

압전 감지기와 작동기를 이용한 양단 고정체의 능동 진동 제어

한상보*, 광문규**, ⁰최이호, 윤신일***

Active Vibration Control of Fixed-Fixed Beam Using Piezoelectric Sensor and Actuator

Sangbo Han, Moon Kyu Kwak, Ei Ho Choi, Shin Il Yun

ABSTRACT

Active control of forced vibration response of a fixed-fixed beam implementing PZT sensor/actuator was conducted. Among various control scheme, PPF control was chosen due to its amenability and natural robustness. For a single frequency excitation, the PPF control provided reasonable controllability with the appropriate damping ratio of the compensator. Without increasing actuator voltage, best controllability can be obtained by the exact tuning between the natural frequency of the structure and the cut-off frequency of the compensator. Even the multi-frequency excitation, the PPF provided good vibration suppression for corresponding mode of interest, even though residual modes should be controlled with independent compensators for each mode.

I. 서론

생활수준의 향상과 더불어 보다 쾌적한 환경을 바라는 인간의 욕구를 충족시키기 위한 산업기술의 적용이 그 어느 때 보다 크게 요구되고 있으며, 진동·소음의 저감을 위한 기술개발은 최근 업계의 현안 중의 하나로 대두되게 되었다. 특히, 능동진동 제어를 위한 최신 기법들이 많이 제안되고 있으며 진동제어의 목적에 적합한 기능성 소재를 발굴하기 위한 많은 연구가 행해지고 있다.

그중 최근 들어 압전재료를 이용한 지능구조물에 대한 연구가 활발하게 일어나고 있는데 이것은 구조물의 진동에 의해 일어나는 일련의 동적변형

을 압전재료를 이용하여 감지하고 제어할 수 있는 방법을 총칭한다. 이러한 압전재료의 특징은 주어진 변형을 받게되면 전기적인 변화 즉, 전하의 이동이 생기게되고 거꾸로 이 압전 재료에 전기를 통하게 되면 일정한 방향으로 변형이 일어나게 된다. 이러한 압전소재중 PZT는 다른 압전 재료에 비하여 높은 감도를 가지며, 잡음성분이 적게 나타나고 열변화에 민감하지 않다는 장점이 있으며, 또한 높은 강성과 뛰어난 선형성을 가지고 있으므로 센서 및 액츄에이터로서 가장 널리 사용되고 있다. 이제까지 PZT를 이용한 능동 진동 제어의 연구는 PZT가 센서 및 액츄에이터로 부착되었을 때의 제어 대상 구조물의 진동 특성파악에 대한 분야 [1][2][3][4]와 제어기의 설계에 대한 분야 [1][5][6]로 크게 분류할 수 있으며, 그 적용 범위는 유연

한상보* : 경남대학교 기계설계학과

광문규** : 동국대학교 기계공학과

⁰최이호 : 경남대학교 대학원

윤신일*** : 경남대학교 대학원

구조물의 자유 진동 제어에 관한 것이 대부분이었다. 아직까지 PZT가 유연 구조물의 자유 진동 제어에 주로 적용된 이유는 PZT 자체의 특성으로 인한 제약으로 대응량의 전하-변형률 소재가 개발되기까지는 어쩔 수 없는 한계로 생각된다. 본 연구는 강제 진동하에서 PZT를 이용한 능동 진동 제어의 가능성을 알아보기 위하여 양단 고정보에 가진기가 설치된 경우의 제어능력을 PPF(양의 위치 되먹임 제어)제어기의 적용을 예로하여 검토하여 보았다.

II. 이론적 배경

보를 가진하면 보의 진동에 의한 변형신호는 전하중폭기를 통하여 전기적 신호로 바뀌게 된다. 이때 진동하는 보에서 나오는 신호를 보상기를 통하여 다시 그 보에 적용을 시키게 되는데 이 때 사용되어지는 보상기는 보의 진동응답을 최소화 시켜야한다. 구조물에서 최소화된 진동 변위를 유지하기 위해서는 각 모드에서 최대감쇠가 보상기의 적용에 의해 이루어져야한다.

