

Inverse Generalized Prandtl-Ishlinskii Model를 이용한 압전 스택 액추에이터의 역 히스테리시스 모델링

Inverse Hysteresis Modeling for Piezoelectric Stack Actuators with Inverse Generalized Prandtl-Ishlinskii Model

고영래 · 김태형[†]

Young-Rae Ko and Tae-Hyoung Kim[†]

중앙대학교 기계공학과

School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University

요 약

압전 액추에이터(Piezoelectric actuator)는 빠른 응답 특성, 넓은 대역폭, 우수한 반복 정밀도, 그리고 높은 분해능의 특성으로 인하여 다양한 산업분야에서 폭넓게 사용되고 있다. 하지만, 압전 액추에이터에는 히스테리시스 효과(Hysteresis effect)가 발생하는 단점이 있으며, 이는 시스템의 성능을 저하시키는 주요한 원인으로 알려져 있다. Generalized Prandtl-Ishlinskii(GPI) model을 이용한 기존 연구에서는 히스테리시스 효과를 제거하기 위하여 히스테리시스를 수리적으로 모델링하고, 그 결과로부터 역 히스테리시스를 도출하였다. 하지만 모델링된 변수 값에 따라서는 역 히스테리시스 루프를 형성하지 못하는 치명적 문제점이 발생된다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Inverse Generalized Prandtl-Ishlinskii(IGPI) model을 이용하여 역 히스테리시스를 직접 모델링하는 방법을 제안하였다. 또한 모델링 정밀도는 다양한 입력신호를 이용한 실험 결과를 기반으로 검증하였다.

키워드 : 히스테리시스, Generalized Prandtl-Ishlinskii model, 압전 액추에이터

Abstract

Piezoelectric actuators have been widely used in various applications because they have many advantages such as fast response time, repeatable nanometer motion, and high resolution. However Piezoelectric actuators have the strong hysteresis effect. The hysteresis effect can degrade the performance of the system using piezoelectric actuators. In past study, the parameters of the inverse hysteresis model are computed from the identified parameters using the Generalized Prandtl-Ishlinskii(GPI) model to cancel the hysteresis effect, however according to the identified parameters there exist the cases that can't form the inverse hysteresis loop. Thus in this paper the inverse hysteresis modeling method is proposed using the Inverse Generalized Prandtl-Ishlinskii(IGPI) model to handle that problem. The modeling results are verified by experimental results using various input signals.

Key Words : Hysteresis, Generalized Prandtl-Ishlinskii model, Piezoelectric actuators

1. 서 론

빠른 응답 특성, 우수한 반복 정밀도, 그리고 높은 분해능의 특성을 갖는 압전 액추에이터(Piezoelectric actuator)는 스캐닝 프로브 마이크로 스크وپ(Scanning probe microscopes), 마이크로/나노 매니퓰레이션(Micro/nano manipulations), 그리고 진동 제어 등 마이크로 및 나노 분야에서

폭넓게 사용되고 있다[1-2]. 하지만, 압전 액추에이터에서는 비선형적 히스테리시스(hysteresis) 현상이 발생하는 문제점이 있으며, 이와 같은 히스테리시스는 압전 액추에이터를 사용한 시스템의 성능을 저하시키는 주요 원인으로 지적되고 있다[3]. 이러한 배경에서 많은 연구자들이 히스테리시스를 수리적으로 모델링하고[12], 이를 이용하여 시스템의 제어 성능을 향상시키기 위한 다양한 연구를 수행하고 있다[3-5].

히스테리시스 효과를 제거하기 위한 방법 중 하나는 히스테리시스에 대한 수학적인 모델을 이용하여 히스테리시스의 동적 거동을 예측하고, 이의 역 히스테리시스 모델을 도출하여 개루프 피드포워드 보상기를 구성하는 것이다. 히스테리시스를 모델링하기 위한 수학적인 모델로서는 Bouc-Wen model, Dahl model, Preisach model, 그리고 Prandtl-Ishlinskii model 등 다양한 기법들이 제안되었다[6]. 그 중 Preisach model은 가장 널리 사용되는 수학적

접수일자: 2014년 3월 5일

심사(수정)일자: 2014년 3월 24일

게재확정일자: 2014년 3월 26일

[†] Corresponding author

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

모델이지만, 그 구조상 많은 설계변수들이 요구되는 단점을 가지고 있다[3]. 반면에 Preisach model의 하위 클래스인 Classical Prandtl-Ishlinskii(CPI) model은 그 구조가 단순하고 Preisach model보다 더 적은 설계변수들을 사용하는 장점을 가지고 있다[3]. CPI model은 임계 값과 가중치를 이용하여 기본 연산자(play operator)들이 선형적으로 가중 중첩된 히스테리시스 모델이다. 하지만, CPI model에 사용된 기본 연산자의 입력-출력 관계는 대칭의 형태를 가지기 때문에 압전 액추에이터에서 나타나는 비대칭 형태의 히스테리시스 루프(hysteresis loop)를 정밀하게 모델링 할 수 없는 치명적 단점을 가지고 있다[3-5]. 그림 1은 압전 액추에이터의 비대칭 히스테리시스 루프의 예를 보여준다.

