

적응형 PPF 제어를 이용한 지능구조물의 실시간 능동진동제어

Real-time Active Vibration Control of Smart Structure Using Adaptive PPF Controller

허 석[†] · 이 승 범^{*} · 광 문 규^{*} · 백 광 현^{**}

Seok Heo, Seung B. Lee, Moon K. Kwak and Kwang H. Baek

(2003년 4월 15일 접수 : 2004년 2월 3일 심사완료)

Key Words : Smart Structure(지능구조물), Real-time(실시간), PPF Controller(양변위 궤환 제어기), Gradient Descent Method(경사 하강 추적법)

ABSTRACT

This research is concerned with the development of a real-time adaptive PPF controller for the active vibration suppression of smart structure. In general, the tuning of the PPF controller is carried out off-line. In this research, the real-time learning algorithm is developed to find the optimal filter frequency of the PPF controller in real time and the efficacy of the algorithm is proved by implementing it in real time. To this end, the adaptive algorithm is developed by applying the gradient descent method to the predefined performance index, which is similar to the method used popularly in the optimization and neural network controller design. The experiment was carried out to verify the validity of the adaptive PPF controller developed in this research. The experimental results showed that adaptive PPF controller is effective for active vibration control of the structure which is excited by either impact or harmonic disturbance. The filter frequency of the PPF controller is tuned in a very short period of time thus proving the efficiency of the adaptive PPF controller.

1. 서 론

압전재료가 구조물과 결합된 제어 시스템을 일반적으로 지능구조물이라고 부른다. 지능구조물에 대한 해석은 간단한 보의 해석으로부터 출발한다. 압전재료를 포함한 지능구조물의 진동제어에 성공적으로 사용된 제어기중의 하나가 Fanson과 Caughy⁽¹⁾가 제안한 PPF제어기, Baz^(2,3) 등의 연구는 1자유도계 이론을

확장하여 트러스구조물의 진동을 억제하기 위한 압전 세라믹 작동기를 쌓아올린 형태의 작동기를 사용하고 제어기법으로는 independent modal space control(IMSC) 개념에 입각하여 각 모드를 제어하는 modal positive position feedback 제어기법을 사용하였다. 광^(4,5) 등이 제안한 MIMO PPF제어기, 광⁽⁶⁾ 등이 제안한 PPF-SRF 혼합제어기, 광⁽⁷⁾ 등이 제안한 수정 LQG 제어기 등이 있다. 이외에도 많은 제어기가 개발되어 실험으로 그 성능이 입증되고 있으며 실시간 적응 제어기의 구현을 위해서 허⁽⁸⁾ 등은 FFT알고리즘을 이용한 실시간 적응 PPF제어기를 개발하였고, 신⁽⁹⁾ 등은 유전자알고리즘을 이용한 SISO 시스템의 초기 가진에 대한 실시간 제어실험과 지속적인 강제 가진에 대한 실시간 제어실험을 하였으며, 허⁽¹⁰⁾ 등은 유전자알고리즘을 이용하여 MIMO 시스템에 대한

[†] 책임저자 : 정희원, 동국대학교 기계공학과
E-mail : manwoo@dgu.edu

Tel : (02) 2285-5274, Fax : (02) 2263-9379

^{*} 정희원, 동국대학교 기계공학과

^{**} 정희원, 단국대학교 기계공학과

실시간 적응 PPF제어기를 구현하였다.

본 논문에서는 구조물의 진동을 제어하기 위하여 DSP(digital signal processing) 칩을 사용하여 PPF 제어기를 디지털화하여 구현하였으며, PC에서 실행하는 적응 PPF 알고리즘을 프로그래밍 하여 DSP chip의 메모리를 직접 제어함으로써 PPF 제어기의 조정 과정을 자동화하였다. 본 논문에서 개발된 실시간 적응 SISO PPF 제어기의 성능은 실험으로 그 타당성을 입증하였으며, 실시간 적응 PPF 알고리즘이 유효함을 입증하였다.

2. 제어기의 설계

실시간 적응 디지털 PPF 프로그램은 DSP에 다운로드되어 내장되고 주 PC에서는 Matlab을 사용하여 다운로드 된 디지털 PPF 프로그램을 원격으로 실행시켜 구조물을 가진하고 0.5초 후부터 실시간 적응 PPF 알고리즘에 의하여 제어된 데이터를 획득하고 후처리과정을 거치도록 하는 방법으로 초기 가진 형태의 교란과 shaker를 이용한 지속적인 강제 교란에 대한 실험을 하였다.

PPF 제어기의 특성상 구조물의 고유진동수에 제어기의 필터주파수가 튜닝이 되어야 하므로 본 논문에서는 이러한 필터주파수를 비교적 빠른 시간 안에 실시간으로 수렴해 가는 적응 PPF 알고리즘을 제안하였으며 이후의 실험에서와 같이 그 효과를 검증하였다.

