

압전 작동기를 이용한 차량 ABS 용 밸브 모듈레이터의 압력 제어 Pressure Control of a Valve Modulator Using a Piezo Actuator for Vehicle ABS

전준철* · 맹영준* · 최승복†

Juncheol Jeon , Maeng-Young Jun and Seung-Bok Choi

1. 서 론

최근 산업 시스템이 고속화, 고 정밀화 되는 추세에 따라서, 서보 밸브 시스템의 성능 향상에 많은 연구가 진행 되고 있다. 기존의 서보 밸브는 반응속도가 느리고, 부피가 크며, 맥동현상이 발생하는 단점이 있고, 이러한 단점을 극복하기 위하여 밸브 시스템의 소형화, 고성능화를 위한 연구로써 새로운 형태의 작동기를 도입하고자 하는 다양한 연구들이 시도되고 있다. 대표적으로 형상기억합금, 전왜재료, 압전재료를 밸브에 응용하는 기술에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다. 그 중에서도 압전재료는 초고속 응답성과 소 분해능으로 인해 이를 이용하여 온 오프 밸브에서부터 비례 밸브와 서보 밸브에 이르기까지 다양한 밸브 시스템에 대한 연구가 국외에서 활발히 진행되고 있다.

따라서 본 연구에서는 압전 작동기를 이용하여 압력제어를 위한 노즐-플래퍼형 공압 서보 밸브 모듈레이터 시스템을 구성하고 이에 대한 동적 모델링, 제어기 설계 및 압력 추적 제어를 수행 하고자 한다. 이를 위하여 공압부의 불확실성과 함께 압전 재료의 히스테리시스를 작동기의 불확실성으로 모델링을 수행하였다. 이러한 시스템 불확실성에도 불구하고 강건한 압력 제어를 위해 슬라이딩 모드 제어기를 설계 하였으며, 여러 가지 요구 궤적에 대한 압력 추적제어를 수행하여 제안된 제어기의 우수성을 입증 하였다.

2. 압전 밸브 모듈레이터의 모델링

압전 작동기로 구동되는 플래퍼(flapper)의 양단에 노즐과 오리피스가 대칭으로 구성된 공압회로가 Fig. 1(a)와 같이 구성된다. 공압 회로에 공급압력이 P_s 로 공급될 때 전기적 입력으로 플래퍼를 구동함으로써 플래퍼 양단의 노즐 내부에 발생하는 압력차 ΔP

는 다음과 같이 선형화 시킬 수 있다.

$$\Delta \dot{P} + C_1 \Delta P = 2C_2 x \tag{1}$$

$$\Delta P = P_1 - P_2$$

또한 Fig. 1(b)에서 편미분 방정식의 해 $x(r, t)$ 를 다음과 같이 i 번째의 모드 좌표 $q_i(t)$ 와 모드 형상 함수 $\phi_i(r)$ 로서 표현 하면 다음과 같다.

$$x(r, t) = \sum_{i=1}^n \phi_i(r) q_i(t) \tag{2}$$

라그랑지 방정식(Lagrange' s Equation)을 이용하여 질량 비례담핑을 추가 한 후 모드간의 연성을 무시하고 점성감쇠임을 가정하면 다음과 같은 비연계 상미분 방정식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{q}_i + 2\xi_i \omega_i \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = \frac{1}{M_{ei}} f_i \tag{3}$$

여기서 ξ_i 는 감쇠비 ω_i 는 고유진동수, 그리고 M_{ei} 는 등가 질량을 나타내고, 이로부터 플래퍼 운동방정식은 제어입력 에 대한 노즐부에서의 플래퍼 변위 x 의 형태로 표현될 수 있다.

$$\ddot{x} + 2\xi_i \omega_i \dot{x} + \omega_i^2 x = C_v V(t) - C_f F_2 \tag{4}$$