상기 CPI model의 단점을 해결하기 위하여 다양한 Generalized Prandtl-Ishlinskii(GPI) model 및 Modified Prandtl-Ishlinskii(MPI) model이 제안 되었다[3-4]. M. Al Janaideh가 제안한 GPI model은 envelope functions로서 hyperbolic tangent function을 이용하여 일반적인 기본 연산자(generalized play operator)를 구성하도록 하였으며, 이와 같은 GPI model은 대칭 또는 비대칭 형태의 히스테리시스 루프를 모델링할 수 있다. 또한 구축된 히스테리시스 모델을 이용하여 역 히스테리시스 모델을 계산하고 개루프 피드포워드 보상을 이용하여 히스테리시스를 제거할 수 있음을 보였다[7]. 하지만, 이러한 경우에 모델링된 변수 값들에 따라서 역 히스테리시스 루프를 형성하지 못하는 경우도 발생된다. 다시 말하자면 역 히스테리시스 루프가 형성되지 못하므로 개루프 피드포워드 보상을 이용하여 히스테리시스를 제거할 수 없게 되는 문제점이 발생된다. 이에 관한 상세 내용은 4장에서 시뮬레이션 결과를 바탕으로 설명하고자 한다.

본 연구에서는 기존의 GPI model을 이용하여 역 히스테리시스를 계산하는 과정에서 발생한 문제점을 해결하고자 Inverse Generalized Prandtl-Ishlinskii(IGPI) model를 직접 모델링하는 방법을 제안하였다. 이러한 방법의 장점은 히스테리시스를 모델링한 후 역 히스테리시스를 다시 계산해야 하는 불편함을 줄일 수 있고, 또한 모델링된 변수 값들에 따라서 역 히스테리시스를 형성하지 못하는 문제점을 해결할 수 있다. 모델링된 결과는 다양한 실험과 비교분석을 통하여 증명할 수 있었다.

2. Classical Prandtl-Ishlinskii model

CPI model은 히스테리시스의 입력-출력 관계를 표현하기 위하여 기본 연산자(play operator)와 가중치를 사용한다. 기본 연산자는 임계 값 r 과 입력 $v(t) \in C_m[0, t_E]$ 에 의해서 식(1)과 같이 정의된다[9]. 여기서, C_m 은 연속이며 구간 단조함수(continuous and piecewise monotone functions)의 영역을 나타낸다. 또한 기본 연산자는 $0 = t_0 < t_1 < \dots < t_N = t_E$ 구간에서 표현된다.

$$\begin{aligned} w(0) &= F_r[v](0) = f_r(v(0), 0) \\ w(t) &= F_r[v](t) = f_r(v(t), w(t_i)); \\ t_i &< t \leq t_{i+1}, 0 \leq i \leq N-1 \\ f_r(v, w) &= \max(v-r, \min(v+r, w)) \end{aligned} \tag{1}$$

여기서, $F_r[v](t)$ 는 기본 연산자의 출력을 나타낸다. 식 (2)는 기본 연산자를 이용한 CPI model을 나타낸다[9].

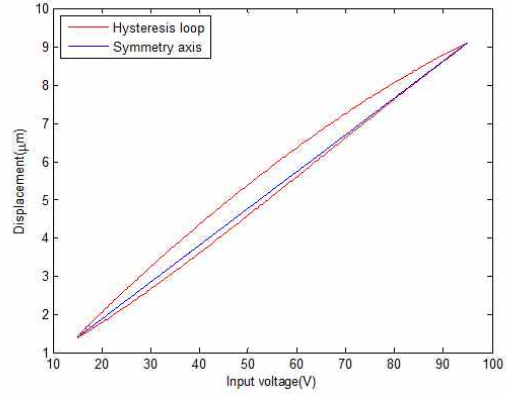


그림 1. 압전 스택 액추에이터의 비대칭 히스테리시스 루프

Fig. 1. Asymmetric hysteresis loops of a piezoelectric stack actuator

$$y_{classical}(t) = \int_0^R p(r) F_r[v](t) dt \tag{2}$$

또한 CPI model은 식 (3)과 같이 표현될 수 있다.

$$y_{classical}(t) = \sum_{j=0}^n p(r_j) F_{r_j}[v](t) \tag{3}$$

여기서, n 는 기본 연산자의 개수 그리고 $p(r_j)$, ($j=0,1,\dots,n$)는 가중치를 나타낸다. 가중치는 기본 연산자에 의해 표현된 히스테리시스 루프의 기울기를 변화시킬 수 있다. 또한 r_j , ($0 = r_0 < r_1 < \dots < r_n = R$)는 임계 값을 나타낸다.

