

압전 구동 소자의 동적 성능 향상을 위한 보상기의 설계

문준희*(서울대 마이크로열시스템연구센터), 강성범(서울대 대학원 기계항공공학부), 박희재(서울대 기계항공공학부)

Compensator Design to Improve the Dynamic Performance of Piezoelectric Actuators

J. H. Moon(MTSRC, SNU), S. B. Kang(Graduate School of MAE, SNU), H. J. Pakh(School of MAE, SNU)

ABSTRACT

This paper attempts to compensate the nonlinearity between the input voltage and the output displacement of the piezoelectric stack in dynamic actuation by the following two ways. Firstly, the charge steering by circuit configuration reduces the hysteresis of piezoelectric actuator remarkably. However, it makes the ripple in positioning due to the phase lag and noise induced from the elements of the long closed loop. Secondly, the feedforward control by neural network compensates the hysteresis of the piezoelectric actuators effectively with the appropriate selection of the input variables for the training. The improvement of the dynamic performance of the piezoelectric actuators by the developed linearization technique is verified by experiments.

Key Words : Piezoelectric Actuator(압전 구동 소자), Hysteresis(히스테리시스), Linearization(선형화), Dynamic Performance(동적 성능), Neural Network(신경 회로망)

1. 서론

정밀 산업에서 마이크로 또는 나노 단위의 기계 구동에 있어서 압전 구동기가 차지하고 있는 비중은 독보적이다. 압전 구동기는 제어기와 측정기의 분해능이 허락하는 한도 내에서 무한대의 분해능 향상이 가능하며, 기계 구동에서 필요로 하는 힘과 강성이 충분히 발휘되는 장점을 가지고 있다. 하지만, 압전 구동기에 인가되는 입력 전압과 출력 변위 및 힘 사이의 큰 비선형성이 제어에 걸림돌이 되고 있다. 그 비선형성으로는 크립(creep)과 히스테리시스(hysteresis) 등이 대표적이다. 일반적으로 이와 같은 비선형성은 되먹임 제어(feedback control)를 통해 해결을 하고 있다. 하지만 진동 제어와 같이 신속한 구동이 필요한 경우에는 되먹임 제어는 시간 지연 등의 문제를 안고 있기 때문에 앞먹임 제어(feedforward control) 등으로 동적인 구동에 있어서의 선형성을 보상하는 것이 효과적이다. 본 연구에서는 두 가지 방향으로 압전 구동소자의 동적인 구동에서의 선형성 보장을 도모하고자 한다. 첫째는 압전 소자의 변위가 인가된 전압에 비례하는 것

이 아니라 인가된 전하(charge)에 비례하므로, 전하 구동을 통해 선형화를 도모하는 것이다. 둘째는 압전 구동기의 입력 전압과 출력 변위 사이의 관계를 표현하는 신경회로망을 학습하여 앞먹임 제어를 수행하는 것이다.

2. 전하 구동에 의한 압전 구동 소자의 동적 구동의 선형화

2.1 전기 회로의 구성 및 관계식

전압 구동 회로를 전류 구동 회로로 변환하기 위해서는 다음과 같은 회로가 필요하다.

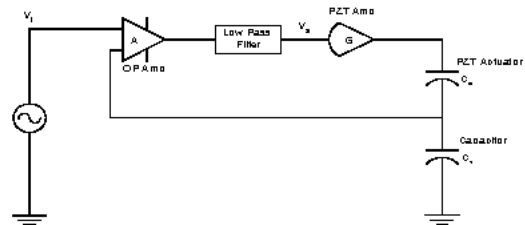


Fig. 1 Hysteresis linearization circuit by charge steering

Fig. 1의 회로는 참고문헌[1]에서 제안된 회로의 개념도를 적용 가능한 형태로 구현한 것으로, OP Amp를 통하여 압전 구동기를 포함하는 폐회로로 구성되어 있다. 이 회로를 표현하는 Block Diagram은 다음과 같다.

