

디지털신호처리 칩과 마이크로 컨트롤러를 이용한 적응 양변위 되먹임 제어기의 구현

Implementation of Adaptive Positive Position Feedback Controller Using DSP chip and Microcontroller

곽문규* · 김기영** · 방세운***

Moon K. Kwak, Ki Young Kim and Se Yoon Bang

Key Words : Positive Position Feedback Controller(양변위되먹임제어기), Adaptive Control(적응제어기), Digital Signal Processor (디지털신호처리기), Microcontroller(마이크로 컨트롤러)

ABSTRACT

This paper is concerned with the implementation of adaptive positive position feedback controller using a digital signal processor and microcontroller. The main advantage of the positive position feedback controller is that it can control a natural mode of interest by tuning the filter frequency of the positive position feedback controller to the natural frequency of the target mode. However, the positive position feedback controller loses its advantage when mistuned. In this paper, the fast fourier transform algorithm is implemented on the microcontroller whereas the positive position feedback controller is implemented on the digital signal processor. After calculating the frequency which affects the vibrations of structure most, the result is transferred to the digital signal processor. The digital signal processor updates the information on the frequency to be controlled so that it can cope with both internal and external changes. The proposed scheme was installed and tested using a beam equipped with piezoceramic sensor and actuator. The experimental results show that the adaptive positive position feedback controller proposed in this paper can suppress vibrations even when the target structure undergoes structural change thus validating the approach.

1. 서 론

압전 재료가 구조물과 결합된 제어 시스템을 일반적으로 지능 구조물이라고 부른다. 이런 지능 구조물의 능동 진동 제어기로서 여러 가지 제어기[1]가 제안되었다. 그 중 Positive Position Feedback(PPF) 제어기[2]는 다른 제어기 법들에 비해 아날로그 회로로 구현이 가능하고 디지털 제어기로 변환하더라도 비교적 단순한 알고리즘을 제공한다. 따라서 다른 제어기법에 비해 비교적 진동제어에 많이 사용되어왔다. PPF 제어기의 장점은 대상 진동수 대역의 감쇠비를 확실하게 증가시킬 수 있다는 것이다. 따라서 PPF 제어기의 필터 주파수를 대상고유진동모드의 진동수에 맞

따라서 PPF 제어기의 필터 주파수를 대상 고유진동모드의 진동수에 맞추면 그 진동모드를 확실하게 제압할 수 있다. 그러나 이점은 PPF 제어기의 장점인 동시에 단점이 되기도 한다. PPF 제어기의 적용상 문제점은 PPF 제어기의 필터 주파수를 제어하려는 구조물의 대상 고유 진동수에 정확히 맞추어야 한다는 것이다.

적응 능동 진동 제어기는 구조물의 변화를 감지기 신호로부터 분석하여 이에 대처할 수 있도록 제어기의 변수가 바뀔 수 있는 제어기를 가리킨다. 아날로그 PPF 제어기를 사용할 경우 각각의 진동 구조물의 고유 진동수에 필터 주파수를 가변저항과 같은 전자부품을 이용[3]해 인위적으로 맞추어야 하기 때문에 적응 능동 진동 제어기를 구현하기가 어렵지만 디지털 PPF 제어기를 사용할 경우 파라미터를 쉽게 바꿀 수 있기 때문에 적응 PPF 제어기의 구현이 가능해진다. 이런 점에 착안하여 PPF 제어기가 적응 능력을 가질 수 있도록 여러 가지 연구가 이루어져 왔다. 허와 곽[4]은 DSP 보드와 메인 컴퓨터간의 정보 교환이 가능하

* 동국대학교 기계공학과, 교수, 정회원
E-mail : kwakm@dongguk.edu
Tel : (02) 2630-3705, Fax : (02) 2633-9379