3. Generalized Prandtl-Ishlinskii model

CPI model은 비대칭 형태의 히스테리시스 루프를 표현할 수 없기 때문에 GPI model이 제안되었다. GPI model이 CPI model과의 차이점은 envelope function들에 의해서 기본 연산자가 정의 된다는 것이다. Envelope functions은 두 종류의 함수들로 정의되며 하나는 입력이 감소할 때의 함수이고 다른 하나는 입력이 증가할 때의 함수이다. 식 (4)는 GPI model의 일반적인 기본 연산자를 나타낸다[9].

$$\begin{aligned} w(0) &= F_r^\gamma[v](0) = f_r^\gamma(v(0), 0) \\ w(t) &= F_r^\gamma[v](t) = f_r^\gamma(v(t), w(t_i)); \\ t_i &< t \leq t_{i+1}, 0 \leq i \leq N-1 \\ f_r^\gamma(v, w) &= \max(\gamma_l(v) - r, \min(\gamma_r(v) + r, w)) \\ \gamma_l(v) &= a_1 \tanh(a_2 v + a_3) + a_4 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\gamma_r(v) = b_1 \tanh(b_2 v + b_3) + b_4$$

여기서, 식 (5)는 액추에이터의 특성에 따라서 결정되는 envelope functions이고 $a_1 > 0, a_2 > 0, a_3, a_4, b_1 > 0, b_2 > 0, b_3$, 그리고 b_4 는 실험 데이터를 바탕으로 식별해야 할 상수이다.

아래의 식 (6)는 일반적인 기본 연산자를 이용한 GPI model을 나타낸다[9].

$$y_{generalized}(t) = \int_0^R p(r) F_r^\gamma[v](t) dt \quad (6)$$

또한 GPI model은 식 (7) 같이 표현될 수 있다.

$$y_{generalized}(t) = \sum_{j=0}^n p(r_j) F_{r_j}^\gamma[v](t) \quad (7)$$

여기서, n 는 일반적인 기본 연산자의 개수 그리고 $p(r_j); (j=0,1,\dots,n)$ 는 가중치를 나타낸다. 또한 $r_j; (0=r_0 < r_1 < \dots < r_n=R)$ 는 임계값을 나타낸다. $\gamma_l(v) = \gamma_r(v) = v$ 와 같이 동일한 envelope functions을 사용할 경우 GPI model은 CPI model로 표현될 수 있다.

4. Inverse Generalized Prandtl-Ishlinskii model 및 역 히스테리시스 모델링

4.1 Inverse Generalized Prandtl-Ishlinskii model

히스테리시스를 제거하기 위한 방법은 히스테리시스 모델 H 와 역 히스테리시스 모델 H^{-1} 의해서 제거할 수 있다. 식 (8)은 역 히스테리시스 모델 H^{-1} 을 이용하여 히스테리시스를 제거하기 위한 식을 나타낸다[9].

$$y = H(v) = H[H^{-1}(u)], \quad H[H^{-1}(\cdot)] = I \quad (8)$$

$$\Rightarrow y = u$$

여기서, y 는 GPI model의 출력, u 와 v 는 IGPI model의 입력과 출력을 나타낸다.

식 (9)는 역 히스테리시스를 표현하기 위한 IGPI model을 나타낸다[9-10].

$$y_{inverse}(t) = \begin{cases} \gamma_l^{-1}(\sum_{j=0}^n \hat{p}_j F_{r_j}^\gamma[v](t)), & \dot{v} \geq 0 \\ \gamma_r^{-1}(\sum_{j=0}^n \hat{p}_j F_{r_j}^\gamma[v](t)), & \dot{v} \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

여기서, IGPI model의 변수인 \hat{p}_j 와 \hat{r}_j 는 식 (10)-(12)로부터 계산할 수 있다[9-10].

$$\hat{p}_0 = \frac{1}{p_0} \quad (10)$$

$$\hat{p}_j = \frac{p_j}{(p_0 + \sum_{i=1}^j p_i)(p_0 + \sum_{i=1}^{j-1} p_i)}, \quad (j=1,2,\dots,n) \quad (11)$$

$$\hat{r}_j = p_0 r_j + \sum_{i=1}^{j-1} p_i (r_j - r_i), \quad (j=0,1,\dots,n) \quad (12)$$

4.2 시뮬레이션

본 논문에서는 기존의 역 히스테리시스를 계산하는 과정에서 발생한 문제점을 시뮬레이션 예제를 이용하여 설명하고자 한다. 시뮬레이션에 사용한 입력은 $v(t) = 4\sin(2\pi t) + 3\cos(2\pi 0.9t)$, $t \in [0, 20]$ 이고, envelope functions, 임계값 그리고 가중치는 식 (13)-(15)와 같다.

$$\gamma_l(v) = v + 0.2 \quad (13)$$

$$\gamma_r(v) = 1.1v + 1.2$$

$$r_j = 0.22j, \quad (j=0,1,\dots,30) \quad (14)$$

$$p(r_j) = 0.1e^{-0.1r_j}, \quad (j=0,1,\dots,30) \quad (15)$$

그림 2와 그림 3은 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림 2로부터 알 수 있듯이 정확한 역 히스테리시스 루프가 형성되면 히스테리시스를 완전히 제거할 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 반면에 그림 3은 $\gamma_l(v) = 0.8v + 0.2$ 를 이용한 시뮬레이션 결과로서 히스테리시스 루프는 형성되지만, 역 히스테리시스 루프가 형성되지 않으므로 히스테리시스가 완전히 제거되지 않은 것을 확인할 수 있다. 다시 말하자면 GPI model을 이용하여 히스테리시스를 모델링하는 것은 가능하지만, 역 히스테리시스 루프를 표현하지 못하는 변수 값들이 존재한다는 것이다. 이러한 이유는 모델링된 변수 값에 따라서 두 개의 envelope functions 사이에 역 히스테리시스 루프를 형성하지 못하는 구간이 존재하기 때문이다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하고자 역 히스테리시스를 직접 모델링하는 방법을 제안하였다.

