



지능구조물의 진동 억제를 위한 적응 양변위 되먹임 제어기 개발

Development of Adaptive Positive Position Feedback Controller for Active Vibration Suppression of Smart Structures

한 상 보[†]
Sangbo Han[†]

(Received April 18, 2018 ; Revised April 18, 2018 ; Accepted June 25, 2018)

Key Words : Active Vibration Control(능동 진동 제어), Positive Position Feedback Control(양변위 되먹임 제어), Frequency Estimation(진동수 산정), Adaptive Control(적응 제어)

ABSTRACT

In this study, an adaptive positive-position feedback control (PPF) algorithm was developed for vibration suppression of smart structures equipped with piezoceramic sensor and actuator. The PPF control is capable of selectively increasing the damping of the target mode by tuning the filter frequency of the PPF controller to the natural frequency of the target mode. However, the performance of the PPF control can be deteriorated if the filter frequency of the PPF controller is not accurately tuned to the natural frequency of the target structure. Hence, the natural frequencies of a smart structure should be determined a priori to the application of the PPF control either theoretically or experimentally. In order to solve this problem, the frequency estimation algorithm that can calculate the major frequency of the structure was combined with the PPF control, thus realizing the adaptive PPF control. The performance of the proposed adaptive PPF control was validated experimentally by using a beam structure consisting of a piezoceramic sensor and an actuator. Experimental results show that the frequency could be accurately estimated in real time, and the vibrations of the structure were effectively suppressed.

1. 서 론

구조물의 진동을 억제하기 위해 지능구조물이라는 개념이 도입되었다. 지능구조물은 일반적으로 압전세라믹 센서와 압전세라믹 액추에이터가 부착된 구조물을 칭하며, 센서 신호를 이용하여 만들어진 제어 신호로 구조물의 진동을 억제한다.

구조물의 진동을 억제하는데 대표적인 제어 알고

리즘으로는 Fanson and Caughey⁽¹⁾ 가 제안한 positive position feedback(PPF, 양변위 되먹임) 제어를 들 수 있다. 이후 PPF 제어 알고리즘의 제어 성능과 안정성을 확인하기 위하여 지능 구조물을 이용한 연구가 진행되었다^(2,3).

PPF 제어기를 사용할 때 감쇠 계수와 제어 진동수를 설정하여야 하는데, 구조물의 고유진동수와 제어기의 필터 진동수를 일치시켜 구조물의 감쇠를 증가시키는 방법으로 진동을 억제하게 된다. 하지만,

[†] Corresponding Author; Member, Dept. of Mechanical Engineering, Kyungnam University
E-mail: sbhan@kyungnam.ac.kr

[‡] Recommended by Editor Jae Hung Han

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

구조물의 동특성이 변하여 고유진동수가 변하여 제어기의 필터 진동수와 일치하지 않을 경우 진동 제어 성능이 저하된다는 단점이 존재한다. 이러한 단점을 보완하기 위해 PPF 제어기의 필터 진동수를 구조물의 고유진동수에 맞게 실시간으로 변경하도록 하여 제어 성능을 유지할 수 있도록 다양한 방법이 개발되었다. Kim et al.⁽⁴⁾과 Heo and Kwak⁽⁵⁾은 구조물의 신호로부터 고유진동수를 찾아내기 위해 fast fourier transform(FFT) 알고리즘을 이용하여 실시간으로 PPF 제어기의 필터 진동수를 변경할 수 있는 적응형 제어기를 제안하였다. Kwak and Shin⁽⁶⁾과 Heo and Kwak⁽⁷⁾은 PPF 제어기의 유전자 알고리즘을 사용해 PPT 제어기의 파라미터를 실시간으로 조정할 수 있는 적응형 제어기를 제안하였다. Lee et al.⁽⁸⁾은 유전자 알고리즘을 이용한 방법보다 빠르게 제어 진동수를 찾을 수 있는 Gradient-descent 방법을 사용하는 적응형 PPF 제어기를 개발하였다.

