

역 히스테리시스 모델에 기초한 압전 구동기의 정밀제어

박성만, 안현식, 김도현, 송중호, 최익, 김광배
 *국민대학교 전자공학부, **한국과학기술연구원 지능제어연구센터

Precision Control of a Piezoelectric Actuator Based on an Inverse Hysteresis Model

Seung-Man Park, Hyun-Sik Ahn, Do-Hyun Kim, Ick Choy, Joong-Ho Song and Kwang-Bae Kim
 *School of Electrical Engineering, Kookmin University, **Intelligent System Control Research Center.

Abstract - In this paper, we proposed an inverse hysteresis model to cancel the nonlinear hysteresis phenomenon of a piezoelectric actuator and design a feedback control system based on the inverse hysteresis model.

The piezoelectric actuator performs much better in open-loop response. However, the nonlinear hysteresis phenomenon should be linearized and the closed-loop control should be executed to get the required performance in the area, where high-speed and high-accuracy are required.

Thus, it is shown by simulation that a good position tracking performance can be obtained for the repetitive desired position trajectory.

1. 서 론

최근 들어 하드 디스크 드라이브의 대용량화와 고정밀화가 진행됨에 따라 헤드 위치 결정 기술에 있어서 위치 정밀도 1μm 이하를 요구하고 있으며[1], 반도체 제조 공정인 칩 마운트(Chip Mount), 와이어 본더(Wire Bonder), 특히 스텝퍼(Stepper)등에 있어서 256M DRAM의 경우 0.13μm 이하의 위치 정밀도를 요구하고 있다. 이러한 정밀도가 구현 가능한 위치 결정용 구동기로는 정전 마이크로 구동기(electrostatic micro actuator), 압전 구동기(piezoelectric actuator), 전자장 마이크로 구동기(electromagnetic micro actuator)등이 연구, 개발되고 있다. 이 중에서 압전 구동기는 80년대 후반부터 연구되기 시작하였고, 새로운 메커니즘의 발달로 그 응용 분야가 점차 확산되고 있다.

압전 구동기는 강성과 응답 특성, 사용의 편의성 등으로 매우 우수한 구동기로 각광을 받고 있다. 특히, 응답 속도에서는 정전 구동기에 비하여 약 10배 정도 빠른 0.1msec이하의 응답속도를 지니고 있다. 그러나 정밀 위치 제어에 있어서 히스테리시스 현상에 따른 비선형성은 페루프 제어에 있어서 어려움으로 지적되고 있다.

본 논문에서는 압전 구동기의 비선형 특성인 히스테리시스를 보상할 수 있는 역 히스테리시스 모델을 제안하고 이에 기초하여 주기적인 궤적에 대한 페루프 제어 시스템의 성능을 모의실험을 통하여 보이고자 한다.

2. 압전 구동기의 모델링

선형 압전 이론으로부터 유도된 압전 구동기는 그림 1에 나타난 것과 같이 질량-스프링-댐퍼를 사용한 2차 시스템의 등가 모델을 제시할 수 있다. 여기서 M_s 는 등가 질량, D_e 는 등가 댐핑계수, K_e 는 등가 탄성계수를 나타낸다. U 는 출력 변위를 나타내며 F_I 은 외력을 나타낸다.

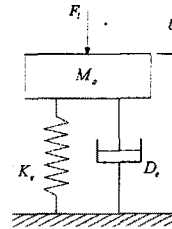


그림 1. 압전 구동기의 등가 기계적 모델.

일반적으로 전압 구동되고 있는 압전 구동기 시스템은 입력 전압 V_E 에 대한 출력 변위 U 의 거동으로 나타내며 식 (1)과 같이 표현하는 것이 더욱 일반적인 표현이다[2].

