

〈논 문〉

# PPF 제어기법을 이용한 다중 모드 강제 진동의 능동 진동 제어

Active Vibration Control of Multi-Mode Forced Vibration  
Using PPF Control Technique

한 상 보\* · 광 문 규\*\* · 윤 신 일\*\*\*

Sangbo Han, Moon K. Kwak and Shin Il Yun

(1997년 6월 19일 접수 ; 1997년 10월 10일 심사완료)

**Key Words** : Piezoceramic (압전 세라믹), PPF (Positive Position Feedback, 양의 위치 되먹임) Generalized Displacement (일반화 변위) , Cut-off Frequency (차단 주파수)

## ABSTRACT

This paper presents active vibration control scheme of multi-mode forced vibration using piezoceramic sensors and actuators. The control scheme adopted is the Positive Position Feedback (PPF) control. Among various vibration control techniques, PPF control technique makes use of generalized displacement measurements to accomplish the 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 ratios and feedback gains of the PPF controllers are compared with respect to the control efficiency. The results indicate that steady state vibration under wide band excitation can be controlled effectively when multiple sets of PZT sensors and actuators were used with PPF control technique.

## 1. 서 론

최근 공학분야에 있어서 첨단 기술과 소재의 발달은 구조물의 경량화와 소형화 또는 고속화의 구현을 가능하게 하였고, 현대 산업의 발달에 많은 공헌을 해 오고 있다. 특히 우주 항공 산업분야와 같은 공학분야에서 구조물의 경량화 기술은 빼놓을 수 없는 중요한 개발과제의 하나이다. 구조물에 작용하는 파

도한 진동은 운행성능의 저하, 피로 등의 원인이 되며 더욱이 구조물의 경량화로 인한 구조 안전성을 개선하고 기계 구조물의 작동성능과 작업환경을 향상하기 위해서는 진동-소음의 저감을 위한 기술개발이 절실히 요구되고 있다. 진동 저감을 위한 방법으로는 크게 수동제어와 능동제어로 나눌 수 있다.

수동제어는 외부에서의 에너지 유입 없이 구조물 자체의 동역학적 특성을 변화시킴으로써 응답을 조절하는 것을 말하며, 능동 진동 제어는 구조물이 감지 기로부터 획득한 환경 및 자극에 대한 정보를 제어 부에서 해석, 분석하여 작동부를 통해 적절한 대응을 함으로써 구조물 설계의 목적인 안정성, 정숙성, 정확성 등을 유지하는 것을 총칭하는 것이다. 최근

\* 정희원, 경남대학교 공과대학 기계공학부

\*\* 정희원, 동국대학교 공과대학 기계공학부

\*\*\* 정희원, 경남대학교 대학원

에 기계구조물이 스스로 외부 환경 변화를 감지하고 이에 적절히 반응하도록 하여 구조물의 안정성 및 신뢰성을 확보하고자 하는 연구<sup>(1~5)</sup>가 활발히 진행되고 있으며 이러한 기능을 갖는 구조물을 지능 구조물이라 한다. 지능 구조물은 외부의 자극에 대처하는 다양한 기능을 갖추어야 하며 이중 능동 진동 제어능력이 가장 우선적으로 고려되어야 할 기능이다.

이러한 지능구조물이 능동 진동 제어를 수행하기 위해서는 복잡한 제어이론보다는 실제로 적용할 수 있는 감지기와 작동기의 개발이 필수적으로 요구되며 최근 다양한 종류의 기능성 소재들을 이용해서 구조물의 진동을 능동적으로 제어하고자 하는 연구<sup>(6~16)</sup>가 수행되고 있다.

이중, 특히 압전재료는 구조물에 부착이 용이하고 광범위한 가용 주파수 영역을 가지는 장점 때문에 널리 사용되고 있다.

압전재료의 특징은 압전효과, 다시 말하면 주어진 압전재료에 변형을 주게되면 전기적인 변화 즉 전하가 발생하고 반대로 재료에 전기를 가했을 때에는 변형이 발생하는 효과를 동시에 가지고 있으므로 작동기 및 감지기로 사용되는 기능성 재료이다.