이 연구에서는 구조물의 진동 신호로부터 제어 대상 진동수를 실시간으로 추정하기 위해서 So의 연구^(9,10)에서 제안된 진동수 산정 방법을 PPF 제어기와 결합하였다. direct frequency estimator(DFE)에서 발생하는 진동수 표류 문제를 해결하기 위해 envelope detection 방법을 적용하였다. PPF 제어기, 진동수 추정 방법과 envelope detection 방법을 결합해 새로운 형태의 적응 PPF 제어기를 개발하였다. 그리고 이 연구에서 개발한 적응 PPF 제어기를 실험을 통해 그 효용성을 입증하였다.

2. 양변위 되먹임 제어

이 연구에서는 구조물의 진동 제어를 위해 PPF 제어기의 전달함수는 다음과 같다.

$$H(s) = \frac{\omega_f^2}{s^2 + 2\zeta_f \omega_f s + \omega_f^2} \tag{1}$$

여기서, ζ_f 와 ω_f 는 각각 PPF 제어기의 감쇠 계수와 필터 진동수를 나타낸다.

PPF 제어기의 경우 감쇠 계수와 필터 진동수를 결정해야 하는데, 일반적으로 0.3의 감쇠계수값을 사용하고, 필터 진동수는 진동을 줄이고자 하는 구조물의 고유진동수에 맞추게 된다. 만일 구조물의

고유진동수가 변하면 당연히 PPF 제어기의 필터 진동수도 이에 맞추어 변해야 그 성능을 발휘할 수 있다. 따라서 PPF 제어기의 필터 진동수가 잘 맞추어져 있지 않다면 성능이 저하될 수 있다는 단점이 존재한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 이 연구에서는 구조물의 진동 신호를 이용하여 진동수를 추정한 다음 PPF 제어기의 타겟 진동수를 수시로 변경하는 방법을 제안하였다. 추정한 진동수를 제어기 진동수로 실시간으로 변경시키기 위해 PPF 제어기 식 (1)을 먼저 bilinear 변환을 이용해 이산화된 식으로 변환하였다.

$$H(z) = \frac{b_2(1+2z^{-1}+z^{-2})}{1+a_1z^{-1}+a_0z^{-2}} \tag{2}$$

여기서, T 는 sampling time을 나타내며,

$$b_2 = 1/\Delta, \quad a_1 = (2\omega_f^2 - 8/T^2)/\Delta \tag{3a,b}$$

$$a_0 = (4/T^2 - 4/T\zeta_f\omega_f + \omega_f^2)/\Delta \tag{3c}$$

$$\Delta = (4/T^2 + 4/T\zeta_f\omega_f + \omega_f^2) \tag{3d}$$

식 (2)의 이산화된 PPF 제어기는 Simulink 소프트웨어를 이용하여 Fig. 1과 같이 구현되었다. 그림에서 포트 3번에 제어기 진동수를 입력하여 이산화된 PPF 제어기의 파라미터를 쉽게 변경할 수 있게 구성하였다.

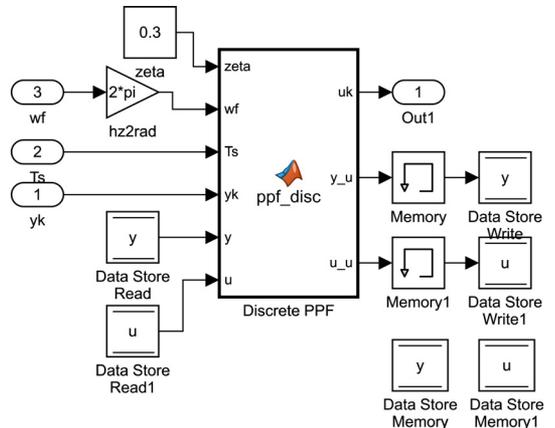


Fig. 1 Simulink block diagram for discretized PPF control algorithm

3. 진동수 추정 알고리즘

적응형 PPF 제어기 개발을 위해 이 연구에서는 구조물의 진동 신호를 이용하여 진동수를 추정할 수 있는 알고리즘^(9,10)을 사용하였다. 진동수 추정 알고리즘은 다음의 식으로 주어진다.

