

압전 구동기의 정밀 위치 제어를 위한 진상-지상 보상기의 설계

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

Design of a Lead-Lag Compensator for Precise Position Control of Piezoelectric Actuators

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

Abstract - 본 논문에서는 압전 구동기의 모델링과 진상-지상 보상기를 이용한 정밀 위치 제어 시스템을 제안한다. 최근 압전 구동기는 고속, 고정밀도가 요구되는 분야에 널리 응용되고 있으나 압전 소자의 히스테리시스 현상으로 인하여 페루프 제어가 어렵다. 압전 구동기는 개루프 제어 특성이 우수하지만 최근의 X-Y 스테이지나 반도체 공정과 같은 높은 정밀도가 요구되는 작업에서 필요한 성능을 얻기 위해서는 페루프 제어가 수행되어야 한다. 따라서 위치 피드백을 이용한 페루프 제어를 위해 선형 압전 이론으로부터 압전 구동기의 모델링을 정립하고 이 모델로부터 진상-지상 보상기를 설계하며 제어기의 성능을 검토하기 위하여 모의 실험 결과를 보인다.

1. 서 론

위치결정 기술은 산업 전반에 포괄적으로 응용되는 기술로 제품의 고 정밀화가 되면서 현재는 위치 정밀도가 서브 마이크로 이하의 정밀도를 필요로 하는 첨단 분야가 늘어가고 있다. 이러한 요구에 적합한 정밀위치 결정용 구동기로는 공압식, 유압식, 전기식 구동기가 있으나 공압식, 유압식 구동기는 특성상 서브 마이크로이하의 정밀도를 얻기가 어렵다. 반면 전기식 구동기는 제어기법을 사용하여 서브 마이크로이하의 정밀도를 얻기가 가능하다. 전기식 구동기로는 정전 마이크로 구동기, 압전 구동기, 전자장 마이크로 구동기가 연구, 개발되고 있다. 이 중에서 압전 구동기는 80년대 후반부터 연구되기 시작하였고, 새로운 메커니즘의 발달로 세계적으로 연구의 대상이 되고 있다. 압전 구동기의 구동원인 압전 소자의 특성으로 인하여 서브 마이크로이하의 정밀도를 쉽게 얻을 수 있으며 직선 변위를 발생시키므로 다른 기구를 이용하지 않고 사용할 수 있는 기구적 장점을 가지고 있다. 고속 응답 특성을 가지고 있어 히스테리시스 현상의 문제점에도 불구하고 초정밀 위치 결정기구에 사용되어지고 있다.

이와 같은 압전 구동기의 고속 정밀 위치 제어를 위해서는 기존의 개루프 제어로는 원하는 응답 특성을 얻기 어렵다. 압전 구동기의 과도응답의 개선과 입력 단의 고전력 증폭기에 따른 속도 저감에 따른 대책이 필요시 되어진다. 따라서 이러한 특성 개선을 위해서는 페루프 제어가 요구되어진다.

본 논문에서는 선형 압전 이론에 근거하여 제어 대상 압전 구동기의 모델링을 정립하고, 이 선형 모델에 기초하여 과도응답 특성을 개선시킬 수 있는 진상-지상 보상기를 설계한다. 또 모의 실험을 통하여 개루프 특성에 비하여 제안된 진상-지상 보상기를 사용한 페루프 제어 시스템의 성능이 우수함을 확인한다.

2. 압전 구동기의 모델링

압전 구동기의 모델링은 실험적으로 결정하는 방법과 선형 압전 이론으로부터 유도하는 방법이 있다. 선형 압전 이론으로부터 유도하는 것은 압전 구동기의 물리적 특성과 구동 메커니즘, 시스템 변수들이 어떤 변수들로 이루어지는가를 알기 위한 것으로 다음과 같이 모델링 되어질 수 있다[1].

$$M_e \frac{d^2 U}{dt^2} + D_e \frac{dU}{dt} + K_e = P_e + \left(1 + \frac{d_{33}^2 c_{33}^D}{\epsilon_{33}^t}\right) F_l \quad (1)$$

여기서 M_e 는 등가 질량을 D_e 는 등가 댐핑계수, K_e 는 등가 탄성계수를 나타낸다. d_{33}^2 , c_{33}^D , ϵ_{33}^t 는 각각 압전 소자의 압전 상수, 강성 계수, 유전 상수를 나타낸다. P_e 는 압전 소자가 신장되는 변위에 해당하는 등가 힘을 나타내며 F_l 은 외력을 나타낸다. 선형 압전 이론으로부터 유도된 압전 구동기는 그림 1에 나타낸 것과 같이 질량-스프링-댐퍼를 사용한 2차 시스템의 등가 모델을 제시할 수 있다.