4.3 역 히스테리시스 모델링

역 히스테리시스를 모델링하는 방법은 식 (9)로부터 $\gamma_l^{-1}(y)$, $\gamma_r^{-1}(y)$, \hat{p}_j 그리고 \hat{r}_j 를 직접 모델링을 하는 것이다. 식 (17)-(19)는 $\gamma_l^{-1}(y)$, $\gamma_r^{-1}(y)$, \hat{p}_j 그리고 \hat{r}_j 를 나타낸다.

$$y(t) = \sum_{j=0}^n \hat{p}_j F_{r_j}^\gamma[v](t) \quad (16)$$

$$\gamma_l^{-1}(y) = \frac{1}{a_2} \tanh^{-1}\left(\frac{y - a_4}{a_1}\right) - \frac{a_3}{a_2} \quad (17)$$

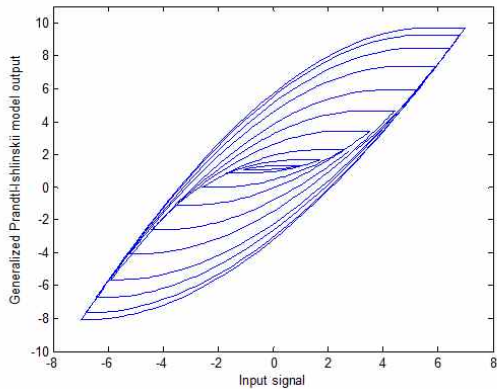
$$\gamma_r^{-1}(y) = \frac{1}{b_2} \tanh^{-1}\left(\frac{y - b_4}{b_1}\right) - \frac{b_3}{b_2}$$

$$\hat{p}_j, \quad (j=0,1,\dots,n) \quad (18)$$

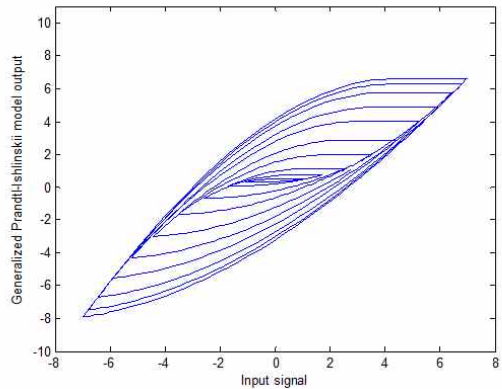
$$\hat{r}_j = c_1 j, \quad (j=0,1,\dots,n) \quad (19)$$

본 연구에서는 $n = 10$ 으로 하였고 모델링 하기 위한 변수는 식 (20)와 같다.

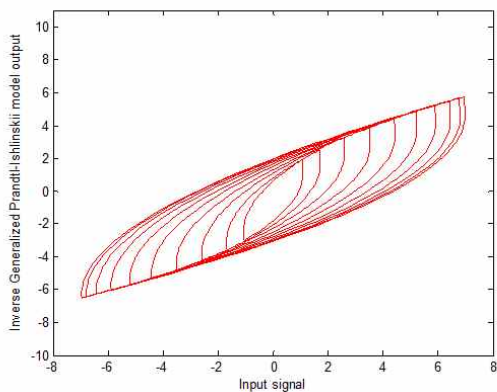
$$X = [a_1, a_2, a_3, a_4, b_1, b_2, b_3, b_4, \hat{p}_0, \hat{p}_1, \dots, \hat{p}_{10}, c_1] \quad (20)$$