본 실험에서 사용되어진 보상기는 PPF (Positive Position Feedback)로서 PPF제어는 진동 제어를 위하여 일반화 변위에 대한 측정 정보를 이용하는 제어기법으로 폐회로 안정성이 자동적으로 보장된다는 장점이 있다. PPF보상기의 운동방정식은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\begin{aligned} \ddot{\xi} + 2\zeta\omega\dot{\xi} + \omega^2\xi &= g\omega^2\eta & \text{:Structure} \\ \ddot{\eta} + 2\zeta_c\omega_c\dot{\eta} + \omega_c^2\eta &= \omega_c^2\xi & \text{:Compensator} \end{aligned}$$

여기서

- ξ : modal coordinate of the structure
- ω : structural resonant frequency
- ζ : structural damping ratio
- η : modal coordinate of the compensator
- ω_c : compensator resonant frequency
- ζ_c : compensator damping ratio
- g : scalar gain applied to the feedback term

이 운동방정식에 대하여 라플라스 변환을 취하면 제어대상 구조물과 보상기의 전달함수는

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{\omega^2}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2} \\ H(s) &= \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\zeta_c\omega_c s + \omega_c^2} \end{aligned}$$

로 주어지며 이 운동방정식의 결과에 대한 폐회로 제어계의 블록 다이어그램은 Fig.1과 같고 이에 대한 Analog제어기는 OP Amp를 사용하여 Fig.2와 같은 2차 저역 필터로 표시할 수 있다.

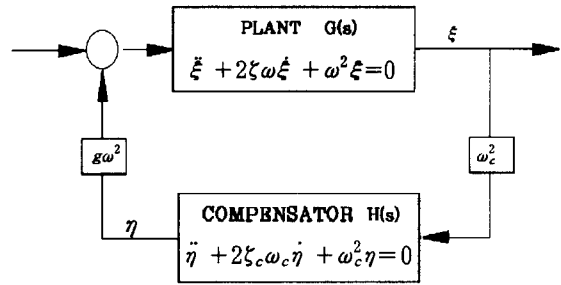


Fig.1 The Block Diagram of Positive Position Feedback Control System

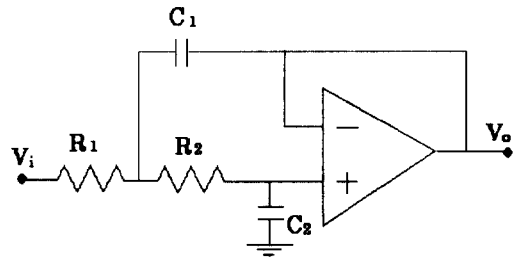


Fig.2 The Second Order Low Pass Filter Representing PPF Compensator

III. 실험 장치 및 방법

탄소 섬유 복합 재료의 30×800×1.5mm의 양단 고정보에 대하여 30×30×0.7 mm 와 30×38×0.7

mm의 NAVY type PZT를 각각 2개의 센서와 4개의 액츄에이터로 보에 접촉시켰으며 제어기는 HA17324 OP Amp를 이용한 회로로 구성하였다. 양단 고정보의 좌단 2/3 지점에 연결봉을 이용하여 가진기 (Vano type 1501)를 부착 시켰으며 부가 질량 효과를 배제하기 위하여 보에 전달하는 가진력을 측정하기 위한 힘측정기는 부착하지 않았다. 센서 및 액츄에이터로부터의 신호는 2채널 FFT 분석기(onosoki 301)를 사용하였으며 강제 진동을 위한 가진 신호는 정현파 신호와 0-50Hz 대역폭의 Sine-Sweep 신호를 병용하였다. 실험에 사용된 개략도는 Fig.3과 같다.

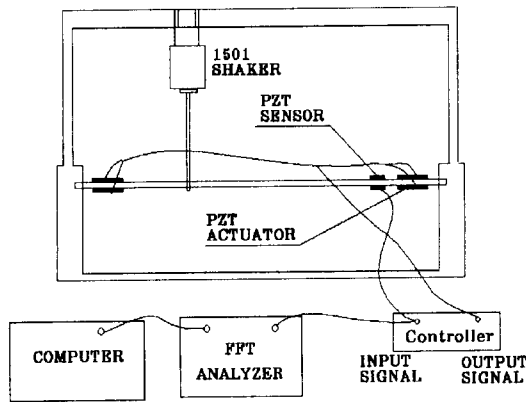


Fig.3 Schematics of Experimental Set-Up

IV. 결과 및 고찰

단일 가진력에 의한 양단 고정보의 정상 상태 진동에 대한 PPF 보상기의 제어 성능을 확인하기 위하여 가진기를 보와 체결한 상태에서의 보의 고유진동수를 측정하였다. 실험에 사용된 보의 강성이 매우 약한 재질로 구성되어 있기 때문에 보 자체만의 고유진동수와 가진기가 연결된 상태에서의 고유진동수는 많은 차이가 있다는 것을 알 수 있었으며 이와 같은 문제점이 강제 진동 제어의 이론적 해석에 큰 장애로 나타날 수 있다는 점을 인식하였다.

