

PZT를 이용한 다중 모드 강제 진동의 능동 제어

한상보*, ⁰윤신일

Active Control of Multi-Mode Forced Vibration Using PZT

Sangbo Han, Shin Il Yun

ABSTRACT

There has been a recent surge of research interest on the smart structure. This paper presents active vibration control scheme of multi-mode forced vibration using piezoceramic sensors/actuators. The control scheme adopted is the Positive Position Feedback control. Among various vibration control techniques, PPF control technique makes use of generalized displacement measurements to accomplish vibration suppression. Two independent controllers are implemented to control the first and the second modes of the beam under external excitation. Experimental results for various damping ratio and feedback gains of the PPF controllers are compared with respect to the control efficiency. The results indicate that steady state vibration under wideband excitation can be controlled effectively when multiple sets of PZT sensors/actuators were used with PPF control technique.

I. 서론

최근 첨단 기술의 발달로 구조물의 경량화와 소형화 또는 대형화가 구현될 수 있게 되었고, 이에 따른 문제점의 해결에 있어서 우주구조물과 같은 유연구조물뿐만 아니라 항공기, 자동차 등에 있어서 지진동, 저소음 환경 구축은 전체 설계인자 중 주요한 성능지수가 되고 있다.

구조물에 작용하는 과도한 진동은 운행성능의 저하, 피로 등의 원인이 되며 더우기 구조물의 경량화로 인한 구조 안전성을 개선하고 기계 구조물의 작동성능을 향상하기 위해서는 진동-소음의 저감을 위한 기술개발이 절실히 요구되고 있다.

진동 저감을 위한 방법으로는 크게 수동제어와 능동제어로 나눌 수 있다.

수동제어는 외부에서의 에너지 유입없이 구조물 자체의 동역학적 특성을 변화시킴으로써 응답을 조절하는 것을 말하며, 능동 진동 제어는 구조물이 감지 기로부터 획득한 환경 및 자극에 대한 정보를 제어부에서 해석, 분석하여 작동부를 통해 적절한 대응을 함으로써 구조물 설계의 목적인 안정성, 정숙성, 정확성 등을 유지하는 것을 총칭 하는 것이다. 최근에 기계구조물이 스스로 외부 환경 변화를 감지하고 이에 적절히 반응하도록 하여 구조물의 안정성 및 신뢰성을 확보하고자 하는 연구[1][2][3][4]가 활발히 진행되고 있으며 이러한 기능을 갖는 구조물을 지능 구조물이라 한다. 지능 구조물은 외부의 자극에 대처하는 다양한 기능을 갖추어야 하며 이 중 능동 진동제어능력이 가장 우선적으로 고려되어야 할 기능이다.

한상보* : 경남대학교 기계설계학과

⁰윤신일 : 경남대학교 대학원

이러한 지능구조물이 능동 진동제어를 수행하기 위해서는 복잡한 제어이론보다는 실제로 적용할 수 있는 감지기와 작동기의 개발이 필수적으로 요구되며 최근 다양한 종류의 지능재료를 이용해서 구조물의 진동을 능동적으로 제어하고자하는 연구가 수행되고 있다.

이중 특히 압전재료는 구조물에 부착이 용이하고 광범위한 가용 주파수 영역을 가지는 장점때문에 널리 사용되고 있다.

압전재료의 특징은 압전효과, 다시말하면 주어진 압전재료에 변형을 주게되면 전기적인 변화 즉 전하가 발생하고 반대로 재료에 전기를 가했을때에는 변형이 발생하는 효과를 동시에 가지고 있으므로 작동기및 감지기로 사용되는 지능재료이다.

이러한 압전재료중 PZT는 우주항공분야에서 필수적으로 요구되는 가벼운 중량비와 넓은 주파수대역, 높은 감도, 잡음성분이 적게 나타나고 열변화에 민감하지 않다는 장점과 높은 강성과 뛰어난 선형성으로 취성이 큰 단점에도 불구하고 센서및 액츄에이터로 널리 사용되고 있다.

본 연구에서는 강제 진동하에서 PZT를 이용한 능동 진동 제어의 가능성을 검토하기 위하여 지능 구조물의 실시간 제어가 가능한 PPF 제어기법을 도입하여 실험을 행하고 그 결과를 고찰하여 보았다.