Fig. 1에 보이는 외팔보는 복합재료 구조물에 한 쌍의 작동기와 두 개의 감지기로 구성되어 있으며,

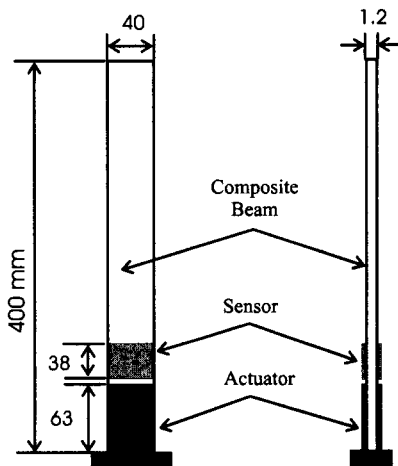


Fig. 1 Schematic of smart structure

압전재료는 Morgan Electro Ceramics 사의 Navy type II PZT5H 이며,

크기는 $63 \times 38 \text{ mm}$, $t = 0.25 \text{ mm}$, $\rho = 7700 \text{ kg/m}^3$, $d_{31} = -350 \times 10^{-12} \text{ m/V}$, $E = 6.1 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, $C_p = 450 \text{ nF}$ 이다.

2.1 Digital PPF Controller

PPF 제어기는 식 (1)과 같이 나타내며 디지털화하기 위하여 다음과 같은 bilinear 변환을 사용하였다. 구현을 위해서 본 연구에서는 독일의 dSPACE사에서 생산된 DS1102 모델인 DSP board을 이용하여 디지털 PPF 제어기를 구현하였다.

$$H(s) = \frac{\omega_f^2}{s^2 + 2\zeta\omega_f s + \omega_f^2} \quad (1)$$

$$s = \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1} \quad (2)$$

여기서 T 는 샘플링 주기이며, 불안정을 일으키지 않도록 충분히 빨라야 한다. 이 식을 전달함수에 대입하면 다음과 같이 표현된다.

$$H(z) = \frac{b_2 z^2 + b_1 z + b_0}{z^2 + a_1 z + a_0} \quad (3)$$

여기서

$$b_2 = \frac{\omega_f^2}{\Delta}, \quad b_1 = \frac{2\omega_f^2}{\Delta}, \quad b_0 = \frac{\omega_f^2}{\Delta},$$

$$a_1 = \frac{(2\omega_f^2 - \frac{8}{T^2})}{\Delta}$$

$$a_0 = \frac{(\frac{4}{T^2} - \frac{4\zeta\omega_f}{T} + \omega_f^2)}{\Delta},$$

$$\Delta = (\frac{4}{T^2} + \frac{4\zeta\omega_f}{T} + \omega_f^2)$$

이다. 본 실험에서는 sampling rate이 20 kHz 까지 가능한 DSP board를 이용하여 샘플링 속도를 5 kHz로 결정하였다. ζ_f 는 0.2의 감쇠율로 정하였고, ω_f 는 adaptive PPF 알고리즘이 찾게 된다.

2.2 Adaptive Digital PPF Controller

적응형 PPF 제어기는 실시간으로 신호를 입력받아 ω_f 를 찾아가서 구조물을 제어하도록 설계되었다. 구조물에 대하여 적응 디지털 PPF 제어기를 적용하는 흐름도는 Fig. 2와 같다.

이러한 적응형 PPF 제어를 구현하기 위해 유전자 알고리즘의 사용이 제안되었다. 그러나 실시간으로 유전자 알고리즘을 이용해 PPF 제어기의 필터주파수를 찾는 데 비교적 많은 시간이 요구되어 그 효율성이 감소된다. 본 연구에서는 이러한 단점을 극복하는 적응형 PPF 제어를 제안함으로써 빠른 시간 안에 PPF 제어기의 필터주파수를 찾고자 한다. 구조물에 대한 상태 방정식은 일반적으로 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + Bu_k \\ y_k &= Cx_k \end{aligned} \quad (5)$$

이 식을 바탕으로 압전 감지기로부터 측정되는 값은 구조물의 변위에 비례하며 따라서 다음과 같은 성능지수를 최소화하게 되면 능동진동제어가 이루어지게 된다.

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m y_k^2 \quad (6)$$

본 연구의 목적은 식 (6)를 최소화하는 PPF 제어기의 필터주파수 ω_f 를 실시간으로 구하는 방법을 개발하는 것이다. 이를 위해 최적화 기법에서 사용하고 있는 Gradient-descent 방법을 사용하였다. 따라서 성능지수 E 와 최소화되는 점을 찾아가는 식은 다음과 같이 표현된다.