$$\omega(n+1) = \omega(n) - \mu e(n)s(n) \tag{4}$$

여기서, μ 는 step size이며,

$$e(n+1) = x(n) - 2\cos(\omega(n)T)x(n-1) + x(n-2) \tag{5a}$$

$$s(n) = [x(n) + x(n-2)]\cos(\omega(n)T) + x(n-1) \tag{5b}$$

여기서 $x(n)$ 은 구조물의 현재 시점의 진동 신호를 나타낸다. 진동수 추정 알고리즘의 성능 검증을 위해 Simulink 소프트웨어로 구현한 다음 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 2는 진동수 추정 알고리즘을 구현한 Simulink 블록 다이어그램을 나타낸다.

먼저 Fig. 3과 같이 노이즈와 bias가 포함된 5 Hz 사인파를 입력한 다음 진동수를 잘 추정하는지 확인하는 작업을 수행하였다.

Fig. 4는 진동수 추정 알고리즘을 이용한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 약 2초 정도 만에 5 Hz임을 잘 추정하지만, 원 신호에 bias 성분으로 포함되어 있다 보니 진동수 추정 결과가 부정확해지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 문제는 구조물의 진동을 억제한 다음 진동 신호가 약해져서 bias 혹은 노이즈 성분이 진동 신호보다 영향을 크게 나타남으로써 진

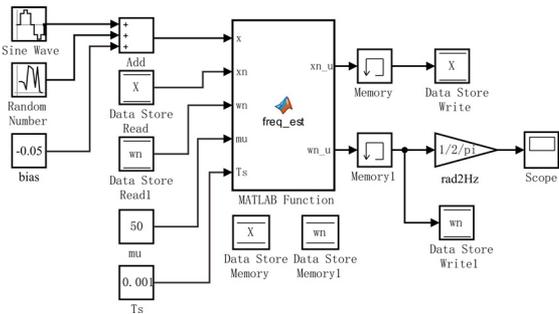


Fig. 2 Simulink block diagram for frequency estimation algorithm

동수가 부정확하게 추정될 수 있음을 보여준다. 진동수가 바뀌면 제어기의 성능이 저하되기 때문에 이 문제를 반드시 해결해야 된다.

노이즈나 bias 성분에 의해 발생하는 부정확성을 개선하기 위해 이 연구에서는 진동 신호가 일정 수준 이하로 낮아질 경우 진동수 추정을 중단하도록 하는 방법을 고려하였다. 이를 위해 진동 신호의 크기를 계산하도록 envelope detection 방법을 적용하였다. Envelop detection을 위해 신호를 제공한 다음 저역 통과 필터를 통과시키는 방법을 사용하였다. 입력되는 신호를 제공할 경우 신호의 절반이 높은 진동수 대역으로 밀어 올려지게 되기 때문에 원 신호와의 비율을 맞추기 위해 2를 곱해 주어야 한다. 그런 다음 신호를 다운 샘플링하고, 저역 통과 필터

