한국소음진동공학회논문집 제 15 권 제 7 호, pp. 871~877, 2005.

이송자벌레를 위한 압전소자의 모델링 및 운동제어: 1. PZT소자의 히스테리시스 모델링

Modeling and Motion Control of the Piezoelectric Actuator for the Inchworm: Part 1. Hysteresis Modeling of the Piezoelectric Actuator

김 인 수† · 김 기 범* · 김 영 식**

In-Soo Kim, Gibum Kim and Yeung-Shik Kim

(2005년 5월 24일 접수 : 2005년 6월 14일 심사완료)

Key Words : Piezoelectric Actuator(압전구동기), Inchworm(이송자벌레), Hysteresis Model(히스테리시스 모델), Preload(예압), Residual Displacement(잔류변위)

ABSTRACT

This paper proposes a new modeling scheme to describe the hysteresis between input voltage and displacement of piezoelectric actuators in the inchworm. From the experimental analysis of piezoelectric actuator behaviors, the hysteresis characteristics including residual displacement can be modeled by second order functions of a maximum input voltage and preload. Various experiments are performed to demonstrate the effectiveness and validation of the proposed modeling scheme.

1. 서 론

압전소자는 고응답성, 고정밀도를 가지고 있으며 작고 가벼운 구동기의 특성을 가지고 있다[1~2]. 이러한 압전구동기는 반도체 분야에서의 광 조리개 장치나 가공장치에, 통신 분야에서는 파이퍼 융착장치나 커넥터 가공장치에, 공작기계에서는 다이아몬드 가공기의 공구 등에 사용되고 있으며[3], 여러 가지다른 형태의 구동기로 변형되어 개발되고 있다. 예를 들어 충격구동방식을 이용하여 마찰면을 직선이동 하는 기구[4], 압전구동기들 간의 고정과 풀림을 반복하여 큰 변위를 얻는 이송자벌레(inchworm)의 형태[5], 초정밀 표면 측정 장치의 스캐너에 많이 이용되는 튜브형 압전소자 형태[6], 두 개의 적층형 압전구동기를 이용하여 마찰력을 발생하고 그 힘으로 슬라이더를 이송하는 형태[7] 등이 있다.

한편 압전소자는 그 자체가 가지고 있는 비선형성으로 인해 반복 정밀도의 저하를 가져오게 된다. 히스테리시스(hysteresis) 특성은 인가전압과 출력변위 사이의 비선형성으로 인해 입가전압의 반복과정동안에도 대응되는 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. Kaizka는 입력전압 증폭기와 압전구동기 사이에 콘덴서를 직렬로 연결하여 비선형성을 제거하였다. 하지만 이러한 방법은 같은 변위를 출력하기위해서 상대적으로 매우 높은 전압을 인가해야 하는 단점을 가지고 있다[8]. 또한 Goldfarb는 맥스웰 모델(Maxwell model)을 이용하여 히스테리시스 특

† 책임저자 : 정회원, 금오공과대학교 기계공학부
E-mail : kiminsoo@kumoh.ac.kr
Tel : (054) 478-7345, Fax : (054) 478-7319
* ㈜ 금오공과대학교 대학원 기전공학과
** 정회원, 금오공과대학교 기계공학부

성을 묘사하였다[9]. 또한 Jouaneh는 프리사체 모델(Preisach model)을 이용하여 히스테리시스 특성을 모델링하고 이를 시스템에 적용시켰다. 하지만 이 모델은 일정하게 반복되는 주기적인 입력신호에 대해서만 추종할 수 있다는 단점을 가지고 있다[10]. 그리고 Tzen는 히스테리시스의 기하학적 형상을 지수함수에 접근시켜 수치적인 표현을 하였다[11]. 또한 Mulling은 여러 가지 다른 형태의 예압 인가를 통해 압전구동기의 특성을 파악하기도 하였다[12]. 하지만 압전구동기의 비선형특성을 모델링하면서 시스템 예압을 고려한 경우의 연구는 아직 미흡한 상황이다.

이에 이 연구에서는 압전구동기를 이송자벌레형태의 정밀이송장치에 적용하기위하여, 히스테리시스 특성을 모델링 하는 방법을 제안하고 타당성을 검증하고자 한다. 또한 예압이 작용하는 경우에 압전구동기가 장착된 이송자벌레의 거동 특성을 파악할 수 있는 모델을 제시하고 실험을 통해 실제 거동과 비교 검증하고자 한다.