이러한 압전재료중 PZT(Lead-Zirconia-Titanium)는 우주항공분야에서 필수적으로 요구되는 가벼운 중량비와 넓은 주파수대역을 가지며 감도가 높고 열 변화에 민감하지 않다는 장점과 높은 강성과 뛰어난 선형성때문에 취성이 큰 단점에도 불구하고 감지기와 작동기로 널리 사용되고 있다.<sup>(6~8,15)</sup>

이제까지 PZT를 이용한 능동 진동 제어의 연구는 PZT가 감지기 및 작동기로 부착되었을때의 제어 대상 구조물의 진동 특성 파악에 대한 분야<sup>(1,2,7)</sup>와 제어기의 설계에 대한 분야<sup>(4,5,9,11)</sup>로 크게 분류할 수 있으며, 그 적용 범위는 유연 구조물의 과도 진동 제어에 관한 것이 대부분이었다. 아직까지 PZT가 유연 구조물의 과도 진동 제어에 주로 적용된 이유는 PZT 자체의 특성으로 인한 제약으로, 대용량의

전하-변형을 소재가 개발되기까지는 어쩔 수 없는 한계로 생각된다. 본 연구에서는 외부 가진력이 지속적으로 작용하는 다중 주파수 성분의 강제 진동하에서도 PPF제어 기법이 구조물의 능동 진동 제어 성능을 발휘할 수 있는지를 파악하기 위하여 과도 진동 제어 성능이 입증된 PZT 감지기 및 작동기가 부착된 외팔보를 대상으로 실험을 행하고, 최적의 강제 진동 제어 성능이 구현되는 PPF 제어기<sup>(2,4,12)</sup>의 조건에 대하여 비교 검토 하였다.

## 2. PPF 제어 기법

진동하는 구조물에 대한 진동 저감을 위한 제어기법에는 다양한 기법들이 연구되고 있으며, 최근에는 DSP(Digital-Signal-Processor)를 이용한 디지털 제어에 관한 연구가 널리 이루어지고 있다. 많은 제어 기법들 중 본 연구에서는 실시간 제어 능력이 뛰어나고 하드웨어 구성이 가장 실용적인 PPF 제어 기법을 적용해 보고자 한다.

본 연구에 적용한 아날로그 제어기법인 PPF제어 기법은 일반화변위를 계측하여 진동을 억제하는 방법으로 제어대상 주파수 영역을 확실하게 설정하여 제어할 수 있고 고유 진동 모드들이 밀집되어 있다 하더라도 다수의 PPF 제어기를 사용하여 개개의 고유모드들을 독립적으로 제어할 수 있는 장점이 있다.

PPF제어 기법의 원리는 1자유도 진동계를 나타내는 2차 미분 방정식을 살펴보면 그 원리가 쉽게 이해되어지는데, 이 경우 각각의 모드에 대한 PPF 제어기의 운동방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\ddot{\xi} + 2\zeta\omega\xi + \omega^2\xi = g\omega^2\eta \quad \text{: Structure} \quad (1)$$

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

여기서

- $\xi$  : 구조물의 모달 좌표
- $\omega$  : 구조물의 고유진동수
- $\eta$  : 제어기의 모달 좌표
- $\zeta$  : 구조물의 감쇠비
- $\omega_c$  : 제어기의 고유진동수
- $\zeta_c$  : 제어기의 감쇠비
- $g$  : 피이드백 항의 이득