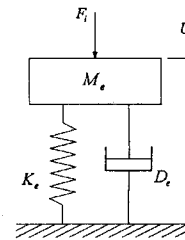


그림 1. 압전 구동기의 등가 기계적 모델.

일반적으로 전압 구동되고 있는 압전 구동기 시스템에 서는 식(1)보다는 입력전압 V_E 에 대한 출력 변위 U 의 거동을 나타내는 압전 구동기의 모델로 식(2)와 같이 표현하는 것이 더욱 일반적인 표현이다[2].

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

압전 구동기의 제어에 있어서 어려운 점이 히스테리시스가 존재하고 있다는 것이다. 이것은 출력 변위가 입력 전압에만 의존하는 것이 아니라 이전의 출력 변위가 다음의 출력 변위에 영향을 미치고 있음을 말한다. 선형 압전 이론에서는 K_p 를 상수로 취급하였으나 K_p 가 히스테리시스를 나타내는 비선형 요소임을 알 수 있다. 따라서 위에서 유도한 선형 모델에 비선형 요소를 포함한 모델을 그림 2에 제시한다.

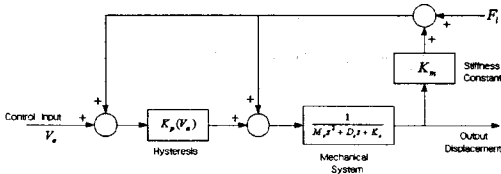


그림 2. 비선형 요소를 포함한 압전 구동기 모델.

비선형 모델에서는 K_p 가 비선형 변수 $K_p(V_a)$ 로 표현되고 있음을 알 수 있다.

입력 전압이 증감될 경우의 정상 상태 출력 범위가 히스테리시스의 영향으로 선형을 유지하지 않음을 알 수 있다. 이러한 특성을 수식으로 표현하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있으며 각 계수들은 고차 다항식으로 커브 피팅에 의한 방법으로 구할 수 있다[1].

$$X_{ss} = \begin{cases} \text{If } \text{sign}(\dot{V}_a) > 0, \\ \sum_{k=0}^N a_k V_a^k + (X_R - H(V_R)) \sum_{k=0}^m \gamma_k \left(\frac{V_a - V_R}{V_{\max} - V_R} \right)^k \\ \text{If } \text{sign}(\dot{V}_a) < 0, \\ \sum_{k=0}^N \beta_k V_a^k - (H_R(V_R) - X_R) \sum_{k=0}^m \nu_k \left(\frac{V_R - V_a}{V_{\max}} \right)^k \end{cases} \quad (3)$$

3. 진상-지상 보상기의 설계

주파수 영역에서의 제어기 설계는 제어기 설계의 기본적인 도구로 이용되어 왔다. 그러나, 근궤적도와 같이 컴퓨터를 이용해야만 하는 경우 또는 시행 착오(trial-and-error)에 의해 설계를 하는 이유 때문에 불편함이 따랐다. 따라서 본 논문에서는 보드 선도를 이용하여 보상기를 설계하고자 한다[3],[4].

개루프(open-loop)시스템이 안정한 경우 주파수 응답이 보드 선도로 주어질 때 위상(phase)이 -180° 가 되는 주파수에서 크기(amplitude)가 0dB 보다 작으면 페루프 시스템은 안정하게 된다. 이를 이용하여 시스템이 안정할 수 있도록 이득 범위를 구하여 이 범위 내에서 이득을 변화시키며 보상기를 설계한다. 또한 과도 응답 특성을 나타내는 %오버슈트는 위상 여유를 증가시킴으로써 작아진다. 정상상태 오차를 줄이기 위해서는 고주파 영역의 크기가 감소할지라도 저주파 영역의 크기를 증가시켜야 한다. 따라서 보상기의 설계에 있어서 이상과 같은 점들을 인지하여야 할 것이며 보드 선도를 이용하면 쉽게 이를 확인할 수 있다. 고주파영역의 이득을 낮추고 시스템을 안정하게 하며 정상상태의 오차를 개선시키는 지상 보상기를 설계한 후 위상 여유 요구 조건을 만족하는 진상 보상기를 설계하도록 한다.