II. PPF 제어 기법

본 연구에서 적용한 PPF 제어기법은 일반화변위를 게측하여 진동을 억제하는 방법으로 제어대상 주파수 영역을 확실하게 설정하여 제어할 수 있고 고유 진동 모드들이 밀집되어 있다하더라도 개개의 고유모드들을 독립적으로 제어할 수 있는 제어 기법이다.

PPF제어기의 운동방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\ddot{\xi} + 2\zeta\omega\dot{\xi} + \omega^2\xi = g\omega^2\eta \quad : \text{Structure}$$

$$\ddot{\eta} + 2\zeta_c\omega_c\dot{\eta} + \omega_c^2\eta = \omega_c^2\xi \quad : \text{Controller}$$

여기서

- ξ : 구조물의 모드 좌표
- ω : 구조물의 공진 주파수
- ζ : 구조물의 감쇠비
- η : 제어기의 모드 좌표
- ω_c : 제어기의 공진 주파수
- ζ_c : 제어기의 감쇠비
- g : 피이드백 항의 이득

다음 Fig.1은 운동방정식의 결과에 대한 제어계의 블록 선도를 나타낸다.

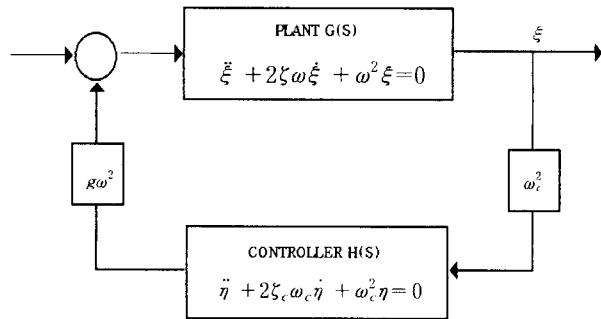


Fig. 1 Block diagram of positive position feedback control system.

이 운동방정식에 대하여 라플라스 변환을 취하면 제어대상 구조물과 제어기의 전달함수는

$$G(s) = \frac{\omega^2}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2}$$

$$H(s) = \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\zeta_c\omega_c s + \omega_c^2}$$

로 주어지며 Analog 제어기는 OP Amp를 사용하여 Fig.2와 같은 2차 저역 필터로 나타낼 수 있다.

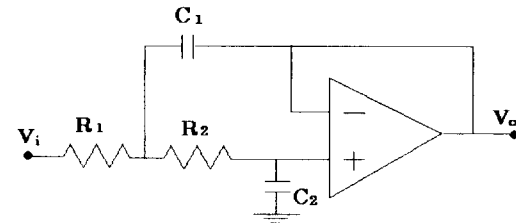


Fig. 2 The second order low pass filter representing PPF controller.

III. 실험장치 및 실험방법

유리 섬유 복합 재료(500×28×5mm)로 제작된 외팔보에 대한 다중 모드 능동 진동 제어를 위해서 64×20×0.7 mm PZT(압전세라믹) 8개를 외팔보에 접착하였고, PPF 제어기법을 적용하기 위해서 간단한 전자소자인 OP Amp를 사용하여 2차 지역 필터로 표현되어서는 Analog제어기를 각각의 모드에 대하여 독립적으로 구성하였다. 능동 진동 제어의 효과적 수행을 확인하기 위해서 적절한 가진 시스템이 선정되어야 하는데 기존의 점가진 시스템의 형태는 높은 감쇠율을 가지고 있으나 지지부에 대한 반작용력을 받는 등의 결점을 가지고 있으므로 본 연구에서는 강제 진동을 위한 가진기로서 한쌍의 PZT를 보의 고정단 쪽에 부착하였으며, 각각의 모드(1,2차)에 대한 센서와 액츄에이터를 차례로 부착하였다.

센서와 액츄에이터의 신호는 Dual Channel FFT 분석기(Onosoki CF-350)를 사용하여 분석하였고, 강제 진동을 위한 가진신호는 Dual Channel FFT 분석기(Onosoki CF-350)의 신호발생기를 통해 정현파 신호 및 0-100 Hz 대역폭의 sine-sweep 신호를 발생시켰다.