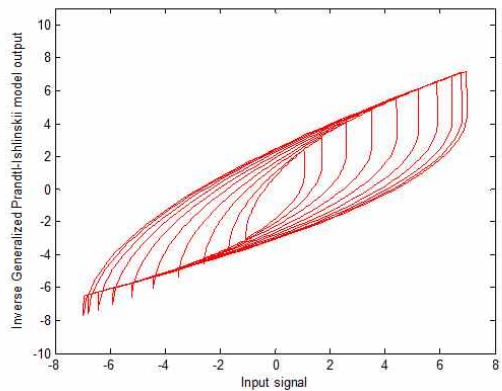
(a) Hysteresis loop using GPI model



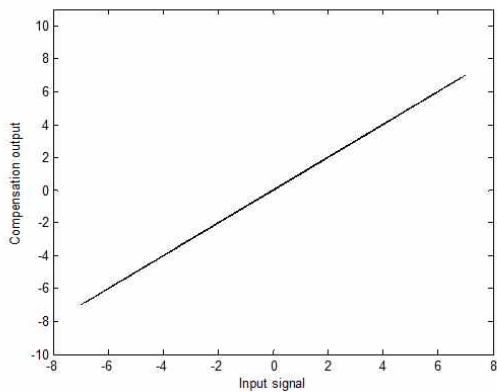
(a) Hysteresis loop using GPI model



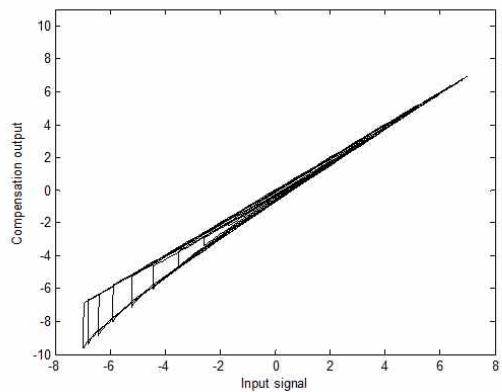
(b) Inverse hysteresis loop using IGPI model



(b) Inverse hysteresis loop using IGPI model



(c) Compensation



(c) Compensation

그림 2. 비대칭 히스테리시스의 보상

Fig. 2. Compensation of asymmetric hysteresis, $\gamma_l(v) = v + 0.2$ and $\gamma_r(v) = 1.1v + 1.2$

그림 3. 비대칭 히스테리시스의 보상

Fig. 3. Compensation of asymmetric hysteresis, $\gamma_l(v) = 0.8v + 0.2$ and $\gamma_r(v) = 1.1v + 1.2$

변수 20개를 시행착오법을 이용하여 찾는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 본 논문에서는 위의 문제를 해결하고자 최적화 기법(optimization technique)을 사용하였고, 최적화에서 목적함수는 모델링 결과에 큰 영향을 미치기 때문에 목적함수의 선택은 중요한 부분이다. 본 연구에서는 다음과 같은 가상 목적함수(Virtual objective function)[8,11]를 사용하였다.

$$\min_{X \in R^m} \mathcal{J}(X) := \begin{cases} h_{\max}(X), & \text{if } h_{\max}(X) \geq 0 \\ f_v(X), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (21)$$

여기서, 가상 목적함수 $f_v(X)$ 는 식(22)와 같이 정의된다.

$$f_v(X) := \arctan(f(X)) - \frac{\pi}{2} \quad (22)$$

$$f(X) := \sum_{i=1}^l |y_i - y_{inverse,i}| \quad (23)$$

한편, y_i 는 압전 스택 액추에이터로부터 측정된 변위이고, $y_{inverse,i}$ 는 IGPI model의 출력인 추정된 변위이다. 또한, h_{max} 는 식 (24)와 같이 정의된다.

$$h_{max}(X) := \max[h_1(X), h_2(X), \dots, h_m(X)] \quad (24)$$

최적화 알고리즘은 Diversity-enhanced PSO[8] 알고리즘을 이용하여 모델링을 하였다.

모델링을 위한 데이터를 수집하기 위하여 사인과 코사인 조합으로 이루어진 입력신호를 바탕으로 압전 스택 액추에이터의 응답을 고분해능 스트레인 게이지 위치센서를 이용하여 측정하였다. IGPI model을 직접 모델링하기 위하여 사인과 코사인 조합으로 이루어진 입력신호를 압전 스택 액추에이터의 출력인 변위로, 그리고 실제 측정된 변위는 입력신호로 하였다. 표 1은 모델링된 변수의 값을 나타낸다.

표 1. 모델링된 변수들
Table 1. The modeled parameters

Parameter	Value	Parameter	Value
a_1	3.39301926	\hat{p}_2	-0.02932805
a_2	0.29916144	\hat{p}_3	-0.06142298
a_3	0.41562711	\hat{p}_4	-0.00277877
a_4	-1.34616200	\hat{p}_5	-0.03691226
b_1	2.27343819	\hat{p}_6	-0.03871548
b_2	0.38445841	\hat{p}_7	-0.01553319
b_3	0.20834876	\hat{p}_8	-0.02361621
b_4	-0.47030296	\hat{p}_9	0.05000037
\hat{p}_0	1.02724618	\hat{p}_{10}	-0.08795596
\hat{p}_1	-0.14885884	c_1	0.02405750