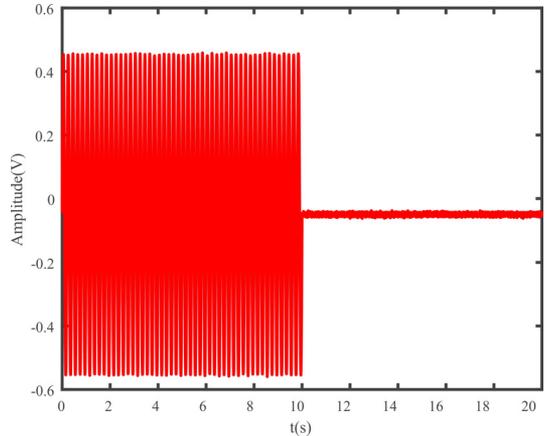


Fig. 3 Sine wave for simulation

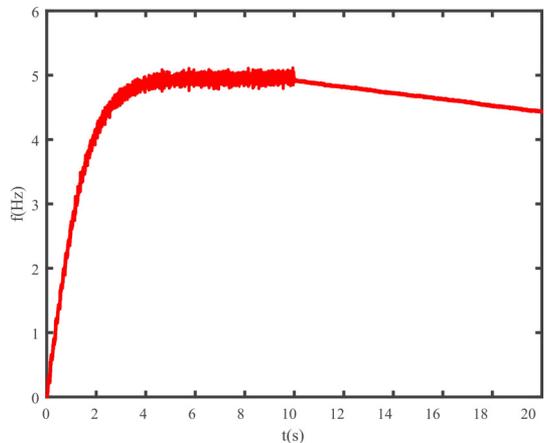


Fig. 4 Result of the frequency estimation

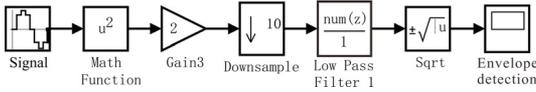


Fig. 5 Simulink block diagram for envelope detection

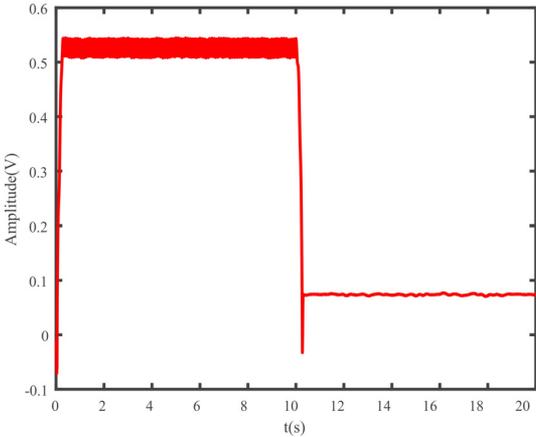


Fig. 6 Result of the envelope detection

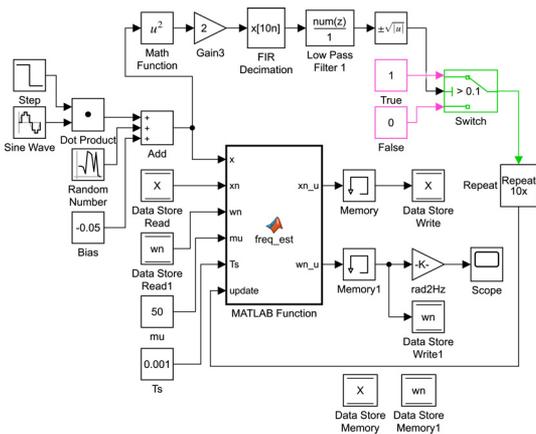


Fig. 7 Simulink block diagram for frequency estimation with envelope detection

를 통과시켜서 고주파 성분을 제거하면 신호의 envelope만 남게 된다. 그리고 처리된 신호의 제곱근을 취하여 원 신호의 진폭과 일치하도록 만드는 알고리즘이다. 이러한 일련의 과정을 Simulink 블록 다이어그램으로 구현하면 Fig. 5와 같다. Envelope detection을 위해 사용한 저역 통과 필터의 진동수는 30 Hz이다.

Fig. 3의 신호를 Fig. 5의 Simulink 블록선도를 이용하여 추출해낸 envelope는 Fig. 6과 같다.