이 운동방정식을 토대로 폐회로 제어계의 블록선도를 구성하면 Fig. 1 과 같이 나타낼 수 있으며

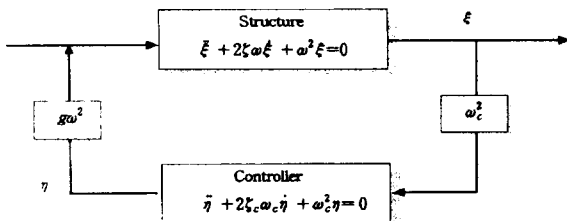


Fig. 1 Block diagram of PPF control sysetm

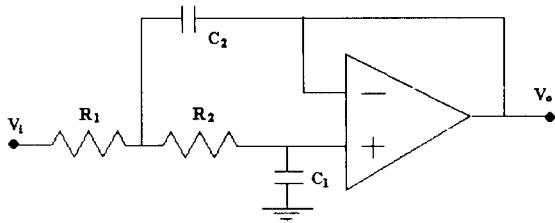


Fig. 2 Second order low pass filter representing PPF controller

제어 대상 구조물과 제어기의 전달 함수는 각각

$$G(s) = \frac{\omega^2}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2} \quad : \text{Structure} \quad (3)$$

$$H(s) = \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\zeta_c\omega_c s + \omega_c^2} \quad : \text{Controller} \quad (4)$$

로 주어지게 되는데, 결국 제어기의 전달함수는 2차 저역 필터와 같은 형태로 표시되어짐을 알 수 있다.

이를 토대로 간단한 전자소자인 OP Amp를 이용하여 2차 저역 필터를 구성하면 Fig. 2와 같이 표시되어진다.

저주파통과필터 형태로 표시되는 PPF제어기에 대한 회로 구성도 Fig. 2의 출력전압과 입력전압의 비는 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}{s^2 + \frac{C_2 (R_1 + R_2)}{R_1 R_2 C_1 C_2} s + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (5)$$

그리고 식 (4)에 주어진 제어기의 전달함수식과 비교하면 제어기의 차단주파수와 감쇠비는 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$\omega_c = \sqrt{\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (6)$$

$$\zeta_c = \sqrt{\frac{C_2 (R_1 + R_2)^2}{4 R_1 R_2 C_1}} \quad (7)$$

또한 저주파통과필터는 차단주파수에서 위상이 90° 바뀐다는 사실을 고려해 볼 때 제어기의 주파수를 구조물의 고유진동수와 일치시키면 인위적인 감쇠가 증가하여 진동 제어 성능이 우수하게 발휘된다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 광대역 주파수의 외부 입력이 존재하는 강제 진동하에 놓인 구조물의 진동 제어를 위해 PPF제어 기법을 적용하였는데 최적의 제어 조

건을 파악하기 위해 제어기의 차단주파수와 감쇠비의 선정에 따른 정상 상태 진동 제어 성능을 비교해 보았다.

### 3. 실험장치 및 실험방법

500×28×5 mm의 유리 섬유 복합 재료로 제작된 외팔보에 대한 다중 모드 능동 진동 제어를 위해서 64×20×0.7 mm 규격의 PZT 8개를 외팔보에 접착하였고, PPF 제어기법을 적용하기 위해서 간단한 전자소자인 OP Amp를 사용하여 2차 저역 필터로 표현되어지는 Analog제어기를 각각의 모드에 대하여 독립적으로 구성하였다. 이때 제어기를 구성함에 있어서 감지기로부터의 신호를 전압형태로 받아들여야 하는데 PZT로부터 발생하는 전하를 전압의 형태로 바꾸어 증폭하는 전하증폭회로를 추가하였으며, 작동기를 구동하기 위한 반전 증폭 회로를 OP Amp로 구성하여 증폭비를 5배정도로 고정하였다. 또한 능동 진동 제어의 효과적 수행을 확인하기 위해서 적절한 가진 시스템이 선정되어야 하는데 진동 실험용으로 보편적으로 사용되는 상용 가진기를 사용한 가진 시스템의 경우 지지부에 대한 반작용력을 받는 등의 결점을 가지고 있으므로 본 연구에서는 강제 진동을 위한 가진기로서 한 쌍의 PZT를 보의 고정단 쪽에 부착하였으며, 보의 1, 2차 각각의 모드에 대한 감지기과 작동기를 차례로 부착하였다.

