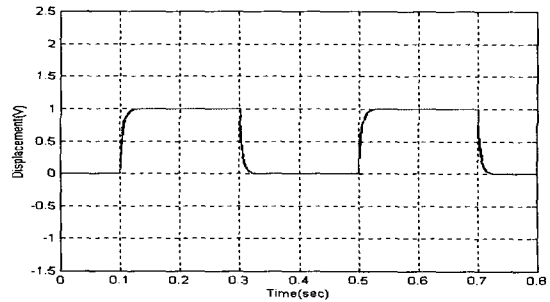


Fig. 12 Simulated response of case II on step input

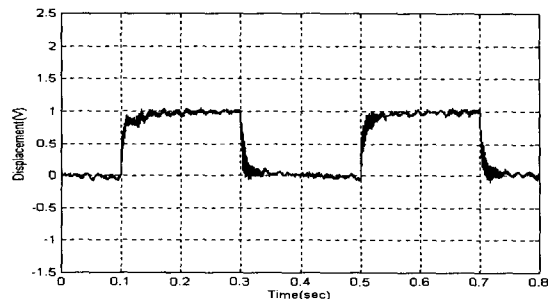


Fig. 13 Measured response of case II on step input

4. 결론

압전소자를 통하여 구동되는 이송자벌레 이송부 제어계를 슬라이딩 모드 제어기법에 기초하여 구성하였고 모의실험 및 제어실험을 수행하여 본 결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1) 이송자벌레의 낮은 동적 강성은 잔류진동 유발시켜 고속구동 및 정밀 이송을 어렵게 한다. 이송부를 되먹임 제어계를 이용하여 구동시키는 경우에는 이 같은 문제를 상당부분 제거할 수 있다.

2) 이송자벌레의 이송부 구성요소에 포함된 불확실한 비선형 동특성(압전소자 이력특성, 스프링

지지부 비선형성 등)에도 불구하고 기술된 슬라이딩 모드 제어를 이용하면 안정적인 이송부 서보계 구성이 가능하다.

후 기

본 연구는 2000 년도 금오공과대학교 학술연구비에 의해 지원된 논문입니다.

참고문헌

1. B. R. Dershem, "Design and Calibration of a Framed Piezoceramic Stack Actuator," Master Thesis, Pennsylvania State University, 1996.
2. P. G. Timothy, "Design and Fabrication of a High Authority Linear Piezoceramic Actuator: The PSU H3 Inchworm," Master Thesis, Pennsylvania State University, 1997.
3. B. Zhang and Z. Q. Zhu, "Design of an Inchworm-type Linear Piezo-motor," SPIE, Vol. 21, pp. 228-239, 1994.
4. 윤재현, 채재희, 김인수, "이송 자벌레로의 압전 소자 응용," 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 877-880, 2001.
5. 채재희, 문찬영, 김인수, "퍼지 신경망을 이용한 압전구동기 변위의 비선형 제어," 금오공과대학교 논문집 Vol. 21, pp. 79-90, 2000.
6. M. Goldfarb, N. Celanovic, "A Lumped Parameter Electromechanical Model for Describing the Nonlinear Behavior of Piezoelectric Actuators," Journal of Mechanical Design Transactions of the ASME, Vol. 119, pp 478-485, 1997.
7. Christopher Edwards & Sarah K. Spurgeon, "Sliding Mode Control: Theory and Application," Taylor & Francis, 1998.
8. V.I. Utkin, "Sliding Modes in Control Optimization," Springer Vellag, Berlin, 1992.
9. B.L. Walcott and S.H. Zak, "Observation of dynamical systems in the presence of bounded nonlinearities/uncertainties," Proceedings of the 25th Conference on Decision and Control, pp. 961-966, 1986.
10. B.L. Walcott and S.H. Zak "State observation of nonlinear uncertain dynamical systems," IEEE

Transaction on Automatic Control, Vol. 32, pp. 166-170, 1987.

11. Jer-Nan Juang, "Applied System Identification," Prentice Hall, 1994.