$$\omega_f' = \omega_f - \alpha \frac{\partial E}{\partial \omega_f} \quad (7)$$

여기서 ω_f' 는 감지값을 획득하는 한 주기 다음에

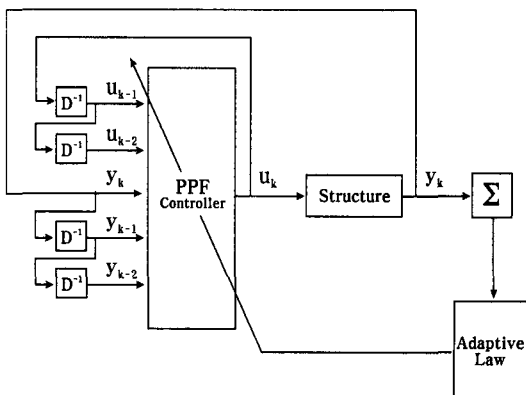


Fig. 2 Block diagram for adaptive PPF controller

적용할 새로운 필터 주파수를 나타낸다. 또한 α 는 수렴도를 조절하는 상수이다. 식 (7)의 gradient를 유도해 보면

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial \omega_f} &= \sum_{k=1}^m y_k \frac{\partial y_k}{\partial \omega_f} \\ &= \sum_{k=1}^m y_k C \frac{\partial y_k}{\partial \omega_f} \end{aligned} \quad (8)$$

이 식은 다음의 식 (9)와 같이 유도될 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial \omega_f} &= \sum_{k=1}^m y_k C \left(A \frac{\partial x_{k-1}}{\partial \omega_f} + B \frac{\partial u_{k-1}}{\partial \omega_f} \right) \\ &= \sum_{k=1}^m y_k C \left[A \left(A \frac{\partial x_{k-2}}{\partial \omega_f} + B \frac{\partial u_{k-2}}{\partial \omega_f} \right) + B \frac{\partial u_{k-1}}{\partial \omega_f} \right] \\ &= \sum_{k=1}^m y_k C \left[A^2 \left(A \frac{\partial x_{k-3}}{\partial \omega_f} + B \frac{\partial u_{k-3}}{\partial \omega_f} \right) + AB \frac{\partial u_{k-2}}{\partial \omega_f} + B \frac{\partial u_{k-1}}{\partial \omega_f} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)를 살펴보면 gradient 계산이 과거를 계속 거슬러 올라가 계산되어야 함을 알 수 있는데 이는 현실적으로 불가능한 알고리즘이다. 본 연구에서는 수치해석을 통해 gradient가 다음 식에 비례함을 경험적으로 할 수 있었다.

$$\frac{\partial E}{\partial \omega_f} \propto -y_k \frac{\partial u_{k-1}}{\partial \omega_f} \quad (10)$$

식 (3)을 고려하면 u_{k-1} 은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} u_{k-1} &= -a_1 u_{k-2} - a_0 u_{k-3} \\ &\quad + b_2 (y_{k-1} + 2y_{k-2} + y_{k-3}) \end{aligned} \quad (11)$$

따라서, 식 (11)을 ω_f 에 관하여 편미분을 취하고 식 (4)를 고려하여 정리하면 다음과 같은 새로운 형태의 필터주파수가 정의된다.

$$\omega_f' = \omega_f + \alpha y_k \frac{\partial u_{k-1}}{\partial \omega_f} \quad (12)$$

본 연구에서는 식 (12)를 실시간으로 적응 PPF 제어가 변화하는 구조물의 특성에 대처하도록 하였다.

3. 실험 방법

본 논문에서는 Adaptive PPF 제어기의 실험을 위해 dSPACE 社의 MTRACE와 MLIB를 사용하였다.

이러한 툴 들은 Mathwork 社의 Matlab 기반에서 사용할 수 있는 도구들로 DSP로부터 데이터의 획득과 저장을 자유롭게 할 수 있도록 하고 있다. 또한 Matlab 기반이므로 데이터의 후처리(post-processing) 과정을 기타 다른작업 없이 바로 할 수 있다.

3.1 MATLAB을 이용한 프로그래밍

MLIB를 사용하여 DSP에 대하여 데이터를 저장하고 획득하는 방법은 아래와 같이 간단한 방법으로 이루어지며 Matlab의 m 파일로 저장한다.

```
opt_freq_addr = mlib('GetVarAddr', 'Freq');
mlib('WriteF', opt_freq_addr, opt_freq);

x_addr = mlib('GetVarAddr', 'AD1');
x_val = mlib('ReadF', x_addr, NMAX);
```

Matlab 에서 실행되는 위의 스크립트를 보면 MLIB는 인자로 주어지는 명령과 그 명령에 필요한 다른 인자로 구성된다. 여기서 GetVarAddr 명령은 DSP 메모리에 다운로드 된 프로그램에서 Freq 라는 변수의 어드레스를 가져오는 명령이다. WriteF, ReadF 또한 뒤이어 오는 어드레스를 사용해서 다음 인자에 데이터의 값을 저장하는 명령이다. 이러한 방법으로 MLIB는 DSP에 저장된 데이터를 취하여 Matlab 에서 사용할 수 있도록 한다.