감지기과 작동기의 신호는 Dual Channel FFT 분석기( Onosoki CF-350 )를 사용하여 분석하였고, 강제 진동을 위한 가진신호는 Dual Channel

Table 1 Material properties for Navy Type PZT

Lateral strain coefficient	1.8 e-10 m/V
Young's modulus	6.30 e10 N/m <sup>2</sup>
Shear modulus	2.34 e10 N/m <sup>2</sup>
Poisson's ratio	0.35

Table 2 Dimensions of the cantilevered beam and attached PZT

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

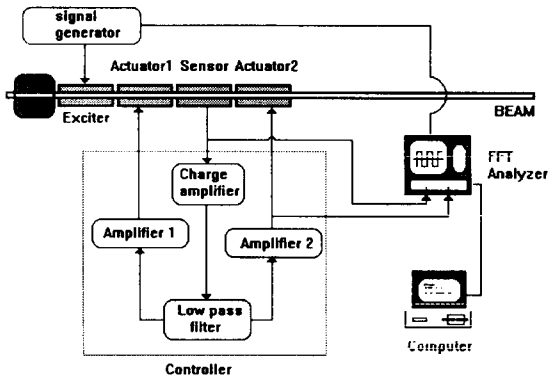


Fig. 3 Positions of sensors/actuators and schematics of experimental set-up

FFT 분석기( Onosoki CF-350 )의 신호발생기를 통해 정현파 신호 및 다중 주파수 성분의 신호인 sine-sweep 신호를 발생시켰다. 보의 끝단 변위는 감지기에 계측된 외팔보의 변형으로부터 보의 제원과 PZT의 횡방향 전하계수  $d_{31}$ 을 이용하여 환산하였다.

Table 1은 가진기, 감지기 및 작동기로 사용된 PZT의 물성치를, Table 2는 외팔보와 가진기 및 감지기와 작동기로 사용된 PZT의 제원을 보여주고 있으며 Fig. 3은 실험의 개략적인 장치도를 나타낸 것이다.

#### 4. 실험 결과 및 고찰

실험 대상 구조물인 PZT가 부착된 외팔보의 고유진동수는 1차:10.25 Hz, 2차:54.75 Hz로 측정되었다. 다중 모드 제어를 위해 독립적인 제어기를 설치하여 강제 진동 하에서의 제어 성능을 비교하기 위하여 단일 주파수 성분의 sine 신호와 다중 주파수 성분을 가지는 sine-sweep 신호를 가진 신호로 사용하였으며, 최적 제어 조건을 파악하기 위하여 제어기의 구성요소를 달리하여 제어기의 차단주파수와 감쇠비 선정에 따른 제어 성능을 비교해 보았다. 최종적으로 각각의 제어기를 동시에 적용시켰을 때의 정상 상태 응답을 비교하므로써 강제 진동 하에서의 진동 제어의 성능이 어떻게 변화하였는지를 주파수 응답함수를 통하여 비교하여 보았다.

##### 4.1 1차 공진 모드 제어

단일 주파수 가진력에 대한 제어기의 효과를 파악

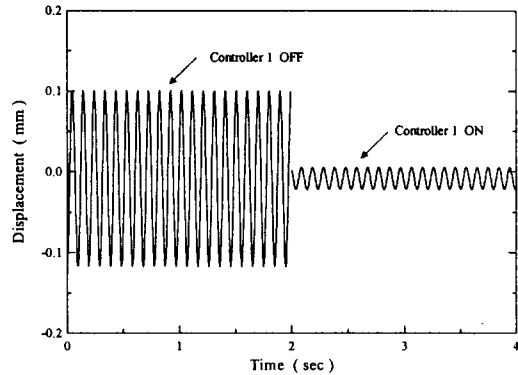


Fig. 4 Displacement at the tip of the cantilevered beam with controller 1 off and on when excited at 10.25 Hz