2. 시스템 특성

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 마이크로미터 이상의 대 변위 이송범위를 갖는 선형이송장치를 구성 할 수는 없다. 이 같은 한계를 극복하기 위한 방안으로 압전소자를 이용하여 이송 가이드면을 따라서 마찰력 의해 벌레가 기어가는 것과 같은 행태의 이송을 발생시키는 것이 이송자벌레이다. Fig. 1은 구현 이송자벌레의 도면이다.

Fig. 2에 보인 바와 같이 이송자벌레의 이송부에 장착된 압전 구동기의 변위특성 실험을 위하여 이송부의 아래단을 고정하고 윗단에 갭센서(ADE technologies microsense 5130)를 설치하였다. 사용된 압전구동기

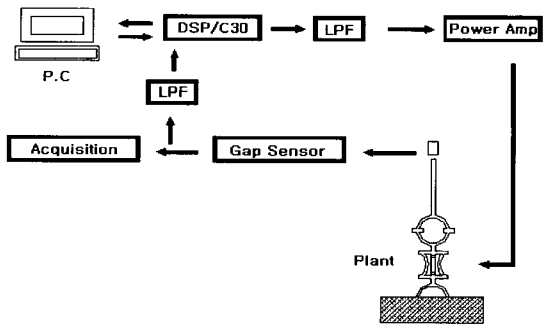

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup

Table 1 The Specification of piezoelectric actuator

Model	15 C	Unit
Capacitance	900±20 %	C(nF)
Insulation resistance	$>1\times10^8$	Ro(Ω)
Max. Driving field	150	Eo(V)
Effective displacement	202	Xo(μm)
Xo/Eo	0.16	(μm/V)
Material	SPEM-5D	
Response time	20 μsec	
Clamping Force	700	N

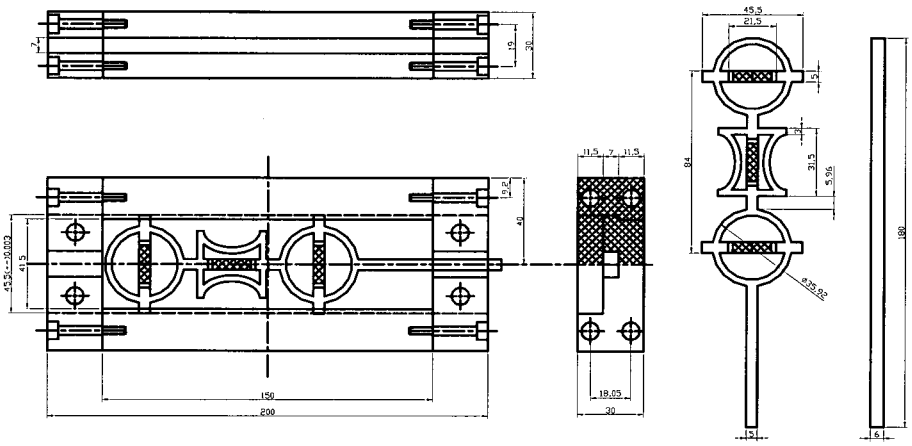

Fig. 1 The design of the inchworm

는 길이가 21 mm이고 다층의 PZT 압전소자를 적층한 것(Sumitomo PSA-15C-5AT) 으로서 Table 1의 사양을 가지고 있다. 이산신호처리장치에서 발생된 구동신호는 파워증폭기(Techron 754)를 사용하여 20배 증폭된 후 압전구동기에 인가된다.

2.2 히스테리시스 거동 특성

압전소자는 반복 정밀도를 저해하는 비선형성을 가지고 있는데 Fig. 3은 구동전압에 대한 압전소자 변위의 히스테리시스 특성을 보인 것이다.이에 따라 일정한 구동전압(V_1)에 대응되는 출력변위(D_1, D_2, D_3)가 서로 다르게 나타난다. 또한 압전소자에는 반복적인 전압이 인가과정동안 에 구동전압이 가해지지 않아도 출력 변위가 발생되는 이른바 잔류변위가 발생된다.

이러한 히스테리시스 거동과 잔류변위로 인한 압전구동기의 정밀도 저해를 보완하기 위해서는 압전구동기의 인가전압과 변위사이의 관계를 표현하는 비선형 모델이 필요하게 된다.