MLIB는 MTRACE 보다 저 수준의 Library로 많은 양의 데이터 획득에 있어서 DSP programming에 더욱 의존적이며 MTRACE는 MLIB을 사용하여 사용자에게 DSP programming에 대한 부담을 덜어주면서 더욱 손쉬운 방법을 제공한다. MTRACE를 이용한 DSP의 데이터 획득과 저장과정은 아래와 같다.

```
y_addr = mtrc31('GetAddr', 'flt y');
mtrc31('TraceVars', y_addr);
mtrc31('SetFrame', [], 5, 0, 10000);
mtrc31('StartCapture', 0);
mlib('WriteF', opt_freq_addr, freq);
mlib('WriteI', start_addr, 1);
while mtrc31('CaptureState') ~ = 0, end;
y_val = mtrc31('FetchData');
```

위 스크립트는 5 kHz로 동작하게끔 저장된 DSP 프로그램에서 부동소수형 변수 y의 어드레스를 찾는 것으로 시작한다. 위의 SetFrame명령은 10000개의 샘플 중에 5개마다 하나를 지연 없이 선택하는 것으로 2000개의 데이터를 얻게 한다. 다음 WriteF명령으로 원하는 주파수를 지정하고 외부 trigger 성격을 가지게끔 자체적으로 만든 start 변수를 지정한다. 실시간으로 받은 데이터를 Matlab에서 처리할 수 있는 데이터로 변환하는 것으로 끝난다

Fig. 3은 실험에 사용된 여러 가지 도구와 방법에 대하여 도식화 한 것이다. Smart beam으로 불리는 지능구조물의 하단부분을 고정하여 자유진동에 대한 제어를 시도해 봄과 동시에 지속적인 가진을 위해서 shaker를 부착할 수 있도록 하였다.

본 연구에서 적응 PPF 제어를 DSP에 다운로드 하고 실험의 시작과 종료, 데이터의 획득을 Matlab의 MTRACE와 MLIB를 사용하여 수행하였다.

3.2 초기 가진에 대한 적응 PPF 제어기

Fig. 4는 구조물의 자유진동을 살펴본 것이다. 이것으로 구조물의 고유진동수가 11.25 Hz 근방임을 알 수 있다. 능동진동제어를 위해 PPF 제어기의 $\zeta_f = 0.2$, 파워앰프의 이득은 20으로 설정하였다. Fig. 5는 PPF의 제어 주파수 ω_f 를 11.25 Hz 즉, 구조물의 고유진동수에 정확히 튜닝한 다음 0.5초 후에 제어한 결과이다. 그림으로부터 능동진동제어가 매우 효과적으로 이루어졌음을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 5처럼 제어됨에 따라서 작동기로 유입되는 전압을 나타낸다. 그림을 살펴보면 ± 0.6 V에 DSP 보드의 출력특성에 의한 10배가 곱해지고 다시 파워앰프의 이득이 20배이므로 최대 120 V 정도의 전압이 작동기로 유입되게 된다.

Fig. 7과 Fig. 8은 PPF 제어기의 필터주파수를 잘못 맞추었을 경우에 응답이 어떻게 되는지를 보여준

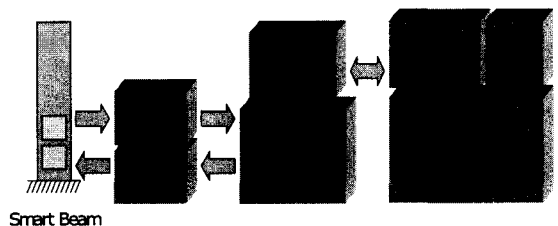


Fig. 3 Schematic diagram of experiment setup

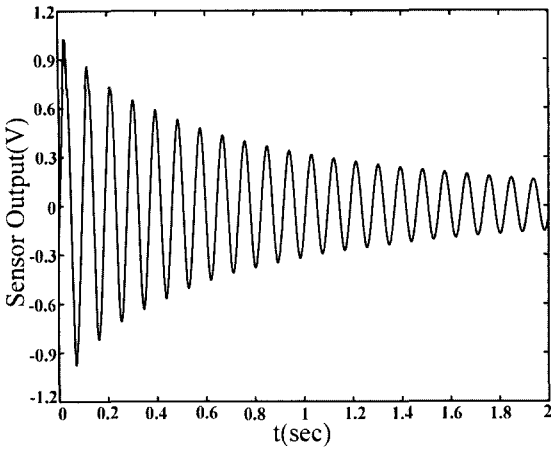


Fig. 4 Free vibration response

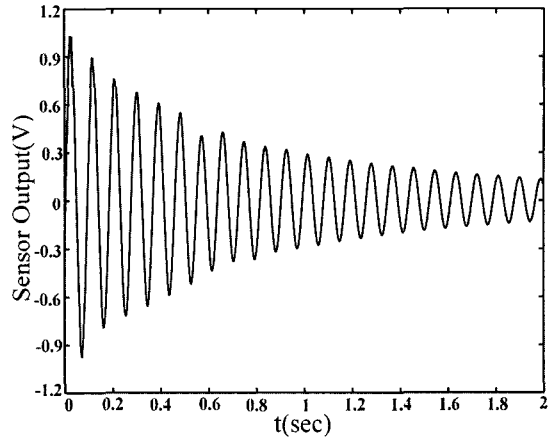


Fig. 7 PPF controlled response (tuned to 5 Hz)