다음과 같은 전달 함수를 갖는 진상-지상 보상기를 고려한다.

$$G_C(s) = K_C \left(\frac{s + \frac{1}{T_1}}{s + \frac{1}{\gamma T_1}} \right) \cdot \left(\frac{s + \frac{1}{T_2}}{s + \frac{1}{\beta T_2}} \right) \quad (4)$$

첫째 항은 보상기의 이득이며 둘째 항은 진상 보상기를 셋째 항은 지상 보상기를 나타낸다. 여기서 사용된 γ 와 β 는 서로 역수 관계에 있다.

먼저, 정상 상태 오차 조건에 만족하도록 K_C 의 값을 적절히 정하고 보드 선도를 그려 이득 여유를 알아보고 시스템을 안정하도록 하는 K_C 의 범위를 결정한다.

다음으로 시스템의 세틀링 시간, %오버슈트, 피크 시간

등을 고려하여 페루프 시스템의 대역 폭을 결정한다.

$$W_{bw} = W_n \sqrt{(1-2\zeta^2) + \sqrt{4\zeta^4 - 4\zeta^2 + 2}} \quad (5)$$

여기서 ζ 는 제동비이다. 또한 요구되는 위상여유는 다음과 같다.

$$\phi_M = \tan^{-1} \frac{2\zeta}{\sqrt{-2\zeta^2 + \sqrt{1+4\zeta^4}}} \quad (6)$$

식 (6)에서 결정된 위상 여유를 이용하여 지상 보상기에 의한 위상 감소분으로 약 $5^\circ \sim 12^\circ$ 정도를 더하여 새로운 위상 여유를 결정한다. 지상 보상기 설계시 정해야 할 이득은 시스템이 안정하면서 정상 상태 오차 조건을 만족시키도록 식 (7)을 이용하여 결정할 수 있다.

$$K_v = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot G_c(s) \cdot G_p(s) \quad (7)$$

또한 식 (4)의 β 는 다음 식으로부터 구해지며 γ 는 $\frac{1}{\beta}$ 이다.

$$\beta = \frac{1 - \sin(\phi \cdot \pi/180)}{1 + \sin(\phi \cdot \pi/180)} \quad (8)$$

식 (8)에 의해 결정된 β 와 새로운 위상 주파수를 이용하여 진상 보상기를 설계한다. 식 (9)를 이용하여 T_1 값을 구한 후 진상 보상기의 차단 주파수를 찾는다.

$$\omega_{\max} = \frac{1}{TV\beta} \quad (9)$$

이와 같이 구한 결과를 계산이나 시뮬레이션을 통하여 확인한다.

4. 모의 실험 결과

압전 구동기의 과도응답특성과 진상-지상 보상기를 설계하였으며 전체적인 시스템은 그림 3과 같이 구성된다.

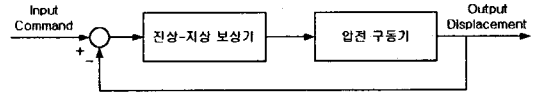


그림 3. 진상-지상 보상기를 포함한 전체 제어 시스템.

모의 실험에 사용한 압전 구동기는 Physik Instrumente사의 P731.10 모델로 0~100 V의 입력 전압에 대하여 0~100 μ m의 변위를 갖는다. 이 압전 구동기의 시스템 파라미터를 표 1에 보이고 있다[5].

표 1. 시스템 매개변수

파라미터	값
M_e	1[kg]
D_e	1850.58
K_e	3000000

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

$$G_p(s) = \frac{3}{s^2 + 1850.58s + 3000000} \quad (10)$$

정상 상태 오차를 영으로 하기 위해서는 보상기에 적분기를 포함시켜 설계를 해야만 한다. 따라서 적분기를 포함한 진상-지상 보상기의 전달함수는 다음과 같다.

$$G_c(s) = \frac{K_C}{s} \left(\frac{s + \frac{1}{T_1}}{s + \frac{1}{\gamma T_1}} \right) \cdot \left(\frac{s + \frac{1}{T_2}}{s + \frac{1}{\beta T_2}} \right) \quad (11)$$

설계에 앞서 이득 여유를 알아보기 위해 정상 상태 오차를 대략 1%로 가정하고 식(12)를 이용하여 적절한 K_C 를 결정한다.

$$K_v = \lim_{s \rightarrow 0} s G_c(s) G_p(s) \quad (12)$$

위에서 구한 $K_C = 10^8$ 에 대하여 보드 선도를 작성하면 그림 4와 같이 된다. 그림 4에서 이득 여유는 약 1 dB가 된다. 따라서 $K = 7.08 \times 10^8$ 까지는 시스템이 안정함을 알 수 있다.