Table.1과 Fig.3은 가진기, 센서 및 액츄에이터로 사용된 PZT의 물성치와 실험의 개략적인 흐름을 나타낸 것이며, Table.2는 외팔보와 가진기 및 센서와 액츄에이터로 사용된 PZT의 제원을 보여주고 있다.

Description	Units	PZT
Lateral Strain Coefficient	m/V	1.8e-10
Young's Modulus	N/m ²	6.30e10
Shear Modulus	N/m ²	2.34e10
Poisson's Ratio	N/m ²	0.35

Table.1 Material properties for Navy Type PZT

(unit : mm)

Dimensions	BEAM	PZT
Length	500	64
Width	28	20
Thickness	5	0.7

Table.2. Dimensions of the cantilever and PZT

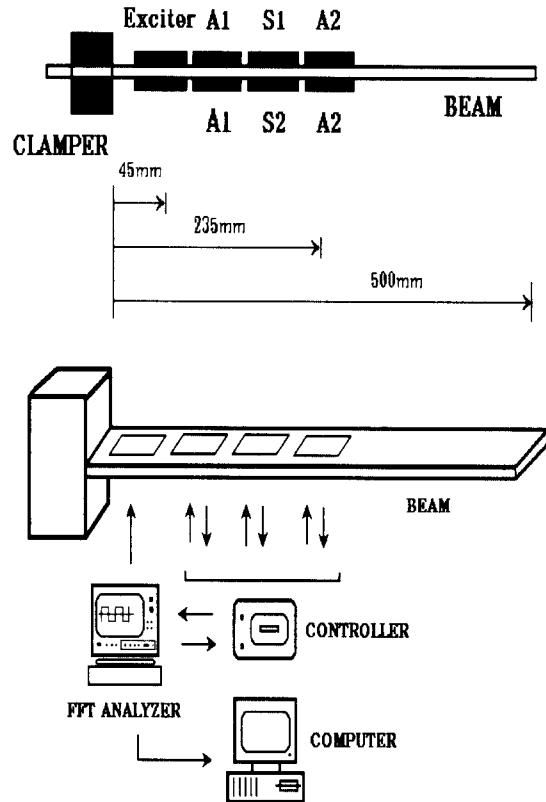


Fig.3 Schematics of experimental set-up.

IV. 실험 결과 및 고찰

실험 대상 구조물인 외팔보의 고유진동수는 1차 : 10.25 Hz , 2차 : 54.75 Hz 로 측정되었다.

다중 모드 제어를 위해 독립적인 제어기를 설치하여 각각의 모드에 대한 제어 성능을 비교하기 위하여 단일 주파수와 0-100 Hz의 대역폭을 가지는 sine-sweep 신호를 가진 신호로 사용하였으며, 제어기의 구성요소를 달리하여 감쇠비를 변화시키며 성능 비교를 해 보았다.

최종적으로 각각의 제어기를 동시에 적용시켰을 때의 정상 상태 응답을 비교하므로써 진동 제어의 성능이 어떻게 변화하였는지를 주파수 응답함수를 통하여 비교하여 보았다.

1) 1차 공진 모드 제어

단일 주파수 가진력에 대한 제어기의 효과를 파악하기 위하여 보를 1차 고유진동수인 10.25 Hz의 조화 가진력으로 진동시킨 후 제어기의 작동유무에 따른 진동응답을 파악하였다. 이때 제어기 Filter의 구성요소는 $C1=33 \text{ nF}$, $R1=5 \text{ M}\Omega$, $C2=2 \text{ nF}$, $R2=790 \text{ k}\Omega$ 이며 감쇠비는 $\zeta = 0.3586$ 로 비교적 높게 취하였고 필터의 Cut-off Frequency는 10.2621 Hz이다.

Fig.4에서보는것과 같이 정현파 가진시 공진 주파수에서 20dB 정도의 진동 저감 효과가 나타났음을 볼 수 있다. Fig.5는 제1제어기의 작동시 개회로와 폐회로의 주파수 응답함수를 각각 보여주고 있는데 1차 모드에 대한 진동 제어 효과를 뚜렷이 보여주고 있다.