$$U = \frac{K_p}{M_e s^2 + D_e s + K_e} V_E \quad (1)$$

식 (1)에서는 압전 구동기의 비선형성을 고려하지 않은 선형 모델링을 보이고 있다. 선형 압전 이론에서는 K_p 를 상수로 취급하였으나 K_p 가 히스테리시스를 나타내는 비선형 요소임을 알 수 있으며 비선형 변수 $K_p(V_E)$ 로 표현되고 있음을 알 수 있다. 이것은 입력 전압이 증감될 경우의 정상 상태 출력 변위가 히스테리시스의 영향으로 선형을 유지하지 않음을 알 수 있으며 이러한 특성을 수식으로 표현하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 각 계수들은 고차 다항식으로 곡선 근사화에 의한 방법으로 구할 수 있다[3].

$$X_{ss} = \begin{cases} \text{If } \text{sign}(\dot{V}_a) > 0, \\ \sum_{k=0}^N \alpha_k V_a^k + (X_R - H_f(V_R)) \sum_{k=0}^M \gamma_k \left(\frac{V_a - V_R}{V_{\max} - V_R} \right)^k \\ \text{If } \text{sign}(\dot{V}_a) < 0, \\ \sum_{k=0}^N \beta_k V_a^k - (H_f(V_R) - X_R) \sum_{k=0}^M \nu_k \left(\frac{V_R - V_a}{V_{\max}} \right)^k \end{cases} \quad (2)$$

그림 2에는 0~100[V]의 입력 전압에 대하여 출력 변위 0~100[μm]에 대한 압전 구동기의 히스테리시스 특성 곡선을 보이고 있다.

식 (2)로부터 압전 구동기의 히스테리시스는 출력 변위가 입력 전압에만 의존하는 것이 아니라 이전의 출력 변위가 다음의 출력 변위에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 따라서 이러한 관계를 고려하여 그림 3과 같이 선형부와 비선형부로 나누어 모델링 할 수 있다[3].

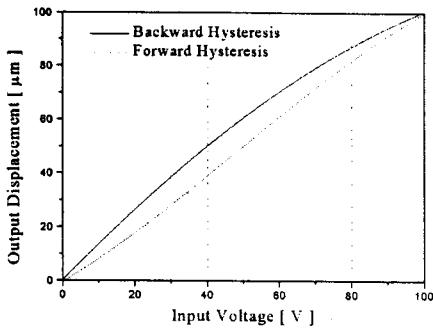


그림 2. 압전 구동기의 히스테리시스 특성 곡선.

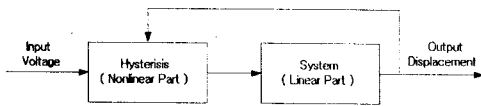


그림 3. 압전 구동기의 모델링.

3. 역 히스테리시스 모델

궤환 선형화 이론에 의하면 추종 제어에 있어서 시스템 출력과 제어 입력 사이의 관계가 주어진다면 추종 제어의 설계가 간단해진다. 시스템의 입력과 출력이 다음과 같은 관계를 가지고 있다고 가정하자.

$$y = h(u) \quad (3)$$

위에서 입력과 출력사이에 비선형성을 나타내는 성분을 $f(t)$ 라 할 수 있으며 제어 입력을 식 (4)와 같이 선택하면 비선형 성분을 제거할 수 있다.

$$u = h^{-1}(y) \quad (4)$$

위의 논리에 기초하여 압전 구동기의 제어 입력을 결정하면 다음과 같다. 그림 2에 나타낸 바와 같이 일정한 패턴의 입력 전압에 대해서는 일정한 모양의 히스테리시스 특성을 나타냄을 알 수 있다. 또한, 초기에 입력을 증가시킬 때에는 변위가 더 작아지고 입력을 감소시키기 시작할 때에는 변위가 더 크게 출력됨을 알 수 있다. 따라서, 각 입력에 대하여 입력 전압이 증가 시에는 일정한 출력 특성을 얻기 위하여 작아지는 출력에 대응하는 제어 입력을 더 인가하고 감소 시에는 더 큰 출력에 대응되는 만큼의 제어 입력을 감소시켜주어 직선으로 근사화시킬 수 있다. 이러한 이론을 그림 4에 나타낸 함수에서 설명하기로 한다.

먼저 선형화 대상의 직선을 결정한다. 즉 초기 변위와 최대 입력에 대한 최대 변위 사이의 직선을 생각한다. 역 모델 함수를 $g(x)$ 라고 하면 두 점 x_1, x_2 에 대하여 다음 식이 성립함을 알 수 있다.