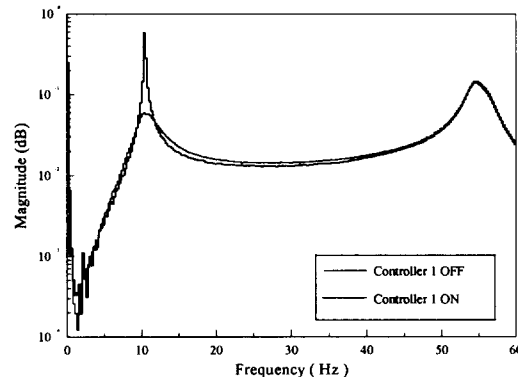


Fig. 5 Frequency response functions of the beam with controller 1 off and on

하기 위하여 보를 1차 고유진동수인 10.25 Hz의 조화 가진력으로 진동시킨 후 제어기의 작동유무에 따른 진동응답을 파악하였다. 이때 1차 모드를 제어하기 위한 제1제어기 필터의 구성요소는  $C1=33$  nF,  $R1=5$  M $\Omega$ ,  $C2=2$  nF,  $R2=790$  k $\Omega$ 이며 감쇠비는  $\zeta_c = 0.36$ 으로 비교적 높게 취하였고 필터의 차단 주파수는 10.26 Hz이다.

Fig. 4는 제1제어기의 작동유무에 따른 실험 대상 외팔보의 끝단의 처짐을 보여주는 것으로 뚜렷한 제어 효과가 나타남을 보여주고 있다. 또한 Fig. 5는 공진 주파수 가진에 따른 제1 제어기의 작동유무에 따른 보의 주파수 응답함수를 각각 보여주고 있는데 1차 모드에 대하여 20dB 정도의 진동 제어 효과가 뚜렷이 나타남을 보여주고 있다.

### 4.2 2차 공진 모드 제어

2차 공진 모드를 제어하기 위해 2차 공진주파수에 해당하는 단일 주파수 가진 신호를 가했을 경우, 제2 제어기의 작동유무에 따른 보의 정상 상태 응답을 시간영역에서 고찰하였으며, 이때의 필터의 구성요소는  $C1=33 \text{ nF}$ ,  $R1=5 \text{ M}\Omega$ ,  $C2=0.1 \text{ nF}$ ,  $R2 = 492 \text{ k}\Omega$  이며 감쇠비는  $\zeta_c = 0.1$ 로 제1제어기에 비해 상당히 낮은 값을 취하였고 제어기 필터의 차단주파수는  $54.48 \text{ Hz}$  이다. Fig. 6은 제어기의 작동 여부에 따른 2차 공진 모드 제어를 위하여 2차 공진 주파수로 가진된 외팔보의 끝단 처짐을 시간 영역에서 보여주고 있으며, Fig. 7은 제2제어기의 작동전후의 개루프와 폐루프의 주파수 응답함수를 보여주고 있는데 2차 공진 모드에서  $30\text{dB}$ 정도의 진동 제어 효과가 나타남을 파악 할 수 있다.

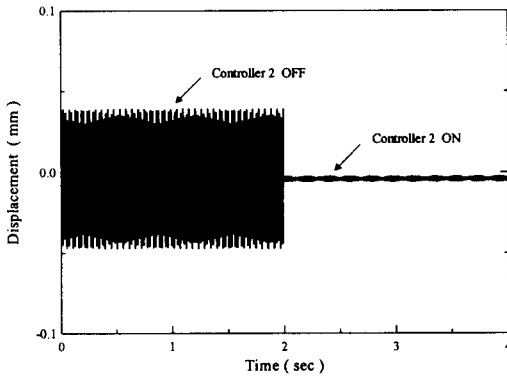


Fig. 6 Displacement at the tip of the cantilevered beam with controller 2 off and on when excited at  $54.75 \text{ Hz}$

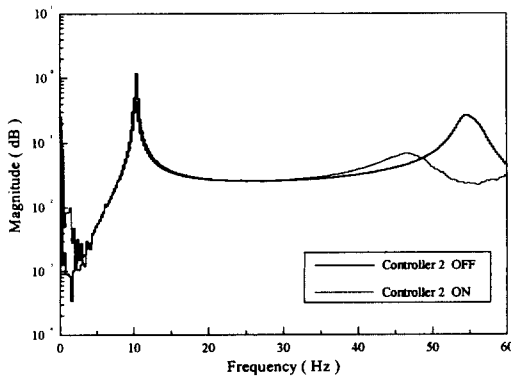


Fig. 7 Frequency response functions of the beam with controller 2 off and on.