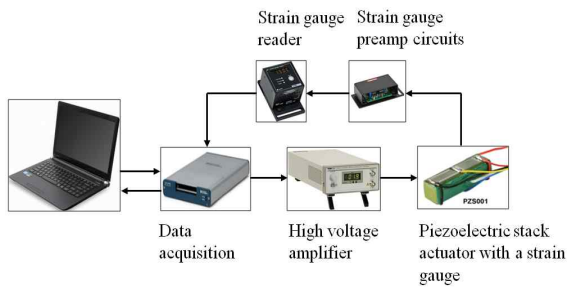


그림 4. 실험 장치
Fig. 4. Experiment setup

5. 모델링 결과 및 검증

그림 4의 실험 장치는 압전 스택 액추에이터 (Piezoelectric stack actuator), 고분해능 스트레인 게이지

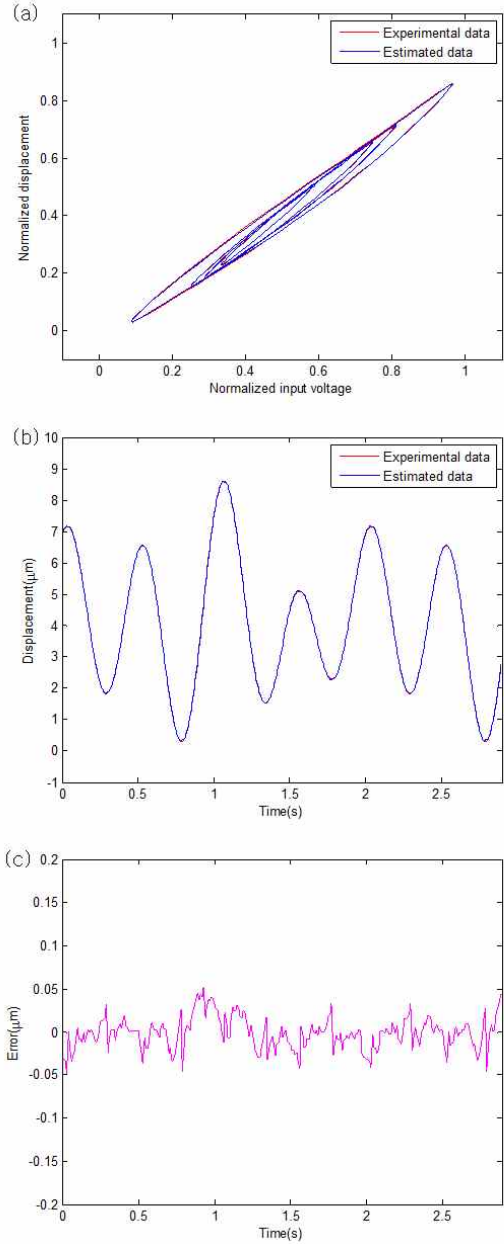


그림 5. IGPI model을 이용한 모델링 결과
Fig. 5. Modeling result using the IGPI model

위치 센서(High resolution strain gauge position sensor), 고전압 증폭기, 그리고 데이터 수집장치로 구성되었다. 압전 스택 액추에이터는 Thorlabs사의 PZS001 모델로 0V~100V의 입력 전압에 대하여 최대 변위 10 μ m를 갖는다.

그림 5은 IGPI model을 이용하여 모델링한 결과이다. 모델링 결과를 검증하기 위하여 모델링할 때 사용한 사인과 코사인 조합의 입력신호와는 크기와 주파수가 다른 입력신호를 이용하여 압전 스택 액추에이터의 응답을 측정하였다. 측정된 결과로부터 입력신호는 압전 스택 액추에이터의 출력으로 그리고 실제 측정된 변위는 입력으로 해서 모델링 결과를 검증하였다. 그림 6