3. 시스템 모델링

3.1 히스테리시스 모델링

Fig. 2에서 알 수 있는 바와 같이 출력변위에는 압전구동기의 히스테리시스 특성과 이송자벌레의 이송부에 의한 동특성을 함께 포함하고 있다. 압전구동기의 히스테리시스 특성만을 측정하기 위해서 동특성을 배제하고 실험의 편의를 기할 수 있도록 저 주파수의 삼각파 신호를 입력전압으로 사용하였다. 히스테리시스 거동은 일정하게 반복되는 인가전압에 대해서 초기상승 입력전압에 대응되는 출력변위, 반복상승 입력전압에 대응되는 출력변위, 반복하강 입력전압에 대응되는 출력변위 등 세 부분으로 나누어 고려하였

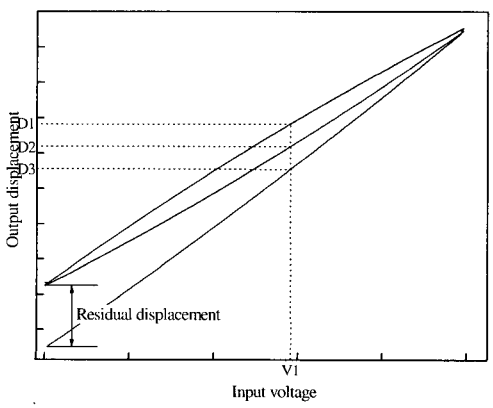

Fig. 3 Hysteresis characteristics and residual displacement

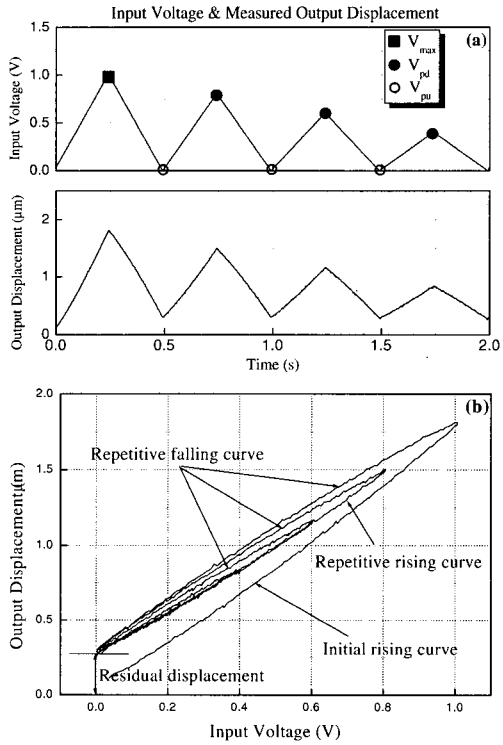

Fig. 4 Hysteresis behavior: (a) input voltage and measured output displacement, (b) measured hysteresis loop

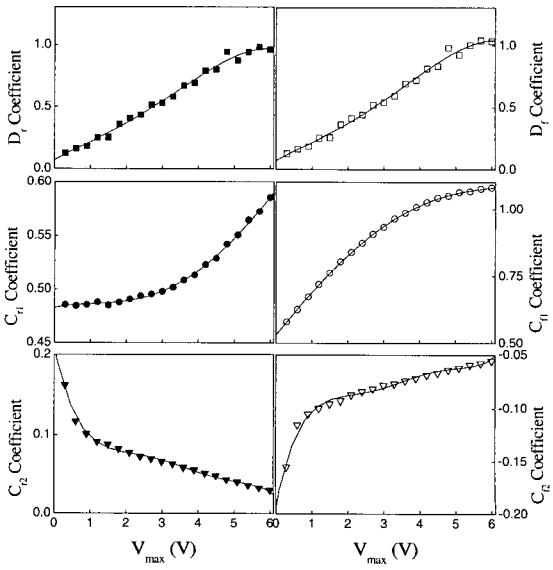

Fig. 5 Curve fitting of coefficients

다. Fig. 4는 최대치가 선형적으로 감소하는 2 Hz 삼각파를 입력전압으로 사용하였을 때 출력변화를 나타낸 것이다. 위 결과로부터 히스테리시스를 모델링하기 위한 압전구동기 거동의 몇 가지 특징을 확인 할 수 있다. 첫째, 입력전압 대 출력변위 사이의 히스테리시스 거동은 초기상승곡선, 반복하강곡선, 반복상승곡선의 세 가지 다른 형태의 곡선들로 나누어진다. 둘째, 입력전압의 최대값(V_{max})이 변화할 때 히스테리시스 곡선의 형태는 V_{max}에 따라 달라진다.