### 4.3 다중 모드 제어 ( 광대역 가진 진동 제어 )

독립적인 1, 2차 공진 모드 제어에서 알 수 있듯이 제어기의 차단 주파수와 제어 대상 구조물의 고유진동수가 일치하는 경우에 강제진동의 경우에 대해서도 적용된 제어기가 우수한 제어 성능을 발휘함을 알 수 있었고, 제어기의 감쇠비는 적은 값을 가질수록 해당 모드 진동에 대한 제어성능이 우수하게 발휘됨을 알 수 있었다.

다중 모드 진동제어를 위해 단일 주파수 형태의 가진 신호가 아니라 다중 주파수 성분의 가진 신호인 sine-sweep 신호를 입력신호로 가지고 2개의 제어기를 동시에 작동시킨 경우의 제어성능을 확인하였다.

Fig. 8에 의하면 다중 주파수 성분의 가진력이 존재하는 경우에도 보의 고유진동수와 제어기의 차단 주파수가 일치하는 공진 주파수에서는 우수한 제어 성능(1차 모드:  $22 \text{ dB}$ , 2차 모드:  $30 \text{ dB}$ )을 보이긴 하였으나 가진 주파수 ( $45 \text{ Hz}$  부근)에 대해서는 진정한 제어를 수행하지 못함을 볼 수 있다.

즉, 감쇠비가 낮게 적용된 제2제어기에 대해서는 공진 주파수에서는 뛰어난 진동 제어능력이 나타남을 파악할 수 있었지만 그 영향으로 인하여 또다른 진동이 유발됨을 볼 수 있다. 이것은 제어기를 작동시켰을 때 작동기 신호의 일부 에너지가 다른 모드에 조금씩 유입되어 일어나는 것으로 이것은 여러 개의 모드가 밀집되어 있거나 본 실험에서와 같이 제어기의 차단주파수와 무관한 주파수 성분의 가진력이 존재하는 경우에 발생하는 것으로, 이 현상을 막기 위해서는 저주파 필터를 사용하여 고주파 모드에 의해 발생하는 신호를 걸러내는 방법이나 추가의 감지기, 작동기를 설치하여 원하는 주파수 성

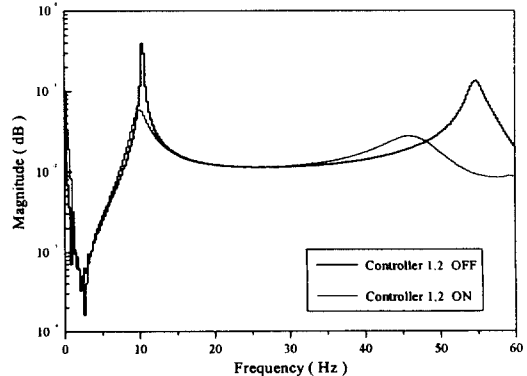


Fig. 8 Frequency response functions of the beam with both controllers off and on

분의 신호만 분리하여 제어하는 방법이 있다.<sup>(1.2.4.7)</sup>

따라서 본 연구에서는 2쌍의 독립적인 감지기/작동기만이 설치되어 있는 경우에 대하여 다중 주파수 성분의 가진력에 대한 PPF제어 기법의 최적 제어 조건을 파악하고, 제어기의 주파수 선정에 따른 제어 성능 비교와 감쇠비 선정에 따른 제어 성능을 비교하기 위하여 실험을 수행하여 보았다.

제어기의 차단주파수 선정에 따른 제어 성능을 비교하기 위하여 제2 제어기의 차단주파수를 달리하여 실험을 수행해 본 결과가 Fig. 9에 주어져 있다.

Fig. 9에서 알 수 있듯이 제어기 차단주파수를 선정은 구조물의 고유진동수(본 연구에서는 보의 2차 고유진동수를 고려하였다.)와 근접하게 설정한 ①의 경우가 ②의 경우보다 공진 주파수에서는 우수한 제어 성능이 발휘됨을 알 수 있었다.