Fig.4는 가진기가 연결된 상태에서의 보의 기본 고유진동수 18.75 Hz로 가진한 경우 제어기가 작

동되지 않은 상태와 제어기가 작동한 상태의 진동 응답을 시간축에 대하여 표시한 것으로 제어기가 작동된 경우 정상상태 진폭이 1/2 정도밖에 감소되는 것을 보여주고 있다. 이 경우 제어기의 PPF 보상기의 개회로 주파수 응답함수는 Fig.5와 같이 주어지며 이 보상기의 Cut-Off frequency는 17.5 Hz이고 감쇠비는 0.589 이다.

제어성능을 보다 크게 하기 위하여 보상기의 감쇠비를 대폭 감소시키고 cut-off frequency를 18.75 Hz로 동조한 경우의 보상기에 대한 개회로 주파수 응답함수는 Fig.6과 같이 주어지고 이 제어기를 사용하였을 때의 정상 상태 진폭은 Fig.7과 같이 약 1/5 정도로 감소되는 것을 알 수 있다. PZT의 압전 성능을 강화시키기 위하여 제어기 내의 전하 증폭 회로의 이득을 증가시킨 경우의 제어기를 작동시킨 순간의 진동 제어 성능을 한 눈에 파악할 수 있는 그림이 Fig.8에 주어져 있는데 이 그림을 보면 제어기가 작동되는 순간부터 0.5초의 시간안에 1/10의 크기로 진동 제어가 이루어지며 완전한 제어가 이루어진 그 순간 후 다시 보정 오차가 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 현상이 자유진동 제어와 강제 진동 제어의 차이로 해석할 수 있으며 PPF를 통한 해결에는 현실적인 장애로 파악이 된다. 즉, 보다 나은 제어성능을 위하여 보상기의 감쇠비를 지나치게 줄이게 될 경우, 제어성능은 향상되나, 구조물의 진동 주파수와 정확히 동조에 어려움이 있다는 것이다. 본 실험에 사용된 3가지 제어회로의 특성치가 Table.1에 주어져 있다.

Table.1 Characteristics of 3 Types of Controllers Used in the Experiment

	Type A	Type B	Type C
Charge Amp gain	1	1	2.7
ω_c	109.9632 rad/sec	111.8733 rad/sec	116.228 rad/sec
ζ_c	0.5589	0.04	0.0309

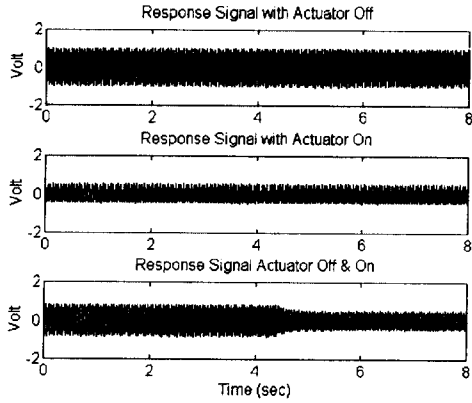


Fig.4 Comparison of Steady State Vibration Response of Fixed-Fixed Beam with Controller Off and On.

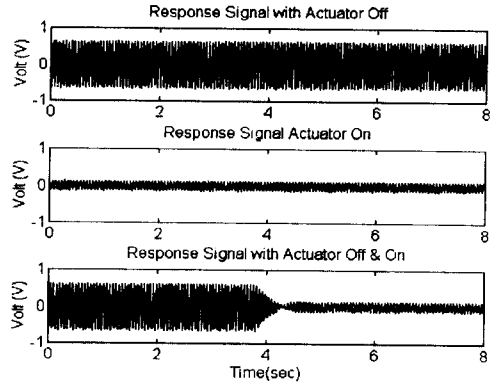


Fig.7 Comparison of Steady State Vibration Response of Fixed-Fixed Beam with Controller Off and On.