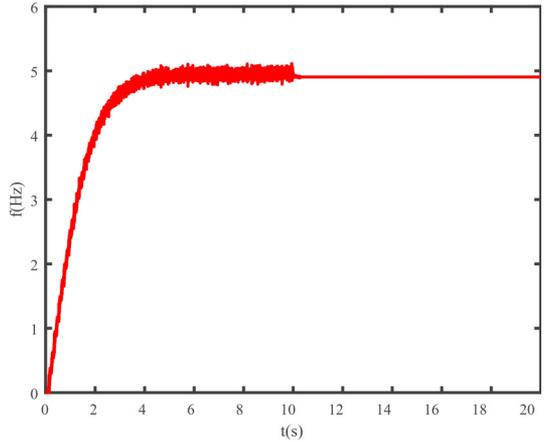


Fig. 8 Result of the frequency estimation with envelope detection

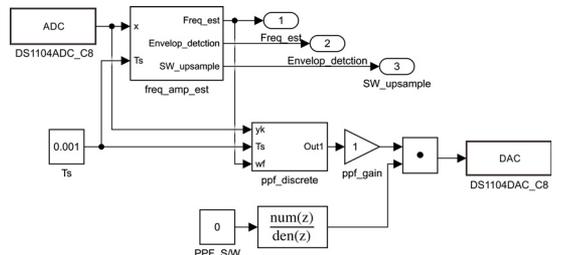


Fig. 9 Simulink block diagram of adaptive PPF control

Fig. 6로부터 제안한 envelope detection 알고리즘이 정확하게 진폭을 추정하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 envelope detection을 진동수 추정 알고리즘과 결합하여 진폭이 일정 수준 이하가 되면 진동수 추정을 진행하지 않도록 알고리즘을 다음과 같이 수정하였다.

Envelope detection 방법이 적용된 진동수 추정 알고리즘을 이용하여 얻은 결과는 Fig. 8과 같다. Fig. 4의 결과와는 다르게 신호가 일정 수준 이하로 작아진 10초 이후부터는 이전에 추정한 제어 진동수로 고정되어 추정 결과의 정확도가 유지되는 것을 확인할 수 있다.

4. 적응형 PPF 제어 알고리즘

앞에서 언급한 PPF 제어 알고리즘과 진동수 추 알고리즘을 결합해 Fig. 9와 같은 적응형 PPF 제어기를 개발하였다. 블록 중 ppf_discrete 블록은 PPF

제어기를 구현한 Fig. 1이 포함되어 있다. 그리고 freq_amp_est 블록은 Fig. 7에 나타난 진동수 추정 알고리즘 및 envelope detection 방법을 포함하고 있다. ADC 채널을 통해 구조물의 진동 신호가 들어오면 진동수를 추정한 다음 추정된 진동수를 PPF 제어기에 제공하고, 계산된 제어 신호를 DAC 채널을 통해 내보내게 된다. 개발된 적응 PPF 제어기를 사용할 경우 구조물의 고유진동수가 변하더라도 진동수 추정 알고리즘을 통해 계산된 정확한 진동수를 PPF 제어기에 전달할 수 있기 때문에 제어 성능이 유지될 수 있다.

5. 실험

이 연구에서 제안한 적응 PPF 제어기의 성능 검증을 위해 외팔보 구조물을 이용하여 진동 제어 실험을 수행하였다. 이를 위해 Fig. 10처럼 압전세라믹 센서와 압전세라믹 액추에이터가 부착된 외팔보를 사용하였다. 외팔보의 상단에는 tip mass를 하나 또는 두 개 부착할 수 있도록 하여 구조물의 고유진동수를 변경할 수 있도록 하였다.

진동 제어 실험을 위해 사용한 장비들의 구성도는 Fig. 11과 같다. 구조물의 진동을 계측하기 위해 압전세라믹 센서의 신호를 전압 신호로 변경하기 위해 이 연구실에서 자체 제작한 charge amplifier를 사용

하였다. 제어기를 통해 계산된 제어 신호로 압전세라믹 액추에이터를 구동시키기 위해 high voltage amplifier(Eliezer, HA800RV2)를 사용하였다. 이 연구에서 개발한 능동형 제어기를 구현하기 위해 컨트롤 보드(dSpace, DS1104)를 사용하였다.

실험 장치를 이용하여 진동 제어 실험을 수행하였다. 외팔보 구조물의 상단에 tip mass를 하나만 부착한 다음 외팔보의 끝을 손으로 가진하여 진동 제어 전과 후를 비교하였다. Fig. 12는 tip mass가 하나인 외팔보를 가진하고, 제어는 적용하지 않았을 때의 압전세라믹 센서 신호 결과를 보여준다.