그러나, 공진주파수 이외의 다른 주파수 성분의 가

진력에 대해서는 ②보다 ①의 제어 능력이 다소 떨어진다라는 것을 알 수 있는데, 제어기의 차단주파수를 ②보다 더 낮게 취한 ②의 경우 공진주파수에서의 제어 성능은 떨어지지만 보다 넓은 주파수 영역에 걸쳐 제어 성능이 보장된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 Fig. 8의 경우와는 달리 제2제어기의 감쇠비( $\zeta_c=0.89$ )의 값을 높게 하여 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.

따라서, 본 연구에서 적용한 PPF 제어 기법은 다중 주파수 성분의 외부 가진력이 존재하는 강제 진동하에서도 보의 고유진동수와 제어기의 차단 주파수가 일치하는 공진 주파수에서는 우수한 제어 성능을 발휘하며, 제어기의 감쇠비가 작을수록 공진주파수 대역에서의 제어 성능이 우수함을 알 수 있다. 다중 주파수 성분의 가진 신호에 대한 경우, 감쇠비가 작을수록 공진주파수 대역에서의 제어능력은 뛰어나지만 외부 가진력이 변화에 따른 또 다른 진동을 유발 할 수 있으므로 시스템의 안정성을 위하여 적절한 감쇠비의 선정이 중요하다.

### 5. 결 론

이상과 같이 강제 진동에 대한 다중 모드 진동 제어 성능을 실험적으로 파악하기 위해서 설치가 용이하고 작동기의 동적 거동에 의해 불안정해지지 않으면서 폐회로 안정성이 자동적으로 보장되는 제어기법인 PPF 제어 기법을 적용하였으며, 감지기와 작동기로는 압전재료의 일종인 PZT를 사용하여 정상 상태 가진력에 대한 보의 응답을 고찰해 보았는데 최적 진동 제어 조건을 파악하기 위하여 제어기의 차단 주파수와 감쇠비에 따른 제어 성능을 비교해 보았다. 단일 주파수 가진 신호를 적용하였을 때의 정상 상태 응답은 각각의 공진 모드에 대해 제어기의 차단주파수와 보의 고유진동수가 정확히 동조되는 주파수에서 최적의 진동 제어 능력이 발휘되며, 제어기의 감쇠비 선택에 있어서는 감쇠비가 낮을수록 제어 성능이 우수함을 실험적으로 파악할 수 있었다. 다중 모드 강제 진동에 대한 제어를 위하여 다중 주파수 성분의 가진 신호를 사용하여 정상 상태 응답을 살펴본 결과, 각각의 모드에 대한 감지기 및 작동기를 독립적으로 설치하고 PZT의 극성이 유지될 수 있는 범위 내의 제어 이득값을 유지하면 넓은 주파수 영역에 대해서도 우수한 진동 제어 성능

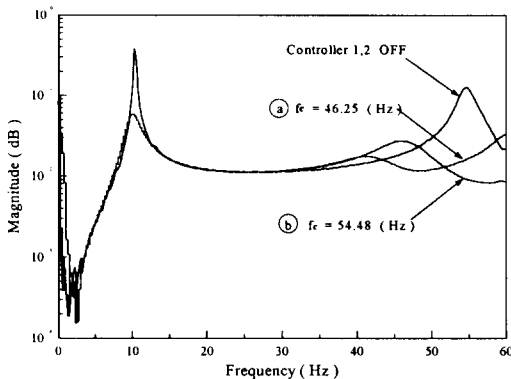


Fig. 9 Frequency response functions of the beam with both controllers off and on each with different cut-off frequency.