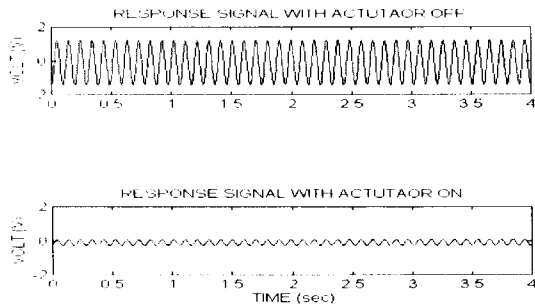


Fig. 4 Time history of vibration response of cantilever beam showing the effect of controller1.

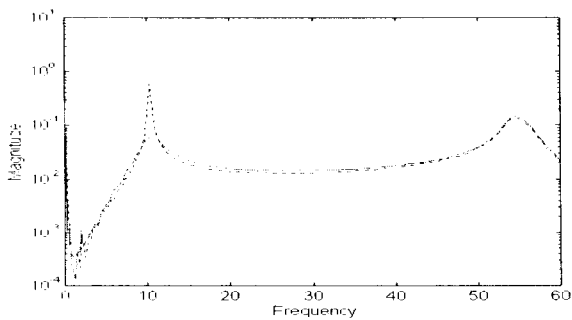


Fig. 5 Closed loop frequency response function of controller1 ON and OFF.
(: controlled)

2) 2차 공진 모드 제어

제2제어기(2차 모드를 제어하기 위한 제어기)에 대하여 2차 공진주파수에 해당하는 단일 주파수 가진 신호를 가했을 경우의 대한 정상 상태 응답을 시간영역에서 고찰하였으며, 이 때의 Filter의 구성요소는 $C1=33 \text{ nF}$, $R1=5 \text{ M}\Omega$, $C2=0.1 \text{ nF}$, $R2 = 492 \text{ k}\Omega$ 이며 감쇠비는 $\zeta = 0.0964$ 로 제1제어기에 비해 상당히 낮은 값을 선택하였다. Fig.6에서 보는바와 같이 30 dB 정도의 진동 억제 효과가 있음을 파악하였다. Fig.7은 제2제어기의 작동시 개회로와 폐회로의 주파수 응답함수를 보여주며 이때의 제어기 필터의 Cut-off Frequency는 54.4831 Hz이다.

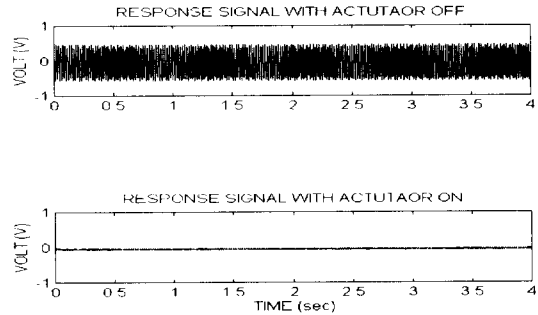


Fig. 6 Time history of vibration response of cantilever beam showing the effect of controller2.

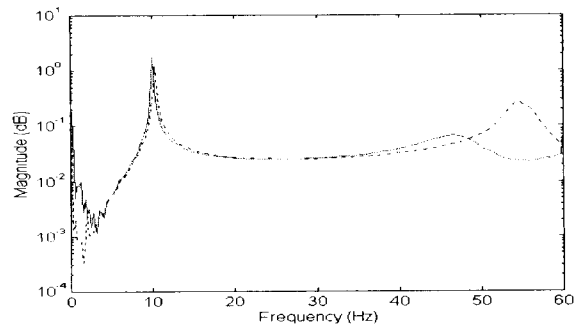


Fig. 7 Closed loop frequency response function of controller2 ON and OFF.
(- : controlled)

3) 다중 모드 제어 (광대역 진동 제어)

독립적인 1,2차 공진 모드 제어에서 알 수 있듯이 보상의 Cut-off Frequency와 제어 대상 구조물의 고유진동수가 일치하는 경우에는 강제진동의 경우에 대해서도 적용된 제어기가 우수한 제어성능을 발휘함을 알 수 있었고, 제어기의 감쇠비가 적을수록 해당 모드 진동에 대한 제어성능이 뛰어난 것을 알 수 있었다.