셋째, 히스테리시스 특성 중에서 잔류변위의 크기는 V_{max}에 의해 달라진다. V_{max}는 입력전압의 방향이 바뀌는 지점 즉, Fig. 4에서 V_{pd}와 V_{pu}으로 표시된 전압 중 가장 큰 전압을 의미한다.

이 연구에서는 이와 같은 특징들을 이용하여 히스테리시스 곡선을 상승과 하강형태로 분리하여 각각을 2차 함수로 식 (1)과 (2)와 같이 표현하였다. 여기서 V_{in}은 입력 전압, X_r과 X_f은 상승과 하강시 출력 변위, D_r과 D_f는 상승과 하강 시의 잔류변위, C_{1r}과 C_{r2}는 상승곡선 계수, C_{f1}과 C_{f2}는 하강곡선 계수이다.

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

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

다양한 입력전압의 변화에 대해서 히스테리시스 특성을 모델링하기 위해서는 상기 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 극점 V_p 변화에 따른 히스테리시스 곡선의 형태 변화와 잔류변위의 크기를 파악하기 위해 주파수는 2 Hz로 고정하고 삼각파형 입력전압을 6 Volt 부터 120 Volt 까지 6 Volt 씩 증가시켜 히스테리시스 거동을 각각 측정하였다. 측정된 히스테리시스 거동을 커브 피팅(curve fitting) 함으로써 상승곡선 함수와 하강곡선함수의 각 계수를 결정하였다.

이 결과로부터 함수 X_r과 X_f의 D_r, D_f, C_{r1}, C_{r2}, C_{f1}, C_{f2} 계수들은 V_{max} 함수로 표현됨을 알 수 있었으며, V_{max}의 변화에 대한 각 계수들의 변화는 Fig. 5와 같다. 각 계수들은 각각의 커브 피팅을 통하여 결정되었다. 만약 어느 한 시점에서 과거의 V_{max}보다 더 큰 전압이 인가된다면, 이 순간 V_{max}의 값은 변경되며 이로 인해 X_r과 X_f의 계수들은 변경된다. 따라서 V_{max} 변화에 맞추어 히스테리시스 곡선의 변화가 추종될 수 있다.

최초로 전압이 인가될 때 히스테리시스 곡선의 추종이 시작된다. 초기상승 함수의 계수들 D_r, D_f, C_{r1}은 식 (1)에 대입된다. 초기상승 함수의 계수들은 입력전압의 방향이 변경될 때까지 유지되며, 입력전압의 극점 V_p에 도달하는 순간 전압이 상승에서 하강하는 극점인 V_{pd}인지 또는 하강에서 상승하는 극점인 V_{pu}인지를 판단하게 된다. 관심을 가져야 할 부분은 입력전압이 상승에서 하강으로 변경되는 V_{pd}이다. 이 때의 입력 전압이 최초의 극점 V_p라면 이것은 새로운 V_{max}가 된다. 새로운 V_{max}가 결정되면 함수 X_f의 계수들이 변경되고 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. 6과 같다. Fig. 7은 측정 및 시뮬레이션된 시스템의 히스테리시스 루프를 나타낸다.

모델링 오차 그래프에 나타난 바와 같이 측정된 출력 변위와 시뮬레이션 출력 변위의 오차는 0.125 m 이내로 유지됨을 알 수 있다.