Fig. 13은 적응 PPF 제어기로 제어를 수행한 결과를 나타내며, Fig. 14는 제어를 수행하는 동안 진동수를 추정한 결과를 나타낸다. 구조물의 고유진동수인 9.7 Hz를 빠르고 정확하게 추정해 진동 억제가 효과적으로 이루어졌음을 확인할 수 있다.

외팔보 상단에 추가로 tip mass를 하나 더 추가하여 진동 제어 실험을 수행하였다. Fig. 15는 진동 제어를 적용하지 않았을 때 계측된 신호를 나타낸다. 그리고 Fig. 16은 적응 PPF 제어기를 적용했을 경우의 센서 신호를 보여준다. 진동수를 추정한 결과는 Fig. 17과 같다. Tip mass가 두 개일 때의 구조물 고유진동수인 6.2 Hz를 잘 추정해 구조물의 고유진동수가 바뀌어도 진동 제어 성능이 유지될 수 있음을 알 수 있다.

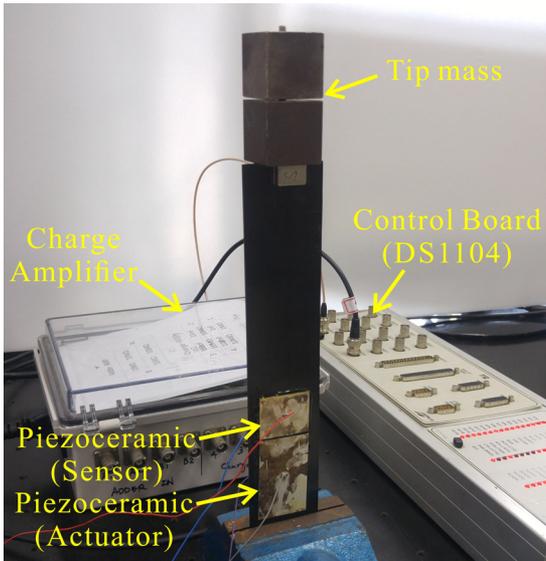


Fig. 10 Experimental setting

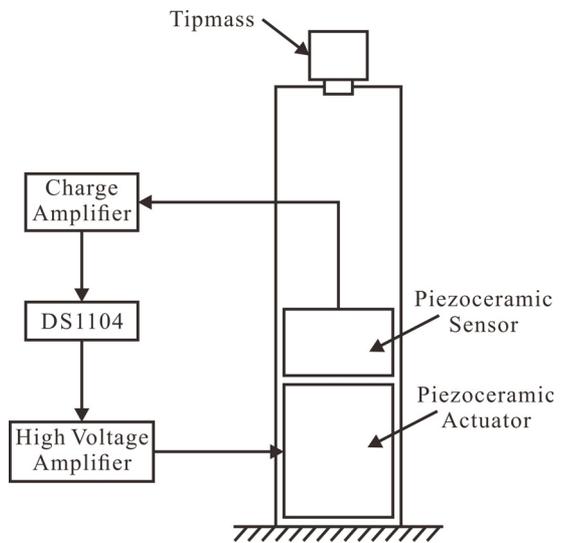


Fig. 11 Schematic diagram for experiment

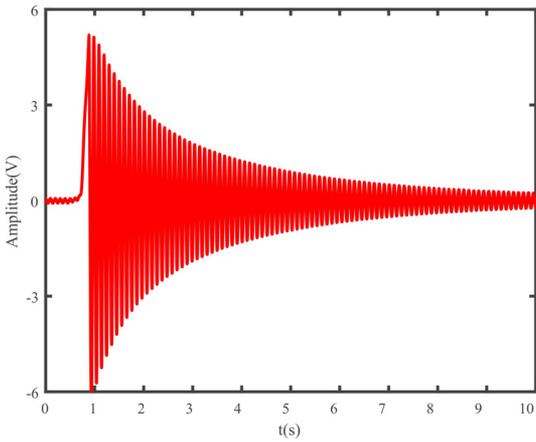


Fig. 12 Time history of uncontrolled sensor voltage (single mass)