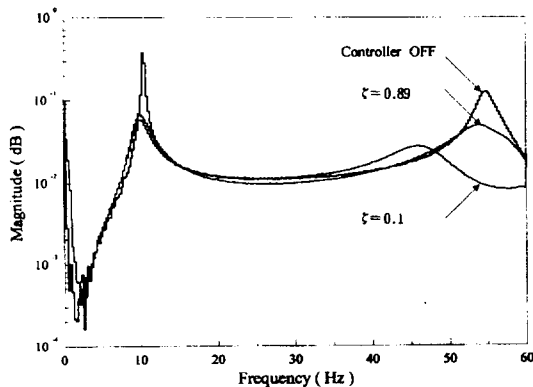


Fig. 10 Frequency response functions of the beam with both controllers off and on each with different damping ratio.

이 발휘됨을 알 수 있었다.

또한, 제어 모드의 수와 감지기와 작동기의 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.

PPF 제어기의 단점 중의 하나는 제어 대상 모드의 손실계수를 지나치게 크게 할 경우 계가불안정해 진다는 것이므로 시스템의 안정성을 고려한 제어기의 적절한 감쇠비 선정에 유의해야 다중 주파수 성분의 외부 가진에 대해 만족스러운 제어 효과를 얻을 수 있다.

### 참 고 문 헌

- (1) Kwak, M. K., and Denoyer, K. K., 1996, "Dynamic Modelling and Vibration Suppression of a Slewing Structure Utilizing Piezoelectric Sensors and Actuators," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 189, No 1, pp. 13-31.
- (2) Prakah-Asante, K. O., and Craig, K. C., 1994 "The Application of Multi-Channel Design Methods for Vibration Control of an Active Structure," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 3, pp. 329~343.
- (3) Liang, C., and Rogers, C. A. 1992, "Design of Shape Memory Alloy Actuators," *Journal of Mechanical Design*, Vol. 114, pp. 223~230.
- (4) Poh, S. and Baz, A., 1990, "Active Control of a Flexible Structure Using a Modal Positive Position Feedback Controller," *Journal of Intelligent Systems and Structures*, Vol. 1.
- (5) Kwak, M. K., and Sciulli, D., 1996 "Fuzzy-Logic Based Vibration Suppression Control Experiments on Active Structure," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 191, No 1, pp. 15~28
- (6) 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.
- (7) Akella, P., Chen, X., Cheng, W., Hughes, D., and Wen, J. T., 1994, "Modeling and Control of Smart Structures with Bonded Piezoelectric Sensors and Actuators," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 3, pp. 344~353.
- (8) 박문규, 1995, "압전재료를 이용한 지능구조물의 능동진동제어," *한국소음진동공학회지*, 제 5 권, 제3호, pp. 292~302.
- (9) 정이봉, 노홍래, 1997, "압전세라믹 외팔보형 진동센서의 설계 및 제작," *한국소음진동공학회지*, 제 7권, 제 3호, pp.377~386.
- (10) 박상욱, 박현철, 황운봉, 한경섭, 1995, "형상기억합금 선을 이용한 복합적층보의 능동 강성 제어," *대한기계학회, 추계학술대회논문집(1)*, pp. 568~573.
- (11) 박노준, 최승복, 정재천, 1995, "형상기억합금 작동기를 이용한 유연 구조물의 진동 및 추적 제어," *대한기계학회, 추계학술대회논문집(1)*, pp. 563~567.
- (12) 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.
- (13) 김형규, 최승복, 1997, "압전 작동기를 갖는 2링크 유연 매니퓰레이터의 힘 및 위치 제어," *한국소음진동학회지, 춘계학술대회 논문집*, pp. 428~433.
- (14) 강영규, 박현철, 황운봉, 한경섭, 1995, "압전세라믹 감지기/작동기가 부착된 복합적층보의 모드감쇠 해석," *대한기계학회, 추계학술대회논문집(1)*, pp. 407~411.
- (15) 김문현, 강영규, 박현철, 황운봉, 한경섭, 1995, "압전 감지기/작동기를 이용한 복합적층보의 능동진동제어," *대한기계학회, 추계학술대회논문집(1)*, pp. 588~592.
- (16) 유정열, 강우영, 김승조, 1996, "이방성 압전 재료를 이용한 복합재료 평판의 진동 제어에 관한 연구," *한국복합재료학회지*, 제9권, 제1호, pp. 17~26.