다중 모드 진동제어를 위해 단일 주파수 형태의 가진신호가 아니라 0-100Hz의 대역폭을 가지는 sine-sweep 신호를 입력신호로 가하고 2개의 제어기를 동시에 작동시킨 경우의 제어성능을 비교하면 Fig.8와 Fig.9과 같이 나타난다.

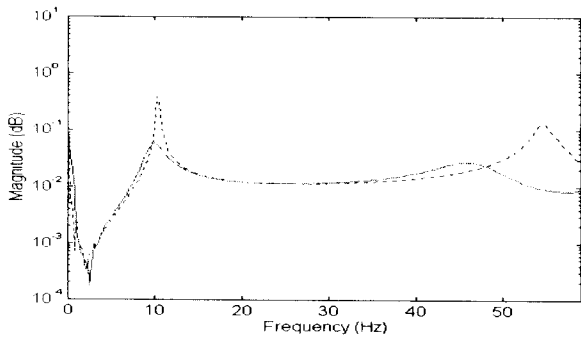


Fig. 8 Frequency response function of controllers with controller ON and OFF. (- : Controlled)

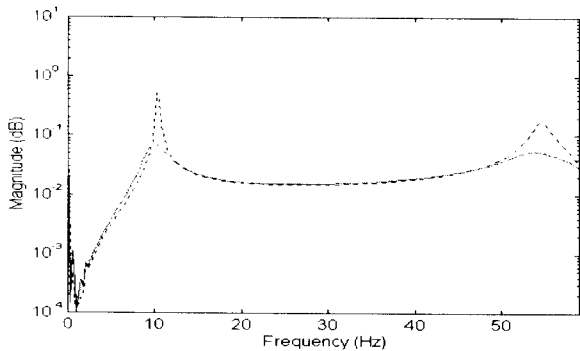


Fig. 8 Frequency response function of controllers with controller ON and OFF. (- : Controlled)

Fig.8과 Fig.9는 0-100Hz의 대역폭을 가지는 입력 신호에 대한 보의 응답에 대한 주파수 응답함수를 나타낸 것이다.

Fig.8은 Fig.4와 Fig.6에 주어진 독립적인 제어기를 동시에 작동 시켰을 경우에 대한 제어성능을 보여주고 있는데, 그 결과 보의 고유진동수와 제어기의 Cut-off Frequency가 일치하는 공진 주파수에서는 우수한 제어 성능(1차모드: 22dB, 2차모드: 30dB)을 보이긴 하였으나 능동 감쇠 영역의 협소성으로 인한 모드간의 연성관계로 인하여 특정 가진 주파수에 대해서는 진정한 제어를 수행하지 못함을 볼 수 있다.

Fig.9은 Fig.8의 경우와는 달리 제2제어기의 감쇠비($\zeta=0.8934$)의 값을 높게하여 진동 제어를 수행하여 보의 응답에 대한 주파수 응답함수를 나타낸 것으로 각각의 공진 모드에 대한 제어 성능은 조금 떨어지지만 넓은 주파수 영역에 걸쳐서 만족스러운 진동 제어를 수행 할 수 있는 것을 볼 수 있다.

즉, 감쇠비가 낮게 적용된 제2제어기에 대해서는 공진 주파수에서는 뛰어난 진동 제어 능력이 나타남을 파악할 수 있었지만 그 영향으로 인하여 또 다른 진동이 유발됨을 볼 수 있다.

이것은 제어기를 작동 시켰을 때 제어기 신호의 일부 신호가 다른 모드에 가해져서 에너지가 조금씩 흡수되어 일어난 것으로 이것은 여러 개의 모드가 밀집될수록 일어나기 쉬우며, 이 현상을 막기 위해서는 저주파 필터를 사용하여 고주파 모드에 의해 발생하는 신호를 걸러내는 방법이나 추가의 감지기, 작동기를 설치하여 원하는 주파수 성분의 신호만 분리하여 제어하는 방법이 있다.

본 연구에서 적용한 PPF 제어 기법은 공진 주파 (보의 고유진동수와 제어기의 Cut-off Frequency가 일치하는 주파수)에서는 우수한 제어 성능을 발휘하며, 제어기의 감쇠비가 작을수록 그 성능이 우수함을 알 수 있다.