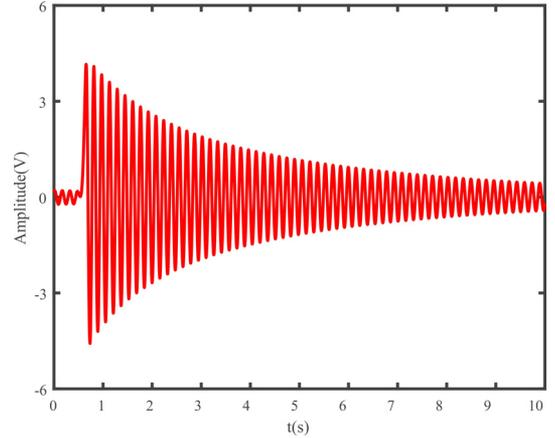


Fig. 15 Time history of the voltage measured from piezoceramic sensor without adaptive PPF (dual mass)

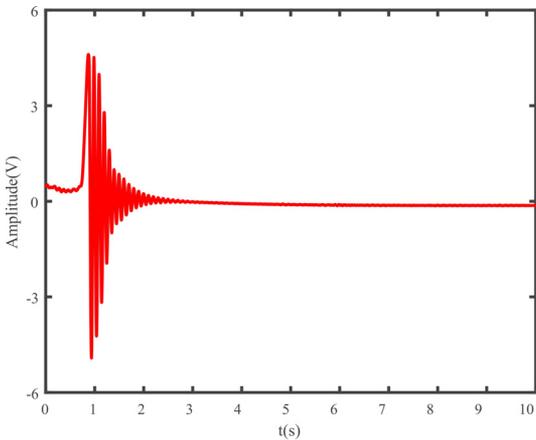


Fig. 13 Time history of controlled sensor voltage (single mass)

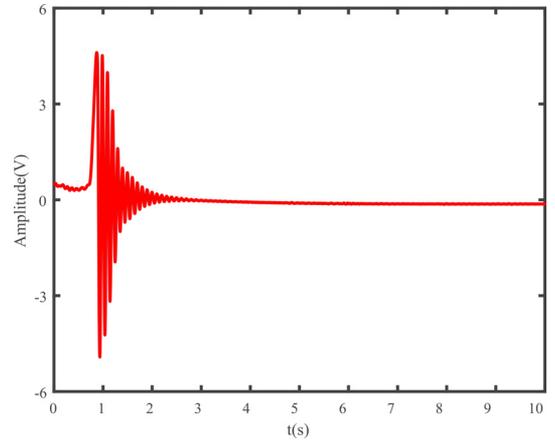


Fig. 16 Time history of the voltage measured from piezoceramic sensor with adaptive PPF (dual mass)

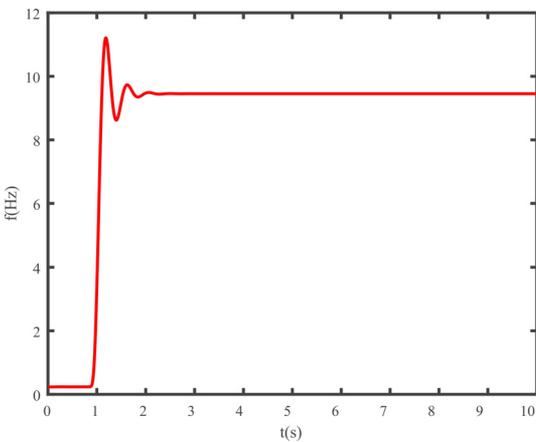


Fig. 14 Result of the frequency estimation (single mass)

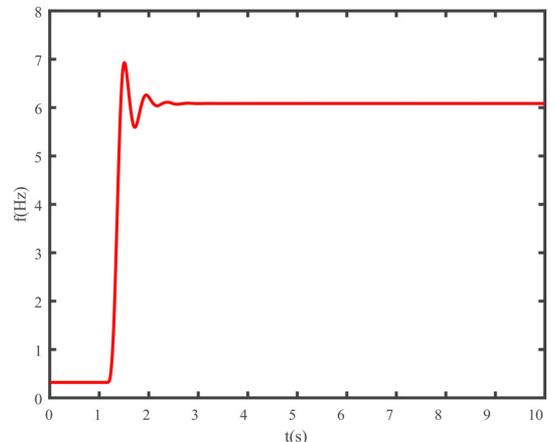


Fig. 17 Result of the frequency estimation (dual mass)