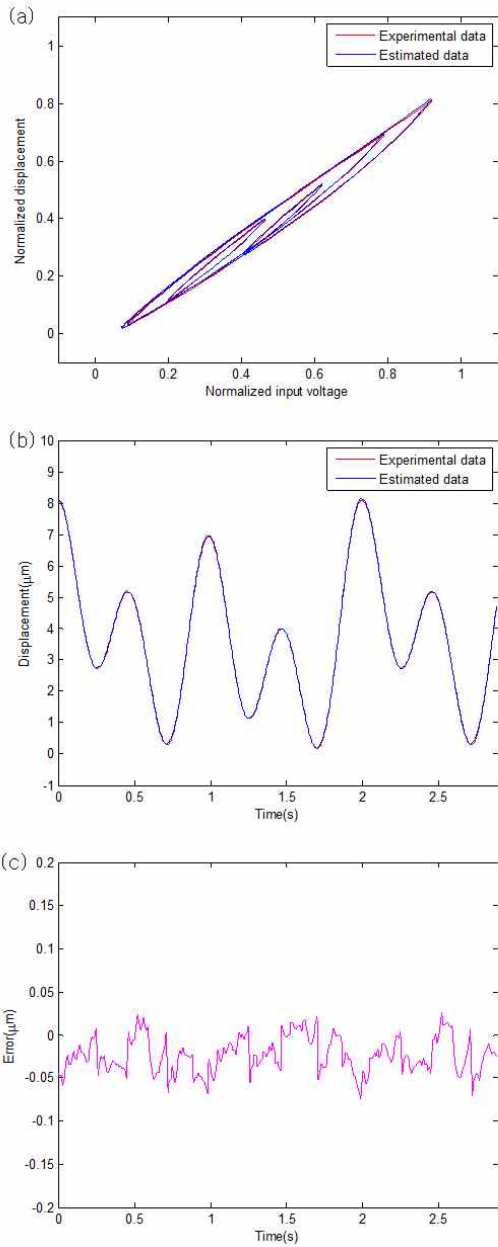


그림 6. 복잡한 신호를 이용한 모델링 검증
 Fig. 6. Modeling verification using a complex signal

은 복잡한 신호를 이용한 모델링검증 결과를 나타내고, 그림 7과 그림 8은 5Hz와 10Hz 사인 신호를 이용하여 모델링을 검증한 결과를 보여준다. 또 한 그림 5의 모델링 오차는 0.6302%이고, 그림 6의 모델링 검증결과의 오차는 0.9443%로서 오차의 차이가 크지 않다는 것을 알 수 있다. 오차는 전체 변위에 대한 백분율로 계산하였다. 따라서 본 논문에서 제안한 역 히스테리시스 모델링이 가능함을 증명할 수 있다. 또한 그림 7과 그림 8로부터 입력 주파수가 증가할수록 오차가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 이유는 GPI model로 표현된 히스테리시스 루프가 입력 주파수에 의존해서 변화하지 않기 때문이다[5].

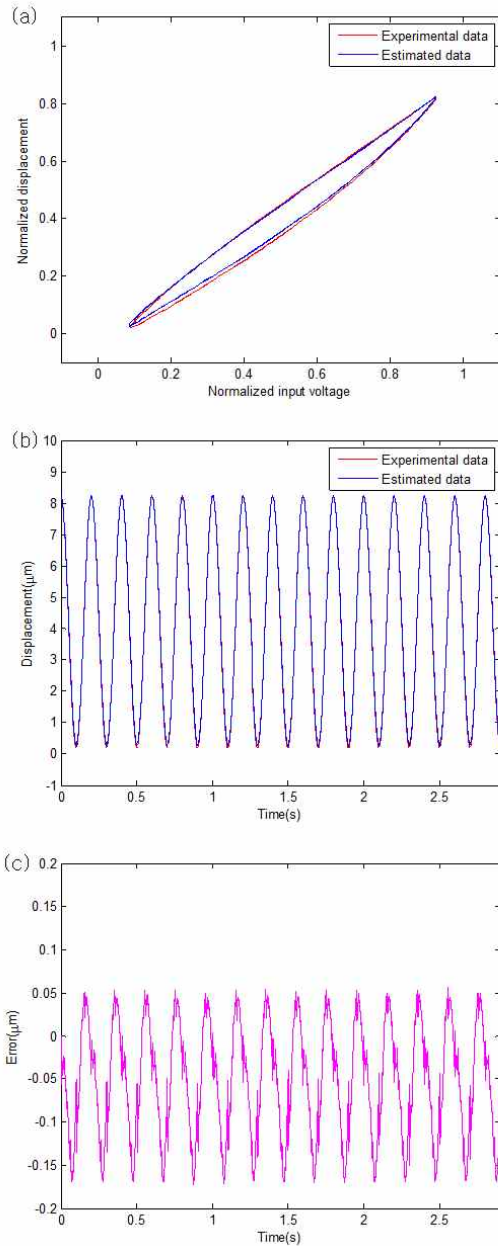


그림 7. 5Hz 사인 신호를 이용한 모델링 검증
 Fig. 7. Modeling verification using a sinusoidal signal, 5Hz

6. 결론 및 향후 연구

GPI model을 이용한 기존 연구에서는 히스테리시스 효과를 제거하기 위하여 히스테리시스를 모델링하고 그 결과로부터 역 히스테리시스 모델을 계산하여 제거할 수 있었다. 하지만, 모델링된 변수 값에 따라서 역 히스테리시스 루프를 형성하지 못하는 경우가 발생하였고, 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결 하고자 IGPI model을 이용하여 역 히스테리시스를 직접 모델링하는 방법을 제안하였다. 모델링된 결과는 다양한 신호를 사용하여 검증하였고, 검증결과