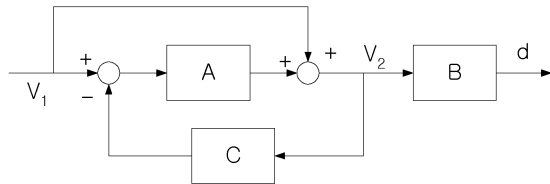


Fig. 2 Block diagram of the hysteresis linearization circuit

여기서, A는 OP Amp의 이득이고, B, C는 다음과 같이 표현된다.

$$B = K_q \frac{G}{\frac{1}{C_p(\cdot)} + \frac{1}{C_t}} \quad (1)$$

$$C = \frac{G}{1 + \frac{C_t}{C_p(\cdot)}} \quad (2)$$

여기서, G는 PZT Amp의 이득이고, K_q 는 압전 구동기에 축적된 전하에 대한 변위의 비이며, C_t 와 $C_p(\cdot)$ 는 각각 탄탈 콘덴서와 압전 구동 소자의 전하 용량이다. 압전 구동 소자의 전하 용량에 팔호와 점을 덧붙인 것은 비선형성을 많이 가지고 있음을 표시한 것이다.

입력 전압 V_1 에서 출력 변위 d 까지의 전달함수를 정리하면 다음과 같다.

$$d = \frac{K_q \cdot \frac{G}{\frac{1}{C_p(\cdot)} + \frac{1}{C_t}} \cdot (A+1)}{1 + \frac{A}{C_t} \cdot \frac{G}{\frac{1}{C_p(\cdot)} + \frac{1}{C_t}}} \quad (3)$$

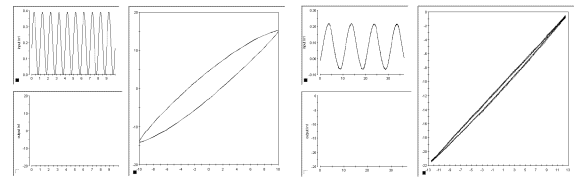
Fig. 1의 회로가 압전 구동 소자의 구동을 선형화할 수 있는 것은, OP Amp의 이론적인 이득이 무한대이기 때문이다. A가 무한대로 접근할 때, 식(3)은 다음과 같이 된다.

$$d = K_q \cdot C_t \quad (4)$$

따라서, 위 회로는 입력된 전압 신호에 비례하게 압전 구동 소자의 변위를 생성한다.

2.2 실험에 의한 압전 구동 소자 선형화 회로의 검증

개발한 회로를 구동 회로로 사용하여 진폭 $10.5\mu\text{m}$, 진동수 1Hz로 압전 구동 소자에 전압을 가했을 때, 입력과 출력 사이의 히스테리시스가 거의 제거되었음을 발견할 수 있으며, Fig. 3에 그 결과를 도시하였다.



(a) Before compensation (b) After compensation

Fig. 3 Effect of the hysteresis linearization circuit

본 선형화 회로는 선형화를 탁월하게 달성하였으나 한가지 치명적인 단점이 발견되었다. 폐회로의 긴 경로와 회로 내부의 여러 전기 소자들로 인해 위상 지연과 노이즈(noise)가 발생하고, 이것이 OP Amp의 큰 이득으로 인해 증폭이 되어, 출력 변위의 흔들림(ripple)을 적지 않게 발생한다는 것이다. 저대역 필터 등을 사용하면 흔들림의 양이 줄어들긴 하지만 제거되지는 않는다.

3. 신경회로망을 이용한 압전 구동 소자의 동적 구동의 선형화

3.1 신경회로망의 학습

신경회로망을 앞먹임 회로에 적용하기 이전에 신경회로망은 학습의 과정을 거쳐야 한다. 학습을 위해 압전 구동 소자의 시간에 따른 입력과 출력 신호 자료들이 사용된다.

신경회로망에서 회로망의 구성이나 학습 알고리즘은 이미 많은 연구가 진행되어 있으므로 기존의 방법을 채용하기로 한다. 그러나, 입력 신호의 선택은 시스템의 특성에 따라 항상 새롭게 고려해야 한다. 입력 신호의 선택은 실제로 신경회로망의 구성이나 학습 알고리즘의 채택보다 더 중요하다. 예를 들어, 시간 지연이 있는 시스템에서 바로 전 단계의 신호를 입력 신호로 사용하지 않으면 시간 지연을 신경회로망으로 구현하는 것은 불가능하다.

입력 전압의 이력(history), 입력 신호의 시간에 따른 변화율 등이 압전체의 히스테리시스 곡선의

모양을 좌우하므로, 이러한 신호를 입력 신호로 채택한다. 본 연구에서는 신경회로망의 입력 신호로, 현재의 입력 전압, 바로 전 단계의 입력 전압, 회기점(turning point)의 입력 전압, 입력 신호들의 시간 간격 등을 채택했다.