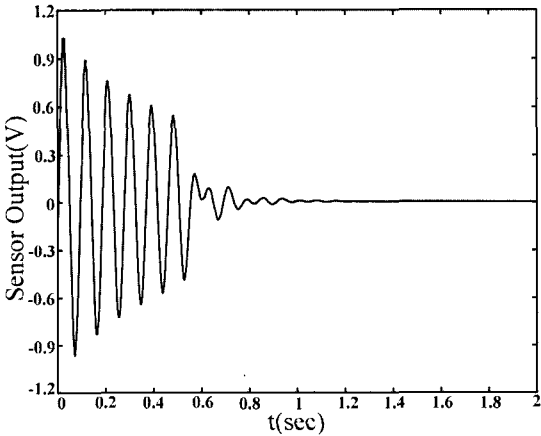


Fig. 5 PPF controlled response (tuned to 11.25 Hz)

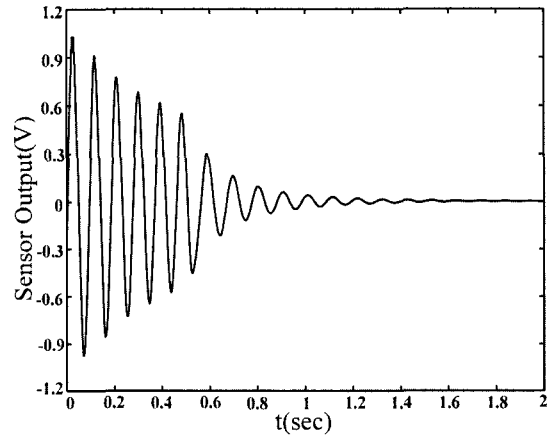


Fig. 8 PPF controlled response (tuned to 20.0 Hz)

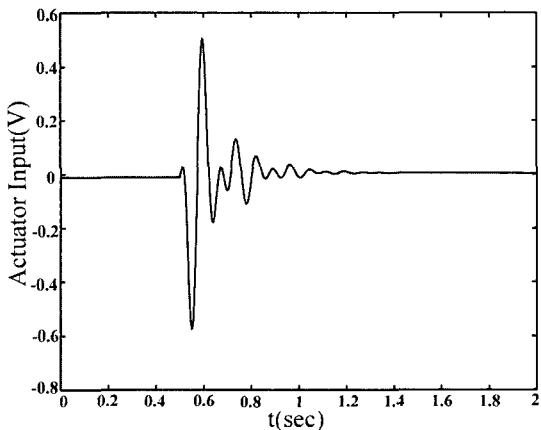


Fig. 6 Actuator input voltage

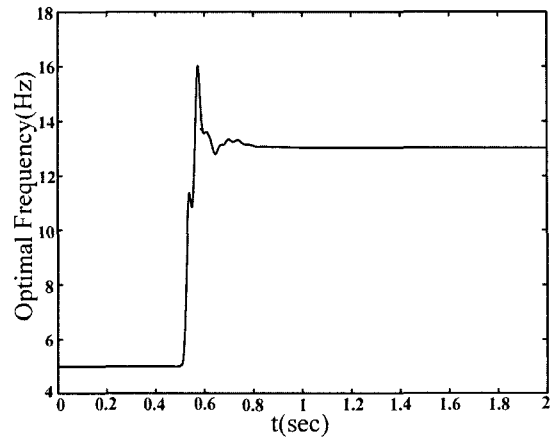


Fig. 9 ω_f of the beam starting from 5 Hz by the adaptively tuning PPF controller in real-time

다. 먼저 Fig. 7은 PPF의 제어 주파수 ω_f 를 5 Hz로 조정한 다음 0.5초 후에 제어한 결과이며 Fig. 8은 ω_f 를 20 Hz에 조정한 다음 0.5초 후에 제어한 결과이다. 그림으로부터 고유진동수보다 낮게 조정하였을 경우 능동진동제어효과가 거의 나타나지 않으며 높게 조정할 경우는 능동진동제어효과가 어느 정도 나타나고 있음을 알 수 있다. 그러나 Fig. 5와 비교해보면 진동제어 성능이 많이 감소된 것을 알 수 있어 정확한 조정이 필요함을 알 수 있다.