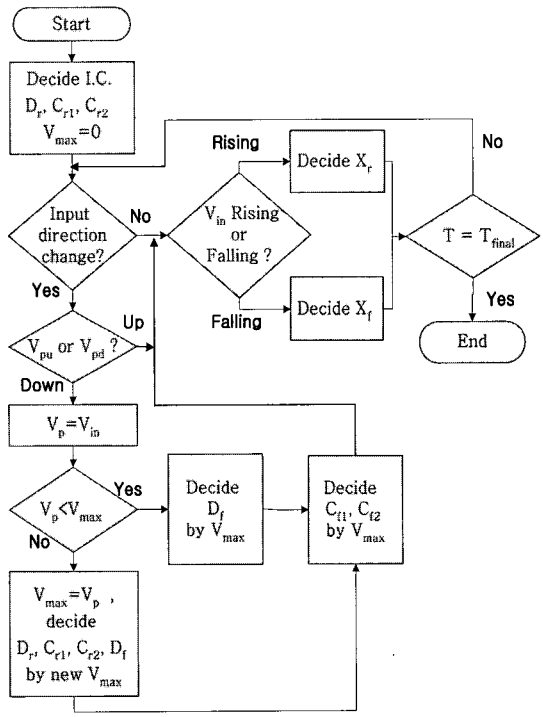

Fig. 6 Flow chart for hysteresis loop modeling

3.2 예압을 고려한 히스테리시스 모델링

압전소자의 히스테리시스 특성에 관한 모델링 기법의 연구들은 다양한 방법으로 진행되어 왔다. 하지만 실제로 압전구동기가 특정 시스템에 적용된 경우를 대상으로 시스템에 가해진 예압효과가 모델에 고려된 경우는 드물고 예압의 영향에 따른 압전소자의 기초 특성을 밝히는 정도로 연구가 진행되어왔다.

이 연구에서는 압전구동기가 장착된 이송자벌레계에 예압이 인가되는 경우를 고려하여 예압효과가 제안된 모델에 포함될 수 있도록 하였다. Fig. 8(a)는 각각의 기준 입력전압에서 예압의 영향에 따른 출력변위의 크기 변화를 보여준다.

실험 결과로부터 5.9 N 까지의 예압은 압전소자 자체의 변형 특성변화에 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 이는 사용된 압전소자의 최대 발생력(clamping force)이 700 N이기 때문에 5.9 N 이하의 예압은 압전소자의 변형특성에 그다지 영향을 미치지 못한 것으로 사료된다. Fig. 8(b)는 60 V의 사인파 입력전압에 대한출력 변위의 히스테리시스 곡선으로 이것은 예압의 영향에 의한 히스테리시스 곡선의 변화를 확인하기 위한 것이다. 여기에서도 예압에 의한 히스테리시스 곡선의 행태변화는 그다지 나타나지 않음을 알 수 있다.

그러나 이송자벌레 경우에는 Fig. 1에서 보여진 바와 같이 압전구동기가 장착된 기계적 프레임이 스프링 역할을 하기 때문에 예압에 의한 영향을 크게 받게 된다. Fig. 9는 인가된 예압의 크기 영향에 따른 이송자벌레 끝단의 변위를 나타낸 것이다.

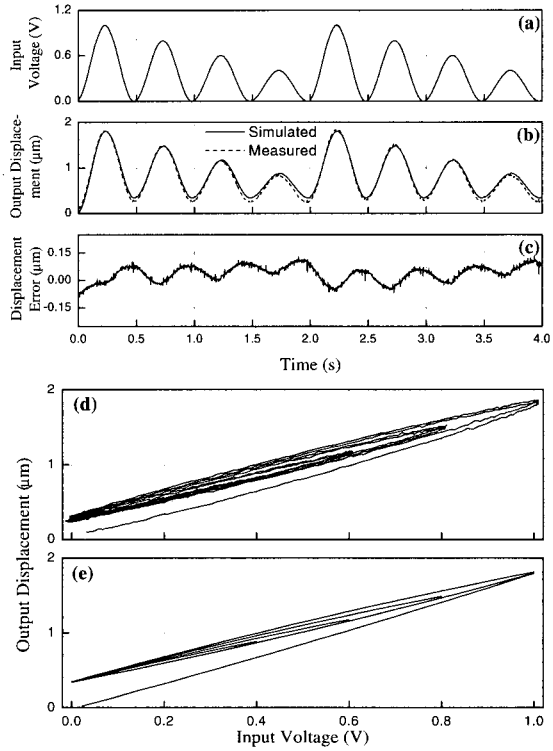

Fig. 7 Comparisons of simulated and measured data: (a) input voltage, (b) measured displacement (dashed) and simulated displacement (solid), (c) modeling error, (d) measured hysteresis loop, (e) simulated hysteresis loop