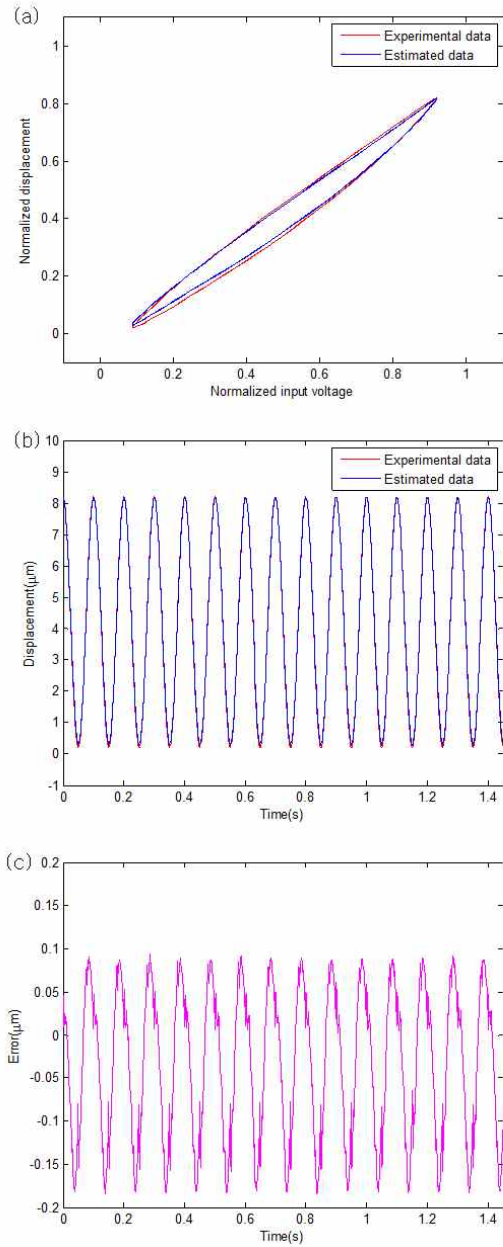


그림 8. 10Hz 사인 신호를 이용한 모델링 검증
 Fig. 8. Modeling verification using a sinusoidal signal, 10Hz

의 오차를 모델링 오차와 비교하여 본 논문에서 제안한 역 히스테리시스 모델링 방법이 가능함을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 저주파수 대역에서 모델링을 하였지만 향후 연구에서는 고주파수 대역에서 모델링을 하고, 또한 피드백 제어를 이용하여 좀 더 좋은 성능을 내고자 한다.

References

[1] S. Devasia, E. Eleftheriou, and S. O. R. Moheimani,

"A survey of control issues in nanopositioning," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 15, No. 5, pp. 802-823, 2007.

[2] G.-Y. Gu, L.-M. Zhu, C.-Y. Su, and H. Ding, "Motion control of piezoelectric positioning stages: modeling, controller design and experimental evaluation," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2012.

[3] Y. Chen, J. Qiu, J. Palacios, and E. C. Smith, "Tracking control of piezoelectric stack actuator using modified Prandtl-Ishlinskii model," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 24, No. 6, pp. 753-760, 2013.

[4] M. Al Janaideh, S. Rakheja, and C.-Y. Su, "A generalized Prandtl-Ishlinskii model for characterizing the hysteresis and saturation nonlinearities of smart actuators," *Smart Materials and Structures*, Vol. 18, no. 4, 2009.

[5] M.-J. Yang, G.-Y. Gu, and L.-M. Zhu, "Parameter identification of the generalized Prandtl-Ishlinskii model for piezoelectric actuators using modified particle swarm optimization," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 189, pp. 254-265, 2013.

[6] Q. Xu and Y. Li, "Dahl model-based hysteresis compensation and precise positioning control of an XY parallel micromanipulator with piezoelectric actuation," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 132 (4), Vol. 132, 2010.

[7] M. Al Janaideh, S. Rakheja, and C.-Y. Su, "An analytical generalized Prandtl-Ishlinskii model inversion for hysteresis compensation in micropositioning control," *IEEE/ASME Trans Mech*, 2011.

[8] H. W. Beak, T.-H. Kim, J. N. Ryu, J. I. Oh, "Diversity-enhanced particle swarm optimizer and its application to optimal flow control of sewer networks," *Science and Information Conference*, 2013.

[9] H. Sayyaadi and M. R. Zakerzadeh, "Position control of shape memory alloy actuator based on the generalized Prandtl-Ishlinskii inverse model," *Mechatronics*, pp. 945-957, 2013.

[10] K. Kuhnen and H. Janocha, "Inverse feedforward controller for complex hysteretic nonlinearities in smart-material systems," *Control Intelligence system*, Vol. 29, pp. 74-83, 2001.

[11] H. W. Beak, T.-H. Kim, J. N. Ryu, J. I. Oh, "Model Predictive Control for Distributed Storage Facilities and Sewer Network Systems via PSO," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, Vol. 22, No. 6, pp. 722-728, 2012.

[12] S.-Y. Lee, M. Park, and J. H. Baek, "Modeling of Dynamic Hysteresis Based on Takagi-Sugeno Fuzzy Duhem Model," *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, Vol. 13, No. 4, pp. 277-283, 2013.

저 자 소 개



고영래(Young-Rae Ko)

2010년 : 중앙대학교 전자전기공학부
공학사

2012년 : 중앙대학교 대학원 기계공학과
공학석사

2012년 ~ 현재 : 중앙대학교 대학원
기계공학과 박사과정

관심분야 : Hysteresis Identification, Smart Actuators,
Adaptive Control, Optimal and Robust
Control, Optimization

Phone : +82-2-820-5748

E-mail : yrko2012@cau.ac.kr



김태형(Tae-Hyoung Kim)

1999년 : 중앙대학교 기계공학부 공학사

2001년 : 중앙대학교 기계공학과 공학석사

2006년 : Kyoto Univ., Ph.D. degree in
Informatics

2008년 ~ 현재 : 중앙대학교 기계공학부
교수

관심분야 : Model Predictive Control, Cooperative
Control, Robot Control, Particle Swarm
Optimization, System Identification

Phone : +82-2-820-5748

E-mail : kimth@cau.ac.kr