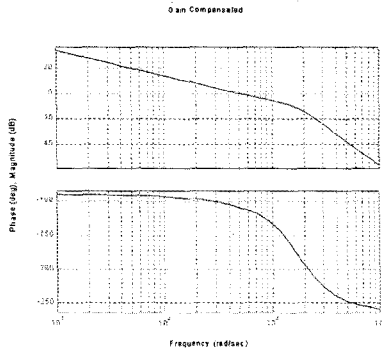


그림 4. 이득 보상에 의한 시스템 보드 선도.

이상으로 시스템이 안정하도록 이득 K의 범위를 정할 수 있다. 과도 응답 특성을 개선하기 위해 %오버슈트를 20%로 하고 보상기를 설계하도록 한다.

우선 $K = 5 \times 10^8$ 에 대하여 진상-지상 보상기를 설계하면 파라미터는 표 2와 같이 구해진다.

표 2. 진상-지상 보상기의 매개 변수

매개 변수	값
제동비(Damping ratio)	0.45595
요구되는 대역 폭	4.65937×10^6
요구되는 위상 여유	53.1477
새로운 위상 여유 주파수	3.7275×10^6
지상 보상기로부터 요구되는 위상	143.119
β	0.249882

위의 파라미터를 이용하여 지상(lag), 진상(lead)보상기의 전달 함수를 구하면 다음과 같이 된다.

$$G_{lag}(s) = \frac{0.24988(s + 372749.75)}{s + 93143.44}$$

$$G_{lead}(s) = \frac{4.0019(s + 1863308.75)}{s + 7456755.58}$$

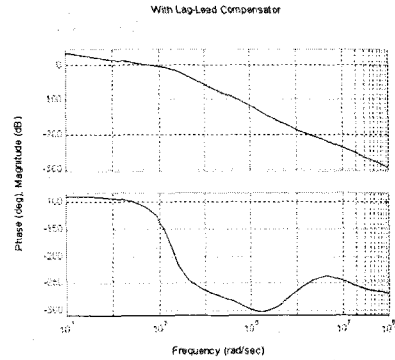


그림 5. 진상-지상 보상기에 의해 과도응답 특성이 보상된 시스템의 보드 선도.

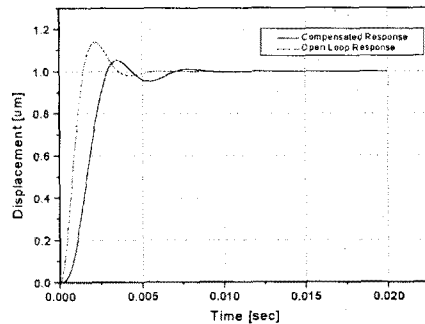


그림 6. 과도응답특성이 보상된 시스템의 스텝 응답.

이와 같이 설계된 진상-지상 보상기를 적용시킨 시스템에 대한 보드 선도 및 스텝 응답은 각각 그림 5, 그림 6과 같다.

5. 결 론

압전 구동기는 고속, 고정밀도가 요구되는 분야에 널리 응용되고 있다. 기존의 압전 구동기 제어는 개루프 제어를 수행하였으며 이는 정밀 제어에는 그 성능이 미치지 못한다. 따라서 본 논문에서는 압전 구동기의 선형 모델에 기초하여 진상-지상 보상기를 설계하고 위치 피드백을 이용한 폐루프 제어를 수행한 결과 기존의 개루프 제어에서의 과도응답 특성을 개선시킬 수 있었다. 앞으로 실제 실험을 통하여 진상-지상 보상기의 성능을 검증하고 보상기의 파라미터를 적절히 수정하는 방법에 대한 연구가 진행되어야 하겠다.

[참 고 문 헌]

- [1] 정승배, 전압 구동시 압전 구동기의 위치 결정 정도에 대한 비선형 모델링에 관한 연구, 한국 과학 기술원 박사 학위논문, 1993
- [2] Jeong-Du Kim, Soo-Ryong Nam, "Development of a micro-depth control system for an ultra-precision lathe using a piezoelectric actuator," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 37, No. 4, pp. 495-509, 1997
- [3] Norman S. Nise, *Control System Engineering*, 2nd Edition, The Benjamin/Cummings, 1995
- [4] Kai Shing Yeung, King W. Wong, and Kan-Lin Che Non-Trial-and Error Method for Lag-Lead Compensator Design," *IEEE Transactions on Education*, Vol. 41, No. 76-80, 1998
- [5] Physik Instrumente, *NanoPositioning Catalog*, 1998