6. 결 론

이 연구에서는 보다 효과적인 구조물의 능동 진동 제어를 위해 적응 PPF 제어기를 제안하였다. 기존의 PPF 제어기의 경우 구조물의 고유진동수가 바뀔 경우 제어 성능이 저하된다는 문제가 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 진동수 추정 알고리즘을 이용하여 구조물의 고유진동수가 바뀌더라도 그 진동수를 실시간으로 추정할 수 있는 알고리즘을 구현하였다. 또한 진동수 추정 알고리즘이 가지는 한계점을 보완하기 위해 envelope detection 방법도 도입하였다. 이렇게 완성된 진동수 추정 알고리즘을 이산화된 PPF 제어기와 결합해 실시간으로 적응 가능한 적응 PPF 제어기를 개발하였다. 개발된 적응 PPF 제어기를 외팔보 구조물의 능동 진동 제어에 적용하고 실험을 수행하였다. 적응 PPF 제어기를 적용한 결과 구조물의 동특성이 변하여 고유진동수가 바뀌더라도 진동수 추정 알고리즘이 정확하게 고유진동수를 쫓아갈 수 있으며, PPF 제어기의 제어 진동수를 상황에 따라 변경시킴으로써 제어 성능을 유지할 수 있음을 실험결과를 통해 확인하였다. 따라서, 이 연구에서 제안한 적응 PPF 제어기가 구조물의 진동에 효과적임을 입증하였다.

References

- (1) Fanson, J. L. and Caughey, T. K., 1990, Positive Position Feedback Control for Large Space Structures, *AIAA Journal*, Vol. 4, No. 28, pp. 717~724.
- (2) Han, S. B., Heo, S. and Kwak, M. K., 2004, The Stability Conditions, Performance and Design Methodology for the Positive Position Feedback Controller, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 208~213.
- (3) Kim, K. Y., Kwak, M. K. and Heo, S., 2004, Implementation of PPF Controller Using Analog Circuit and Microprocessor, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 455~462.
- (4) Heo, S. and Kwak, M. K., 1998, Development of

Real-time Adaptive Positive Position Feedback Controller Using FFT Algorithm, *Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference*, pp. 855~861.

(5) Kim, K. Y., Bang, S. Y. and Kwak, M. K., 2005, Implementation of Auto-tuning Positive Position Feedback Controller Using DSP Chip and Microcontroller, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 15, No. 8, pp. 954~961.

(6) Kwak, M. K. and Shin, T. S., 1998, Real-time Tuning of the Active Vibration Controller by Genetic Algorithm, *Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference*, pp. 787~792.

(7) Heo, S. and Kwak, M. K., 2001, Real-time Multiple-parameter Tuning of PPF Controllers for Smart Structures by Genetic Algorithms, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 11, No.1, pp. 147~155.

(8) Lee, S. B., Kwak, M. K., Baek, K. H. and Heo, S., 2004, Real-time Active Vibration Control of Smart Structure Using Adaptive PPF Controller, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 267~275.

(9) So, H. C., 2000, Adaptive Algorithm for Direct Estimation of Sinusoidal Frequency, *Electronics Letters*, Vol. 36, No. 8, pp. 759~760.

(10) So, H. C. and Ching, P. C., 2004, Adaptive Algorithm for Direct Frequency Estimation, *IEE Proc. Radar Sonar Navig.*, Vol. 151, No. 6, pp. 359~364.



Sangbo Han received B.S. and M.S. degree in Naval Architecture from Seoul National University in 1981 and 1984. He then received his Ph.D. degree from the Dept. of Engineering Mechanics of Iowa State Univ. in 1988. He is currently a professor at the Department of Mechanical, Engineering of Kyungnam University in Changwon, Korea. His research interests are analysis and control of noise and vibration of mechanical systems.