$x = x_1$ 에 대하여

$$g(x_1) = mx_1 + \Delta x_1$$

$$\Delta x_1 = mx_1 - f(x_1)$$

즉,

$$g(x_1) = 2mx_1 - f(x_1)$$

$x = x_2$ 에 대하여

$$g(x_2) = mx_2 - \Delta x_2$$

$$\Delta x_2 = f(x_2) - mx_2$$

즉,

$$g(x_2) = 2mx_2 - f(x_2)$$

따라서 모든 점 x 에 대하여 다음 등식과 같이 역 히스테리시스 모델을 제안 할 수 있다.

$$g(x) = 2mx - f(x) \quad (5)$$

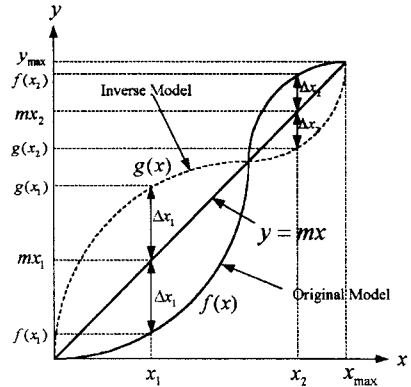


그림 4. 역 모델의 구성 방법.

식 (5)에서 제안한 모델에 대해 그림 2에 대한 역 히스테리시스 모델을 그림 5와 같이 구현할 수 있다.

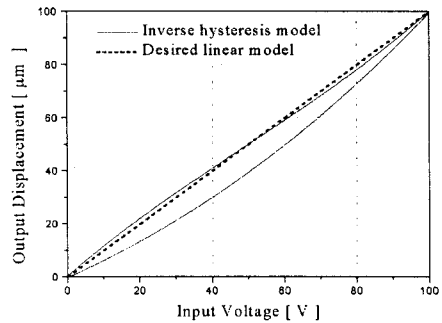


그림 5. 그림 2에 대한 역 히스테리시스 모델.

4. 모의 실험 결과

모의 실험에 사용한 압전 구동기의 사양은 Physik Instrumente 사의 P731.10을 모델로 하여 0~100[V]의 입력 전압에 대하여 0~100[μm]의 변위를 갖는 것으로 하였다. 이 압전 구동기의 시스템 파라미터를 표 1에 보이고 있다[4].

표 1. 시스템 매개변수

파라미터	값
M_e	1[kg]
D_e	1850.58[N · s/m]
K_e	3000000[N/m]

표 1의 매개 변수를 사용하여 압전 구동기의 선형부의 전달 함수를 구하면 다음과 같다.

$$G_L(s) = \frac{3}{s^2 + 1850.58s + 3000000} \quad (6)$$

비선형부인 히스테리시스는 식 (2)를 이용하여 곡선 근사화에 의하여 3차 다항식으로 구현하였다. 표 2에 계수들을 보인다.

표 2. 곡선 근사화에 의한 3차 다항식의 계수

$H_f(V)$	$\alpha_0: -0.42360595442847 \times 10^{-6}$
	$\alpha_1: 0.81836282527588 \times 10^{-6}$
	$\alpha_2: 0.00577038137499 \times 10^{-6}$
	$\alpha_3: -0.00003911865691 \times 10^{-6}$
$H_r(V)$	$\beta_0: 0.02690637411967 \times 10^{-5}$
	$\beta_1: 0.13888861461553 \times 10^{-5}$
	$\beta_2: -0.00034379586720 \times 10^{-5}$
	$\beta_3: -0.000004196718 \times 10^{-5}$

위의 모델에 대하여 역 히스테리시스 모델의 타당성을 검토하기 위해 입력 전압을 0~100[V] 까지 증감시켰다. 히스테리시스 특성 곡선을 구하면 그림 2에서와는 다르게 그림 6과 같이 선형화된 히스테리시스 특성을 구할 수 있다.