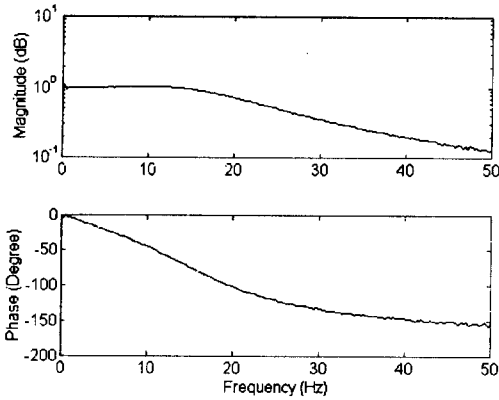


Fig.5 Bode Diagram of Frequency Response Function of PPF Compensator with Type A.

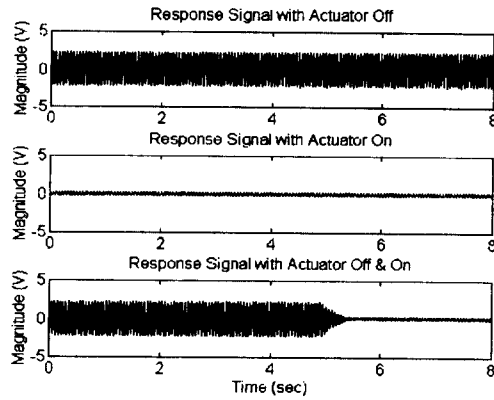


Fig.8 Time History of Vibration Response of Fixed-Fixed Beam Showing The Effect of Controller.

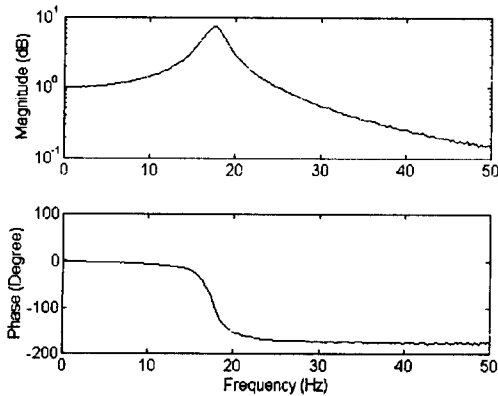


Fig.6 Bode Diagram of Frequency Response Function of PPF Compensator with Type B.

단일 진동 모우드의 제어와는 달리 다중 진동 모우드를 제어하기 위해서는 각각의 독립적인 진동 모형을 제어하기 위한 별개의 센서와 액츄에이트 쌍을 배치하여야 하고 이 센서/액츄에이트 쌍을 제어하는 독립된 PPF를 구성하여야 한다.

본 실험에서는 다양한 주파수 성분의 가진력이 주어지는 정상상태 진동에 대하여 PPF제어의 성능을 검토하기 위한 연구의 출발점으로 보를 sine-sweep시켰을 경우 1차 모우드에 해당하는 PPF 보상기만을 사용했을 때의 제어 성능을 실험적으로 파악하여 보았다.

실험에 사용된 양단 고정정보는 PZT 센서와 액츄에이트를 부착시킨 상태에서 기본 고유 진동수가

16.5 Hz, 2차 고유진동수가 48.5 Hz로 주어진다. 그러나 가진력을 제공하기 위하여 가진기를 부착시킨 상태에서는 기본 진동수가 18.75 Hz, 2차 고유 진동수가 37.5 Hz로 주어진다. 이는 실험적으로 파악할 수 있었다. 이는 부착된 가진기가 보의 진동과 연성효과를 일으키기 때문이며 구조물의 진동 특성 파악을 위한 이론적 접근에서 반드시 유념해야 할 사항이다.

가진력을 0-50 Hz의 대역폭을 가지는 sine-sweep 신호로 제공하였을 경우 입력신호, 제어기가 작동되지 않은 상태에서의 보의 진동 응답, 제어기를 작동시킨 상태에서의 보의 진동 응답에 대한 시간 영역에서의 신호가 Fig.9에 주어졌다. Fig.9에 주어진 진동 응답을 살펴보면 sine-sweep 신호의 주파수가 보의 공진 주파수에 해당하는 영역을 지날 때 보의 진동 응답이 크게 나타나는 것을 알 수 있으며, controller의 역할도 1차 모드에 국한된다는 것을 알 수 있다. 제어기가 작동되지 않았을 때와 제어기가 작동되었을 때의 보상기의 폐회로 주파수 응답함수를 비교하면 Fig.10과 같이 주어진다. Fig.10의 주파수 응답함수에서 28Hz 부근의 공진점은 연결봉을 통하여 양단 고정정보와 연결된 가진기 자체의 고유진동수에 해당하는 점이다. sine-sweep 형태의 가진력이 가해지는 경우에도 기준 진동형에 해당하는 PPF 제어기의 성능이 확연히 나타나는 것을 알 수 있다. 이와같은 단일 제어기의 성능확인을 통하여 독립된 다수의 PPF 제어기를 사용하는 경우의 다중 모드에서의 진동제어가 가능하리라 판단되며 이에 대한 연구를 진행 중이다.