광대역 주파수 가진 신호에 대한 경우, 감쇠비가 작을수록 제어능력은 뛰어나지만 또 다른 진동을 유발 할 수 있으므로 시스템의 안정성을 위하여 적절한 감쇠비의 선정이 중요하다.

V. 결론

이상과 같이 강제 진동에 대한 다중 모드 진동 제어를 실험적으로 파악하기 위해서 설치가 용이하고 작동기의 동적 거동에 의해 불안정해지지 않으면서 폐회로 안정성이 자동적으로 보장되는 제어기법인 PPF 제어 기법을 적용하였으며, 센서와 액츄에이터로는 압전재료의 일종인 PZT를 사용하여 정상상태 가진력에 대한 보의 응답을 고찰해 보았다.

단일 주파수 가진 신호를 적용하였을때의 정상 상태 응답은 각각의 공진 모드에 대해 제어기의 Cut-off Frequency와 보의 고유진동수가 정확히 공조되는 주파수에서 최적의 진동 제어 능력이 발휘되며, 제어기의 감쇠비 선택에 있어서는 감쇠비가 낮을수록 제어 성능이 우수함을 실험적으로 파악할 수 있었다.

다중 모드 진동에 대한 제어를 위하여 광대역 주파수 성분의 가진 신호를 사용하여 정상 상태 응답을 살펴본 결과 각각의 모드에 대한 센서 및 액츄에이터를 설치하고 독립적인 제어기를 적용하고 계의 안정성을 유지할 수 있는 이득값을 설정하면 넓은 주파수 영역에 대해서도 우수한 진동 제어 성능 발휘함을 알 수 있었다.

또한, 제어 모드의 수와 센서/액츄에이터 수가 동일한 경우 제어기의 감쇠비를 크게 해 줌으로써 공진 모드에서의 제어 성능은 다소 떨어지더라도 넓은 영역에 걸친 주파수 성분의 가진력에 대해서 만족스러운 제어 효과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있었다.

VI. 참고 문헌

[1] M. K. Kwak, K. K. Denoyer, "Dynamic Modelling and Vibration Suppression of a Slewing Structure Utilizing Piezoelectric Sensors and Actuators." Journal of Sound and Vibration, 1996, Vol. 189, No 1, pp 13-31.

[2] K. O. Prakah-Asante, K. C. Craig, "The Application of Multi-Channel Design Methods for Vibration Control of an Active Structure." Smart Mater. Struct, 1994, Vol. 3, pp 329-343.

[3] C. Liang, C. A. Rogers, "Design of Shape Memory Alloy Actuators." Journal of Mechanical Design, 1992, Vol. 114, pp 223-230.

[4] Bronowicki, A.J., Betros, R.S. and Hagood, N.W., 1993, "Active Damping Using Piezoceramics", SPIE's 1993 North American Conference on Smart Structures, Short Course Notes.

[5] P. Akella, X. Chen, W. Cheng, D. Hughes, J. T. Wen, "Modeling and Control of Smart Structures with Bonded Piezoelectric Sensors and Actuators.", Smart Mater. Struct, 1994, Vol. 3, pp 344-353.

[6] 김문현, 강영규, 박현철, 황운봉, 한경섭. "압전 감지기/작동기를 이용한 복합적층판의 능동진동제어." 대한기계학회, 1995, 추계학술대회논문(1), pp 588 - 562.

[7] 박노준, 최승복, 정재천, "형상기억합금 작동기를 이용한 유연 구조물의 진동 및 추적 제어", 대한기계학회, 1995, 추계학술대회논문(1), pp.563 - 567

[8] M. K. Kwak, D. Sciulli, "Fuzzy-Logic Based Vibration Suppression Control Experiments on Active Structure." Journal of Sound and Vibration, 1996, Vol. 191, No 1, pp 15-28

[9] 박문규, "압전재료를 이용한 지능구조물의 능동진동제어", 한국소음진동공학회지, 1995, 제 5권 제3호, pp. 292 - 302.

[10] Fanson, J.L. and Caughey, T.K., 1987, "Positive Position Feedback Control for Large Space Structures". Proceedings of 28th Structural Dynamics Conference, Monterey, CA, pp. 588 - 598.