초기 충격형태의 가진으로 인하여 발생한 구조물의 자유진동에 대하여 적응 PPF 제어기의 성능실험을 하였는데 잘못 지정된 ω_f 로부터 어떻게 올바른 값을

찾아가는지 실험하였다. 적응 PPF 제어기의 learning rate를 20×10^5 로 설정하였다. 이때 learning rate에 따라서 학습하는 비율이 달라지므로 ω_f 의 수렴도 그만큼 달라지게 된다. 값이 너무 크면 제어가 되지 않고 제어기가 불안정화 되어 발산하는 경우가 발생할 수 있으며 값이 너무 작으면 수렴속도가 너무 늦어져 빠른 시간 내에 만족할 만한 제어 효과를 얻을 수 없다.

Fig. 9는 5 Hz에서 시작하여 최적 값으로 수렴해 감을 보여준다. Fig. 10은 5 Hz로부터 시작하여 고유진동수에 수렴해 감에 따라 제어되는 결과를 보이고 있으며 Fig. 11은 20 Hz에서 시작하여 최적값으로 빠르게 수렴해 가는 것을 볼 수 있다. Fig. 12는 20 Hz로부터 시작하여 고유진동수에 수렴해 감에 따라 제어되는 결과를 보이고 있다. 어느 경우나 Fig. 10과 Fig. 12에서 볼 수 있듯이 적응 PPF 제어기가 효과적으로 작동하고 있음을 알 수 있다.

3.3 지속적인 강제진동에 대한 적응 PPF 제어기

기계 구조물에서 발생하는 진동의 외부요인은 단속적인 형태보다는 지속적인 형태의 교란에 의한 것이 많다. 적지 않은 경우의 이 외부교란이 연속적인 불규칙한 형태를 갖고 있으며 이의 제어에 대한 연구도 활발하다.⁽¹¹⁾ 그러나 본 논문에서는 연속적으로 작용하는 교란이 규칙적일 때만 제어기를 설계, 제작하여 적용하였다. 이러한 외부 교란에 적절히 대응하기 위

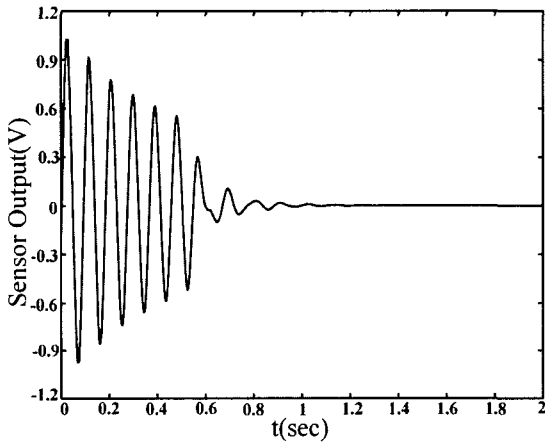


Fig. 10 Response by the adaptive PPF controller initially tuned to 5 Hz

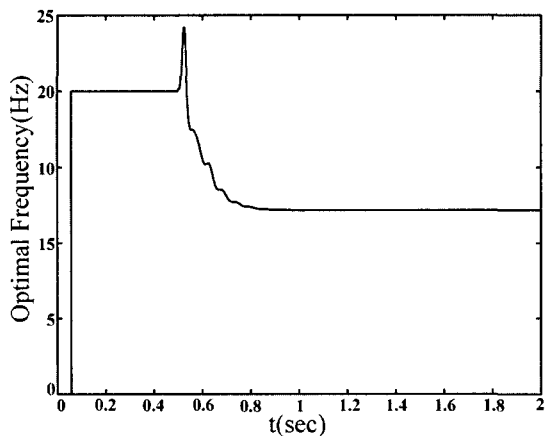


Fig. 11 ω_f of the beam starting from 20.0 Hz by the adaptively tuning PPF controller in real-time

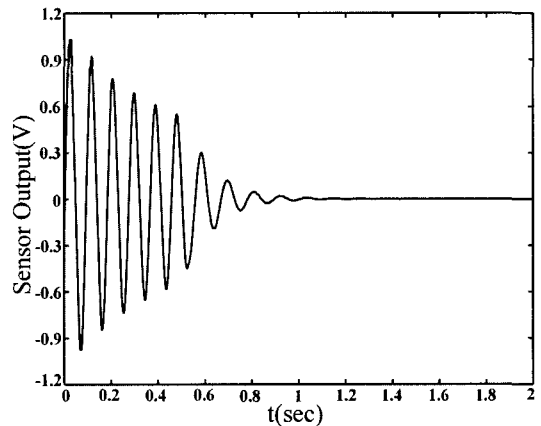


Fig. 12 Response of the beam starting from 20 Hz by the adaptively tuning PPF controller in real-time

해서는 구조물의 감쇠만을 증가시키는 것만으로는 부족하며 외부 교란을 상쇄할 수 있는 제어기의 설계가 필요하다.