신경회로망의 각 층(layer)에서 함수 혹은 절점의 개수는 신경회로망 학습 결과로 얻은 예측값과 실제출력값 사이의 오차의 자승 평균이 갑작스레 커지지 않는 최소한의 수(4×6×1)로 결정을 하였다. 또, 학습 알고리즘은 속도가 가장 빠른 것으로 알려진 Levenberg-Marquardt 방법을 사용하였다. 첫 번째와 두 번째 층은 sigmoid 함수를 사용하였고, 세 번째 층은 선형 1차 함수를 1개만 사용하였다. Fig. 4에서 실제 출력 변위는 열은 실선으로, 신경회로망에 의한 예측 출력은 점선으로 나타내어 두 값을 비교하였다. 중첩이 되어 한 개의 히스테리시스 폐곡선으로 보일 정도로 정확한 위치추적 성능을 보여주고 있다.

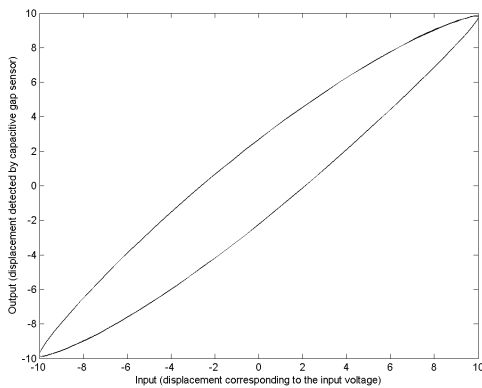


Fig. 4 Tracking performance of the developed neural network

3.2 신경회로망을 통한 압전 구동 소자의 앞먹임 제어

앞먹임 제어의 구조는 Fig. 5와 같다. 진폭 10μm에서 0.1 Hz부터 100 Hz까지 chirp 신호를 주어서 학습을 하고, 학습된 신경회로망으로 앞먹임 제어를 수행하였다.

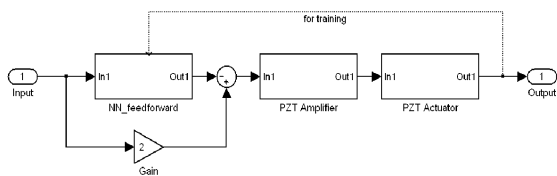


Fig. 5 Block diagram for linearization of the dynamic performance of piezoelectric actuators

학습된 신경회로망으로 보정하여 진폭 10μm에서의 입력 대 출력을 그래프로 나타낸 것이 Fig. 6이다. 신경회로망을 적용하지 않았을 경우인 Fig. 4와 비교하여 볼 때, 입력과 출력 사이의 선형성이 크게 향상되었음을 관찰할 수 있다.

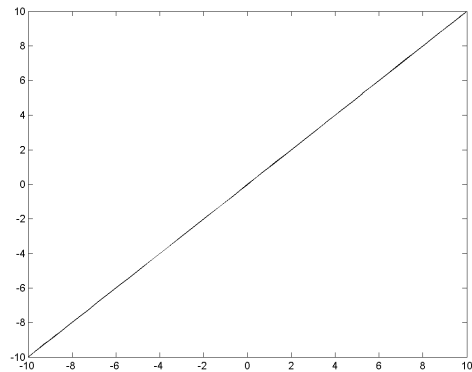


Fig. 6 Hysteresis compensation performance by neural network

4. 결론

본 연구에서 압전 구동 소자의 동적 구동에서의 입력과 출력 사이의 비선형성을 보정하기 위해 두 가지 방법이 시도되었다. 회로 구성을 통해 전압 구동을 전하 구동으로 변환하여 선형화를 시도한 것은 압전 구동 소자의 히스테리시스를 줄이는 데는 큰 효과가 있음이 관찰되었으나, 폐회로의 크기가 크므로 위상 지연과 잡음이 증폭이 되어 압전 소자를 통한 변위의 흔들림이 불가피 하여 실제 시스템에서의 적용이 곤란함을 입증하였다. 또한, 신경회로망을 통한 앞먹임 제어에서는 신경회로망의 학습에 있어서의 입력값을 적절히 선정함으로써, 전환점과 구동 속도에 따라 달라지는 압전구동소자의 히스테리시스 곡선의 보정을 효과적으로 달성하였다.

참고문헌

1. Adriaens, H. J. M. T. A., Koning, W. L., Banning, R., "Modeling Piezoelectric Actuators", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 5, No. 4, pp. 331-341, 2000
2. Kung, Y., Fung, R., "Precision Control of a Piezoceramic Actuator Using Neural Networks", IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society, Vol. 3, pp.1866-1871, Nov. 2002