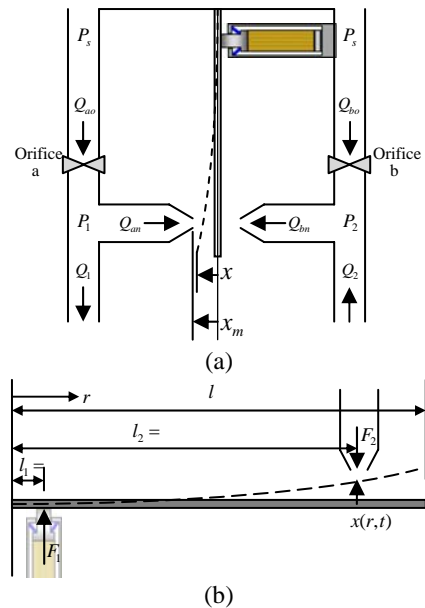


Fig. 1 Flapper-Nozzle Control Valve

† 교신저자; 정회원, 인하대학교 기계공학과

E-mail : seungbok@inha.ac.kr

Tel : (032) 860-7319, Fax : (032) 868-1716

* 인하대학교 대학원 기계공학과

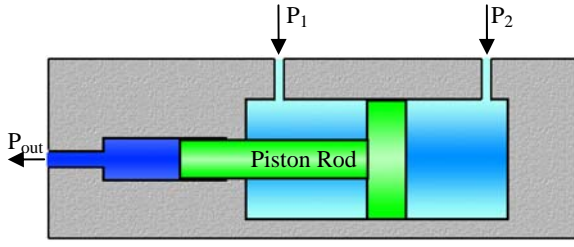


Fig. 2 Pressure Modulator

식(4)에 식(1)을 대입하면 제어입력 $V(t)$ 에 대한 출력변수 ΔP 의 관계로 나타나는 전체 제어 시스템 모델을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta\ddot{P} + (2\xi_1\omega_1 + C_1)\Delta\dot{P} + (2\xi_1\omega_1C_1 + \omega_1^2)\Delta P + \omega_1^2C_1\Delta P + 2C_2C_fF_2 = 2C_2C_vV(t) \quad (5)$$

이후, 넓은 압력 조절범위를 가지기 위해 Fig. 2 와 같은 압력 모듈레이터가 사용되었다. 마찰력과 피스톤 로드의 질량을 무시하고 로드의 넓은 부분 면적 (A_1)이 좁은 부분 면적 (A_2)과 큰 차이가 난다고 가정하면 다음과 같은 최종식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{P}_{out} + (2\xi_1\omega_1 + C_1)\dot{P}_{out} + (2\xi_1\omega_1C_1 + \omega_1^2)P_{out} + \omega_1^2C_1P_{out} + \frac{A_1}{A_2}2C_2C_fF_2 = \frac{A_1}{A_2}2C_2C_vV(t) \quad (6)$$

3. SMC 제어기 설계 및 검증

시스템의 불확실성 존재에도 불구하고 강건한 요구 압력의 추적을 위하여 SMC(sliding mode control) 기법을 제안 하였다. SMC 설계를 위한 제어 목적이 압전 작동기 플래퍼를 구동하여 출력변수 (P_{out})가 요구 궤적을 추적하도록 하는 것 이므로 먼저 다음과 같은 오차를 정의한다.

$$e_1 = P_{out} - P_d, \quad e_2 = \dot{P}_{out} - \dot{P}_d, \quad e_3 = \ddot{P}_{out} - \ddot{P}_d \quad (7)$$

여기서 P_d 는 요구 출력 변수이다. 따라서 오차로 이루어진 슬라이딩 평면을 다음과 같이 설정한다.

$$S = g_1 \cdot e_1 + g_2 \cdot e_2 + g_3 \cdot e_3, \quad g_i > 0, i=1,2,3 \quad (8)$$

여기서 g 는 슬라이딩 평면의 기울기를 나타낸다. 이 때 슬라이딩 평면이 안정되도록 g_i 를 설계하고 이것은 SMC 제어 시스템이 다음과 같은 슬라이딩 모드 존재조건을 만족함으로써 성취 될 수 있다.