** 동국대학교 기계공학과, 석사과정

*** 동국대학교 기계공학과, 부교수

다는 점을 관찰하고 DSP 보드와 메인컴퓨터를 동시에 이용하는 적응 PPF 제어를 제안하였다. 허와 팍[4]은 DSP 보드에서 수집한 센서 신호를 FFT 알고리즘으로 처리하고 센서 신호에 가장 큰 영향을 주는 진동수를 찾아내어 이를 DSP 보드에 전송해 PPF 제어기의 파라미터를 바꾸는 작업을 수행하였다. 신과 팍[5]은 영향력이 큰 진동수를 찾는 방법으로 유전자 알고리즘을 채택하여 Single-Input and Single-Output(SISO) 시스템에 대한 실험을 수행하였다. 이 실험 결과를 확장하여 허와 팍[[6]은 유전자 알고리즘을 이용하여 Multi-Input and Multi-Output(MIMO) 시스템에 대한 실시간 적응 PPF제어를 구현하였다. 그러나 이들 연구는 모두 DSP 보드와 메인 컴퓨터의 복수 시스템 체계를 근거로 하였기 때문에 진동제어를 하는데 효과적이기는 하지만 시스템 구현 비용이 비싸다는 단점이 있다. 이런 문제를 해결하기 위해 허[7]등은 DSP 보드만으로 실현 가능한 적응 PPF 제어이론을 Gradient Descent 기법을 이용해 개발하였다. 이 제어이론은 실험으로 그 타당성이 입증되었으나 적응 PPF 제어기의 알고리즘상의 복잡성으로 인한 신호추출속도의 저하와 수렴도의 문제가 아직 남아있다. 이상에서 소개한 두 가지 적응 PPF 제어기들에 대해 요약해 보자. 먼저 DSP 보드에 디지털 PPF 제어기를 구현하고 메인 컴퓨터에서는 센서 신호를 분석하여 적절한 디지털 PPF 제어기 파라미터를 제공하는 방법은 효과적이기는 하지만 고가이다. 반면에 복잡한 적응 알고리즘을 이용한 방법은 저가로 구현 가능하지만 효과적이지 못하다.

따라서 본 연구에서는 첫 번째 적응 PPF 제어기를 저가로 구현하는 방법에 초점을 맞추어 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 일반 PC가 아닌, 상용화되고 사용자가 쉽게 접근할 수 있는 저가의 마이크로 컨트롤러와 DSP 칩을 사용하여 하나의 마이크로 컨트롤러에서는 FFT 프로그램을 수행하고 DSP 칩은 디지털 PPF 제어를 수행할 수 있게 만들었다. 2개의 시스템을 사용한 이유는 DSP 보드의 경우 계산 속도가 빠른 반면 메모리가 적으며 마이크로 컨트롤러로 사용된 ROVIN[8]은 메모리가 크며 처리 속도가 빠르다. 그래서 메모리가 큰 ROVIN에서는 데이터 수집 및 FFT 프로그램을 수행하며 이 결과를 가지고 DSP에서는 PPF 제어를 실행하도록 만들었다. 본 연구에서 구현한 모델화된 실시간 적응 SISO PPF 제어기의 성능은 실험으로 그 타당성이 입증되었으며 마이크로 컨트롤러를 사용한 실시간 적응 PPF 알고리즘의 유효성이 입증되었다.

2. 적응 PPF 제어 시스템의 구성

본 연구에서 제안한 적응 PPF 제어 시스템의 구성은 Fig.1에서 보이는 바와 같다.

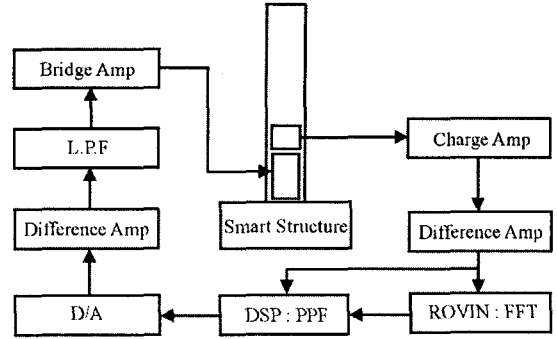


Fig.1 Control System

압전세라믹 센서의 신호는 전하앰프를 거쳐 차동앰프를 통해 디지털 신호처리에 적합한 신호로 전압 변환을 한다. 차동앰프의 출력신호는 각각 마이크로 컨트롤러와 DSP 칩에 제공된다. 마이크로 컨트롤러는 FFT 알고리즘을 이용해 압전세라믹 신호에 가장 큰 영향을 주고 있는 진동수를 결정하고 이를 DSP 칩에 제공한다. DSP 칩은 마이크로 컨트롤러가 제공한 진동수를 이용해 디지털 PPF 제어기의 파라미터를 조절하고 압전세라믹 신호를 근거로 제어력을 산출한다. 산출된 제어신호는 D/A 변환기를 통해 증폭되어 압전세라믹 작동기에 전달된다. 증폭과 잡음제거를 위해 차동앰프와 저주파수 통과 필터, 그리고 브릿지 앰프가 사용되었다.