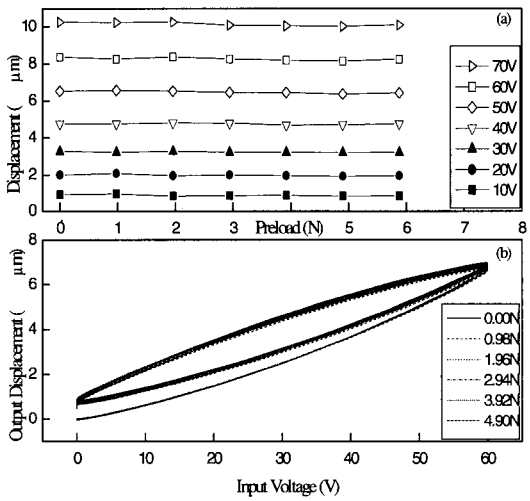

Fig. 8 Displacement and hysteresis loop under preload: (a) displacement vs. preload of piezoelectric actuator varying input voltages (b) hysteresis curve under the regular sin wave preload with 60volt amplitude

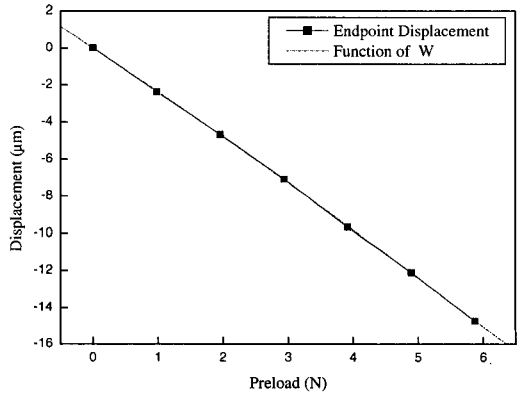

Fig. 9 Displacement of inchworm vs. preload

이송자벌레와 압전소자의 예압에 의한 영향은 Fig. 10에 함께 나타낸 것과 같이 커브피팅을 수행하여 식 (3)과 같이 표현하였다.

$$W = A + B_1 \times L + B_2 \times L^2 \tag{3}$$

여기서 L은 예압의 크기, A, B_1, B_2은 계수, W는 예압에 의해 이송자벌레 끝단의 변위 변화를 나타내는 함수이다. 이 식 (3)을 앞서 제안한 모델링 식 (1), (2)에 포함시키면 다음과 같다.

$$X_r = (D_r + C_{r1} \times V_{in} + C_{r2} \times V_{in}^2) + W \tag{4}$$

$$X_f = (D_f + C_{f1} \times V_{in} + C_{f2} \times V_{in}^2) + W \tag{5}$$

상기 식으로 표현된 이송자벌레에 장착된 압전구동기에 대한 예압효과가 포함된 변위 히스테리시스 모델의 타당성을 검증하기 위해 1.9 N~5.9 N 사이의 1 N간격의 예압들 하에서 진폭 20 V의 사인파 전압을 압전 소자에 인가하는 실험을 수행하였다. Fig. 10은 3.9 N의 예압 하에서 실제 시스템과 모델의 변위 히스테리시스 곡선을 나타낸 것이다. 3.9 N일 때 9.6 m 변위가 축소되어 시스템 응답이 시작됨을 알 수 있다. 상기의 여러 다른 예압 하에서도 모델의 변위 히스테리시스 곡선은 실제 이송자벌레의 변위특성을 오차범위 0.125 m 이내로 적절하게 추종함을 확인 할 수 있었다.