이와 같은 외부 교란의 강제진동에 있어서도 마찬가지로 적응 PPF 제어기는 초기에 ω_f 의 시작 값을 지정해 주어야 한다. Fig. 13은 5 Hz로부터 시작하여 고유진동수에 수렴해 가는 것을 보여주며 Fig. 14는 제어되는 결과를 보이고 있으며, Fig. 15와 Fig. 16은 20 Hz로부터 시작하여 고유진동수에 수렴해 가는 선도와 제어되는 결과를 보이고 있다. 이 실험조건은

ζ_f 가 0.2 이고 파워앰프의 이득을 20으로 설정하였다. 또한 learning rate를 50×10^5 로 설정하였다. 이때 설정된 learning rate 는 여러 번의 실험결과로부터 비교적 학습이 잘 이루어진 경우이다.

Fig. 14와 Fig. 16에서 알 수 있듯이 강제진동의 경우 진폭이 1/6 수준으로 감소되었음을 알 수 있다. Fig. 17은 위와 같은 실험에서 작동기에 가해지는 전압을 나타내고 있다. 전압은 ± 0.8 V에 DSP보드의 출력특성 10배와 파워앰프의 이득이 20배이므로 최대 160 V 정도가 된다.

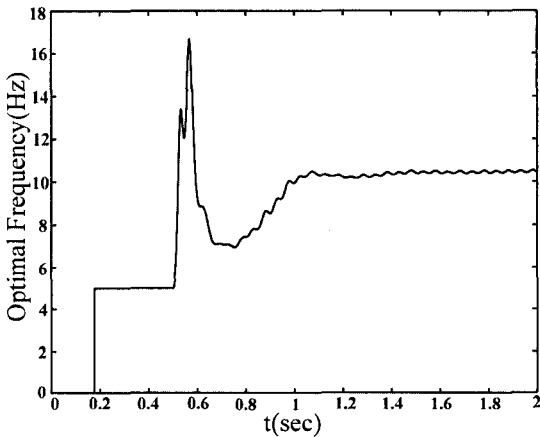


Fig. 13 ω_f of the beam starting from 5.0 Hz by the adaptively tuning PPF controller in real-time

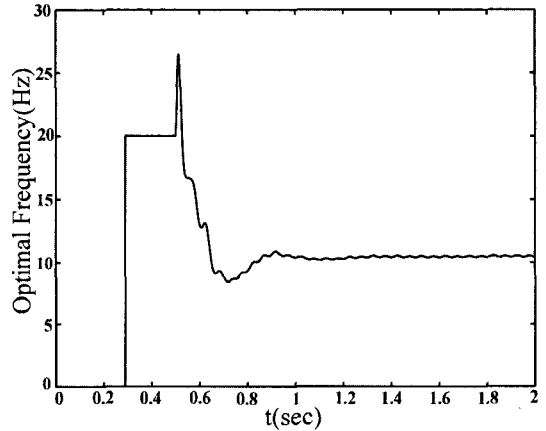


Fig. 15 ω_f of the beam starting from 20.0 Hz by the adaptively tuning PPF controller in real-time

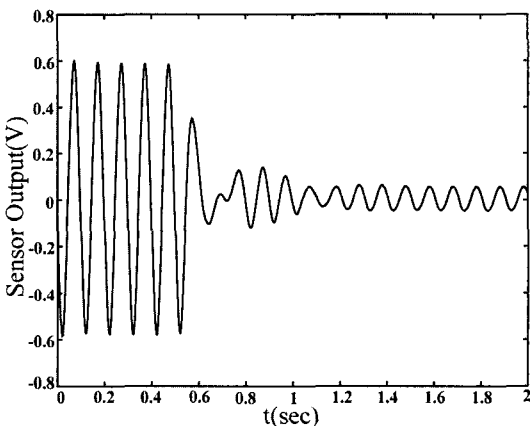


Fig. 14 Forced response of the beam starting from 5.0 Hz by the adaptively tuning PPF controller in real-time

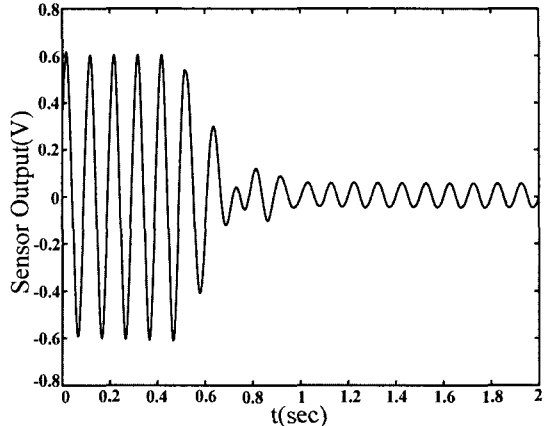


Fig. 16 Forced response of the beam starting from 20.0 Hz by the adaptively tuning PPF controller in real-time