$$S \cdot \dot{S} < 0 \quad (9)$$

압전 작동기의 히스테리시스와 공급 압력의 불확실성에 따라 다음과 같은 불확실성 변수를 정의한다.

$$c = c_n + \Delta c = c_n(1 + \gamma_1), \quad |\gamma_1| < \phi_1 < 1 \quad (10)$$

$$P_s = P_{s,n} + \Delta P_s = P_{s,n}(1 + \gamma_2), \quad |\gamma_2| < \phi_2 < 1$$

불확실성을 고려한 SMC 의 제어 입력 $u(t)$ 는 다음과 같이 계산될 수 있다.

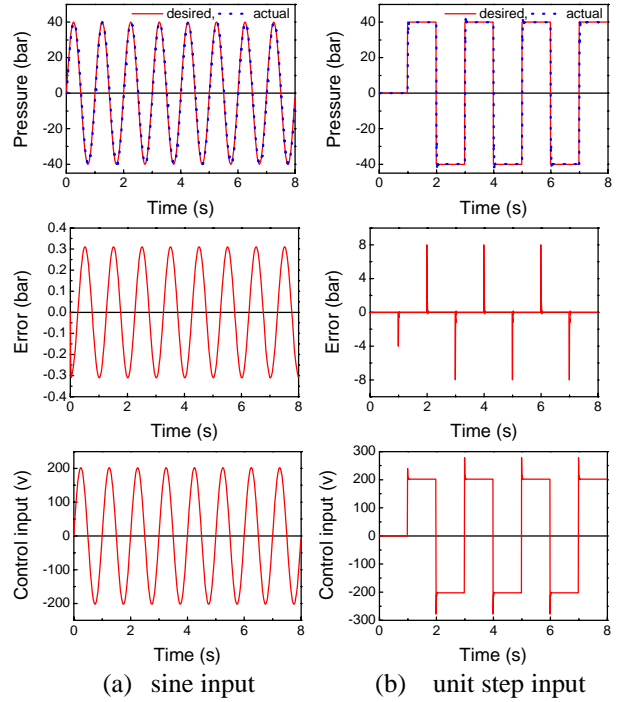


Fig. 3 Results of Pressure Control

$$u(t) = \frac{A_2}{A_1} \frac{1}{g_3\alpha_1} \left[g_1 e_2 + g_2 e_3 + g_3 \left(\Delta\ddot{P}_d + \alpha_2 |\Delta\dot{P}| + \alpha_3 |\Delta P| \right) \right] \text{sgn}(S) - K \text{sgn}(s) \quad (11)$$

SMC 제어기를 사용하여 Fig. 3 과 같이 사인파와 스텝 입력에 대한 추적제어 시뮬레이션을 실시하였다. 제어 대역폭의 영역 안에서 위상지연 없이 우수한 압력 추적 제어가 이루어 졌음을 알 수 있고, 입력 전압의 경우 적절하게 인가됨을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 압전 작동기로 구동 되는 밸브 모듈레이터 시스템을 모델링하여 압력 추적 제어를 수행 하였다. 압전 재료의 히스테리시스 현상과 공압 회로 모델에 존재하는 파라미터 불확실성을 고려한 제어 모델을 구축하고, 밸브 모듈레이터 시스템의 강건한 압력 추적제어를 위해 불확실성이 고려된 SMC 제어기를 설계하였다. 사인파와 스텝함수에 대한 시뮬레이션 결과 추적오차의 증가 없이 비교적 양호한 제어 결과를 나타내었다. 향후 압전 밸브 모듈레이터로 구성된 서보 밸브 메커니즘을 이용한 차량 소형 ABS 의 압력 제어 연구가 추진될 예정이다.

후 기

이 연구는 국방부/방위사업청이 지정한 UVRC(수중운동특목화센터)의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.