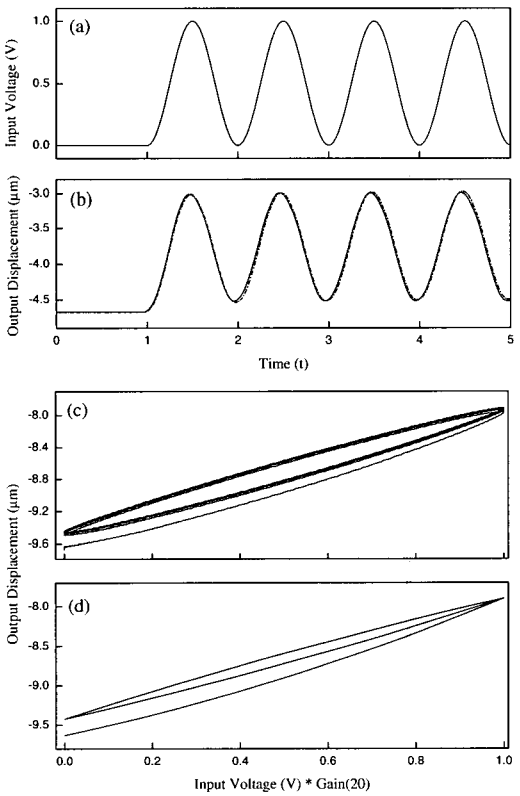

Fig. 10 Simulated and measured data for 3.92N preload: (a) input voltage, (b) measured displacement (dashed) and simulated displace-ment (solid), (c) measured hysteresis loop, (d) simulated hysteresis loop

4. 결 론

압전구동기의 변형특성을 모델링하는 방법을 제안하였고 실험을 통해 제안된 모델의 타당성을 검증하였다. 압전구동기의 히스테리시스 모델과정에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 히스테리시스 거동은 초기상승곡선, 반복하강곡선, 반복상승곡선의 세 가지 다른 형태의 곡선들로 분류되며 압전구동기에 인가된 최대전압 의 변동에 따라 잔류변위의 크기와 히스테리시스 곡선이 달라진다.

(2) 반복변위의 경우 히스테리시스 곡선은 상승과 하강형태로 분리되어 각각을 인가전압에 대한 2차 함수로 표현될 수 있으며 관련 계수들은 최대 인가전압에 따라 변동된다.

(3) 이송자벌레 내에 장착된 압전구동기에 있어 최대출력에 비해 예압이 작은 경우에는 예압이 압전구동기 자체의 변형특성에 미치는 영향은 미미하나 기계구조물의 스프링 특성으로 인하여 예압효과가 모델에 포함되어야 한다. 제안된 모델의 경우 모델오차는 0.125 m 이내이다.

후 기

이 논문은 2004년도 금오공과대학교 학술연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

(1) Slocum, A., 1992, Precision Machine Design, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, pp. 666~674.

(2) 김영식, 이철, 김인수, 2000, "압전작동기/감지

기를 이용한 평판의 혼합형 능동진동제어 기술," 한국소음진동공학회논문집, 제 10 권, 제 6 호, pp. 1048~1058.

(3) 최덕권, 2000, "정밀제어를 위한 자동화요소의 발전 동향," 제어자동화시스템공학회지, 제 6 권, 제 1 호, pp. 33~38.

(4) Higuchi, T., Watanade, M. and Kudoh, K. 1988, "Precise Positioner Utilizing Rapid Deformations of a Piezoelectric Element," J. Japan Society of Precision Engineering, Vol. 54, No. 11, pp. 2107~2112.

(5) Kim, J. H. and Kim J., 2002, "A Hybrid Inchworm Linear Motor," Mechatronics, Vol. 23, Iss. 3, pp. 525~542.

(6) 정회원, 2000, "압전소자 구동기의 이력과 크립현상의 분석 및 응용에 관한 연구", 공학 박사논문, 한국과학기술원 기계공학부.

(7) Kim, S. C. and Kim, S. H., 2001, "A Precision Linear Actuator Using Piezoelectrically Driven Friction Force," Mechatronics, Vol. 11, Iss. 8, pp. 969~985.

(8) Kaizuka, H., and Byron, S., 1988, "A Simple Way to Reduce Hysteresis and Creep When Using Piezoelectric Actuators," Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 27, No. 5, pp. 773~776.

(9) Goldfarb, M. and Celanvovic, N., 1997, "A Lumped Parameter Electromechanical Model for Describing the Nonlinear Behavior of Piezoelectric Actuators," Transactions of the ASME Vol. 119, pp. 478~485.

(10) Ping Ge and Musa Jouaneh, 1995 "Modeling Hysteresis in Piezoceramic Actuators," Precision Engineering, Vol. 17, No. 3, July, 1995, pp. 211~221.

(11) Tzen, J., Jeng, S. and Chieng, W., 2002 "Modeling of Piezoelectric Actuator for Compensation and Contoller Design," Precision Engineering, 5310, pp. 1~17.

(12) Mulling, J., Usher, T. and Dessent, B., 2001, "Load Characterization of High Displacement Piezoelectric Actuators with Various End Conditions," Sensors and Actuators A: Physical, Volume 94, Issues 1-2, pp. 19~24.