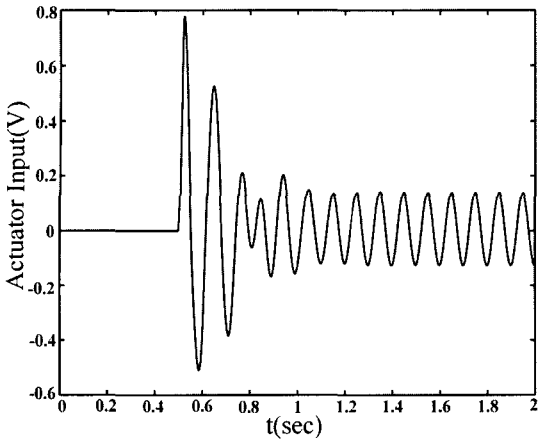


Fig. 17 Actuator input voltage

4. 결 론

본 논문은 실시간 적응 PPF 제어 알고리즘을 이용한 지능구조물의 실시간 능동진동제어의 방법에 대하여 다루고 있다. PPF제어기의 단점을 보완하기 위해서 고유진동수에 대한 필터 주파수를 실시간으로 학습하는 방법을 제안하였으며 구조물에 대한 적응제어가 효과적으로 가능함을 입증하였다.

본 연구에서는 PPF 제어기의 필터 주파수를 실시간으로 보정하는 알고리즘을 먼저 개발하였다. 실제로는 신경망 제어기에 가장 많이 사용되고 있는 gradient-descent 방법을 적용하였다. 이 방법은 최적화 기법에 사용하고 있는 방법이기도 하다. 어떤 주어진 시간 내에 진동을 효과적으로 제어하기 위해서는 성능지수를 먼저 정의해야 한다. 본 연구에서는 감지기 값의 제곱의 합을 성능지수로 설정하고 이에 대한 gradient를 유도하였다. gradient에 대한 수치해석결과를 바탕으로 경험적인 간략식을 제안하였다. 본 연구에서는 적응 알고리즘과 PPF 제어기를 동시에 적용하여 적응형 PPF 제어기를 실현하였다.

실험결과 짧은 시간에 주어지는 외부 충격에 의하여 가진 되는 구조물 진동의 능동진동제어뿐만 아니라 지속적인 외부 교란이 가해지는 구조물 진동의 능동진동제어로서 적응 PPF 제어기가 효과적임을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 개발한 적응 PPF 제어가 실용적으로 타당함을 입증하였다.

본 연구에서는 감지기과 작동기가 각각 한 개씩인 SISO 제어시스템을 고려하여 적응 PPF 제어기를 적

용하였다. 향후 MIMO 제어시스템에 대해서도 적응 PPF 제어기의 적용이 가능할 것으로 예상된다. 또한 학습알고리즘을 개선하면 보다 신속하게 변화하는 시스템에 대처할 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소(UD000038ED)의 지원에 의하여 이루어졌다. 관계자 여러분께 감사드린다.

참 고 문 헌

- (1) Fanson, J.L. and Caughey, T.K., 1987, "Positive Position Feedback Control for Large Space Structures," AIAA Journal, Vol. 28, No. 4, pp. 717~724.
- (2) Poh, S. and Baz, A., 1990, "Active Control of a Flexible Structure Using a Modal Positive Position Feedback Controller," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 1.
- (3) Baz, A. and Hong, T. H., 1997, "Adaptive Control of Flexible Structures Using Modal Positive Position Feedback", International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, Vol. 11, pp. 231~253.
- (4) 박문규, 1995, "압전재료를 이용한 지능구조물의 능동진동제어," 한국소음진동공학회논문집, 제 5 권, 제 3 호, pp. 292~302.
- (5) 라완규, 박문규, 윤광준, 1997, "압전감지기와 작동기를 이용한 복합재료 격자구조물의 능동진동제어," 한국항공우주학회지, 제 25 권, 제 5 호, pp. 76~85.
- (6) 박문규, 라완규, 윤광준, 1997, "PPF와 SRF 조합제어기법을 사용한 지능구조물의 능동진동제어," 한국소음진동공학회논문집, 제 7 권 제 5 호, pp. 811~817.
- (7) 박문규, 1998, "지능구조물의 능동진동제어를 위한 다중 PPF 제어기와 수정 LQG 제어기의 비교 연구," 한국소음진동공학회논문집, 제 8 권, 제 6 호, pp. 1121~1129.
- (8) 허석, 박문규, 1998, "FFT 알고리즘을 이용한 실시간 적응 PPF 제어기의 개발," 한국소음진동공학

회 추계학술대회논문집, pp. 799~804.

(9) 신태식, 팍문규, 2000, "유전자알고리즘을 이용한 능동진동제어의 실시간조정", 한국소음진동공학회논문집, 제 10 권, 제 6 호, pp. 1083~1093.

(10) 허석, 팍문규, 2001, "유전자알고리즘을 이용한 지능구조물의 PPF 제어기 실시간 다중변수 조

정," 한국소음진동공학회논문집, 제 11 권, 제 1 호, pp. 147~155.

(11) 허훈, 김대중, 1999, "유연한 구조물의 확률제어에 대한 실험적인 연구," 한국소음진동공학회논문집, 제 9 권, 제 3 호, pp. 502~508.