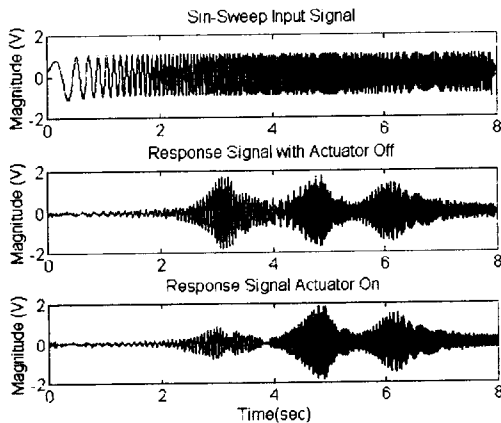


Fig.9 Time History of Input Sine-sweep Signal and Vibration Response of Fixed-Fixed Beam with Controller Off and On.

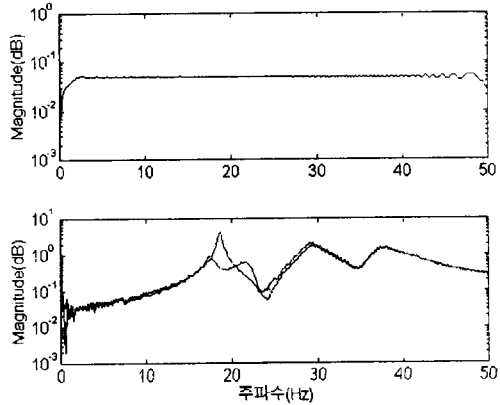


Fig.10 Power Spectral Density Function of Input Sine-sweep Signal and Magnitude of Closed Loop Frequency Response function of Compensator with Controller Off and On.

V. 결론

정상 상태 진동 제어에 대하여 PZT를 센서와 액츄에이터로 사용하고 PPF 보상기를 제어기로 사용한 경우 단일 주파수의 강제 진동에 대하여는 보상기의 고유 진동수와 구조물의 진동 주파수가 정확히 공조되는 경우 우수한 제어 성능이 보장된다는 것을 확인할 수 있었다. 또한, PZT의 구동을 위한 입력 전압이 충분히 큰 경우, 분극 현상이 일어나지 않는 범위 내에서의 큰 진폭 제어가 가능하다는 것을 실험적으로 구현하였다.

다중 주파수 가진력에 대한 경우 해당 모드에서의 진동 제어 성능은 보장되나, 주어진 주파수 대역 내에서의 모든 모드를 제어하기 위해서는 각각의 모드에 해당하는 제어기를 독립적으로 설치하여야 하며 이에 대한 연구가 더 필요함을 알 수 있었다.

참고문헌

- [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] 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.
- [4] C. Liang, C. A. Rogers, "Design of Shape Memory Alloy Actuators." *Journal of Mechanical Design*, 1992, Vol. 114, pp 223-230.
- [5] 강영규, 박현철, 황운봉, 한경섭. "압전세라믹 감지기/작동기가 부착된 복합적층보의 모드감쇠 해석." *대한기계학회*, 1995, 추계학술대회논문(1), pp 407 - 411.
- [6] 김문현, 강영규, 박현철, 황운봉, 한경섭. "압전 감지기/작동기를 이용한 복합적층판의 능동 진동 제어." *대한기계학회*, 1995, 추계학술대회논문(1), pp 588 - 562.
- [7] 유정열, 강우영, 김승조. "이방성 압전재료를 이용한 복합재료 평판의 진동 제어에 관한 연구." *한국복합재료학회지*, 제9권, 제1호, 1996. 3, pp 17-26.
- [8] 박상옥, 박현철, 황운봉, 한경섭. "형상기억합금 선을 이용한 복합적층보의 능동 강성제어", *대한기계학회*, 1995, 추계학술대회논문(1), pp 568-573.
- [9] 박노준, 최승복, 정재천, "형상기억합금 작동기를 이용한 유연 구조물의 진동 및 추적 제어", *대한기계학회*, 1995, 추계학술대회논문(1), pp.563 - 567
- [10] 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.