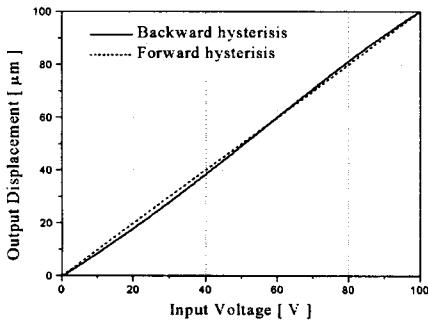


그림 6. 선형화된 히스테리시스 특성 곡선.

기존 위치 제어를 다음과 같이 주었을 때의 위치 제어 성능을 검토한다.

$$y^d(t) = 5 \times 10^{-5} \times (\sin \pi t + 50) \quad (6)$$

위의 제적에 대하여 역 히스테리시스 모델을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우에 대해서 개루프 응답을 비교하여 위치 오차를 그림 7에 나타내었다. 서로의 오차를 비교해보면 역 히스테리시스 모델을 적용했을 때의 결과가 약 4~5 μm 정도의 위치 오차를 개선시킬 수 있음을 알 수 있다.

이제 역 히스테리시스 모델과 PID 제어기를 이용한 페루프 제어 시스템을 구성하면 그림 8과 같다.

그림 9에 페루프 시스템에 대한 응답 특성을 보이고 있다. 페루프 제어를 수행했을 경우에는 개루프 제어에 비하여 위치 제어 오차가 10배 정도 개선됨을 볼 수 있다.

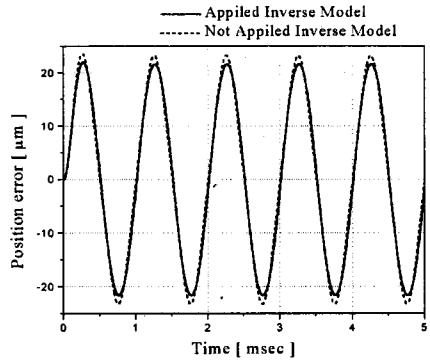


그림 7. 개루프 시스템에 대한 위치오차.

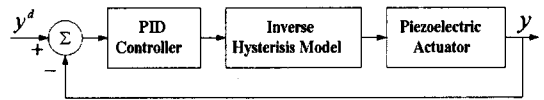


그림 8. 역 히스테리시스 모델을 이용한 페루프 제어 시스템.

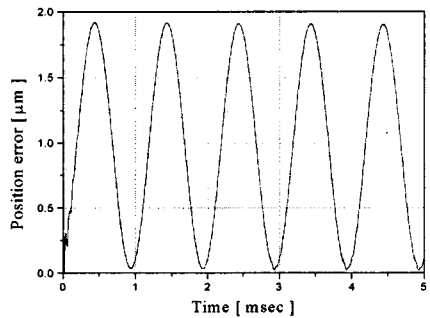


그림 9. 페루프 시스템에 대한 위치오차.

5. 결 론

압전 구동기의 고유 특성인 히스테리시스 특성은 페루프 제어의 어려움으로 지적되고 있다. 본 논문에서는 구동기의 비선형성인 히스테리시스의 선형화 특성을 얻기 위한 역 히스테리시스 모델을 제안하였다. 또한 모의실험을 통해 PID 제어기를 통한 페루프 제어를 수행한 결과 기존의 개루프 제어에서보다 성능이 개선됨을 확인하였다. 앞으로 실제 실험을 통하여 역 히스테리시스 모델과 페루프 제어의 성능이 검증되어야 하겠다.

[참 고 문 헌]

- [1] 이호성, "하드 디스크 Dual Actuator 기술의 동향," 제어·자동화·시스템 공학회지, 6권, 2호, pp. 17-26, 2000.
- [2] 박성만, "압전 구동기의 정밀 위치 제어를 위한 진상-지상 보상기의 설계," 대한전기학회 99년 추계 학술 대회 논문지, B 권, pp. 527-529, 1999
- [3] 정승배, 전압 구동시 압전 구동기의 위치 결정 정도에 대한 비선형 모델링에 관한 연구, 한국 과학 기술원 박사 학위 논문, 1993.
- [4] Physik Instrumente, NanoPositioning Catalog, 1998.