본 연구에서 사용한 DSP 칩은 신호처리와 빠른 연산 처리를 목적으로 만들어진 컨트롤러로서 특히 부동 소수점 계산에 있어 최고의 성능을 발휘하고 있다. TI사에서는 많은 종류의 DSP 시리즈를 만들고 있는데 본 실험에서 사용한 것은 C2000계열인 16비트인 TM320LFS2407A이다. 디지털 제어용으로 최적화된 구조로 하드웨어를 제어하기 다양한 기능들, PWM, 엔코더 카운터, SPI, SCI, A/D, 다양한 인터럽트를 내부에 장착하고 있어 모터 제어용 및 각종 제어기 구현용으로 많이 사용되고 있다.

본 연구에서 사용한 마이크로 컨트롤러는 컴파일사[8]의 ROVIN이다. ROVIN은 Embedded Computer로써 주로 산업용 기기, 의료 기기, 데이터 수집 장치, 공장 자동화 등과 같은 제어가 필요한 기기의 핵심 프로세서로 사용될 수 있도록 설계되었다. 32비트 ARM 프로세서를 사용하여 멀티 테스킹을 가능케 하였으며 64비트 실수 연산을 지원한다. 64개의 I/O핀, 두개의 하드웨어적인 UART, 소프트웨어적인 I2C/SPI 지원, ADC, ANCOMP, PWM, EEPROM 등 많은 I/O와 주변 기기를 내장하고 있다.

진동 구조물에는 Fig. 1에 보이는 바와 같이 압전세라믹 감지기와 작동기가 부착되어 있다. 감지기에서 나온 신호는 전하 앰프와 차동 앰프를 거쳐 ROVIN으로 들어간다. DSP 보와 ROVIN은 10비트의 A/D 변환기를 내장하고 있으며

각각 0~3.3V와 0~5V를 입력을 받을 수 있다. 본 실험에서는 실험 장치 구성을 단순화하기 위해서 차동 앰프 출력을 0~3.3V로 고정 하였다. ROVIN에서는 약 2KHz의 샘플링 속도로 A/D변환을 하여 감지기에서 나온 신호를 수집한다. 512개의 데이터를 수집한 후 ROVIN은 FFT프로그램을 구동시켜 구조물의 고유 진동수를 찾는다. FFT 프로그램에서 얻은 결과 값은 1Hz의 분해능을 갖는다. ROVIN과 DSP보드간의 데이터 교신은 시리얼 통신을 사용하였다. 병렬 포트를 사용하여 8비트의 데이터를 송신할 수 있지만 회로의 복잡성으로 인하여 시리얼 통신을 사용하였다. FFT 프로그램을 수행하여 가장 영향력이 큰 진동수를 찾은 후 그 진동수를 DSP 보드에 시리얼 통신으로 전달한다. DSP 보드는 이 데이터를 가지고 PPF 제어를 조정하여 실행한다. DSP 보드는 PPF 제어를 연속적으로 수행하다가 시리얼 통신 수신 인터럽트가 발생하면 수신된 데이터를 기반으로 수정된 PPF 제어를 다시 실행한다. DSP에서 계산된 제어력은 12비트인 D/A로 출력이 된다. 사용된 D/A는 SPI 방식으로 3개의 선으로 간단하게 구성이 가능하다. D/A에서 출력된 전압은 0~-5V이므로 차동 앰프를 사용하여 출력 전압의 오프셋과 전압 증폭을 조절하였다. 이러한 과정을 거친 신호는 제어력 뿐만 아니라 잡음 또한 증폭이 되며 이를 작동기에 인가를 하면 소음이 발생한다. 이를 방지하기 위해서 저주파수 통과 필터를 구성하여 사용하였다. 잡음이 제거된 제어력은 브릿지 앰프를 통해 압전 세라믹 작동기에 인가된다.

3. 디지털 PPF 제어기

SISO PPF 제어기는 다음과 같은 전달 함수로 표현이 된다[2].

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

여기서 ω_f 와 ζ_f 는 PPF 보상회로의 필터 주파수와 감쇠 인자이다. 일반적으로 PPF제어기는 ω_f 를 대상 구조물의 고유진동수와 일치시킴으로써 능동 진동 제어를 이룩한다. 식(1)로 표현되는 PPF 제어기는 실제로는 저주파수 통과 필터 회로와 그 형태가 동일하다. 따라서 OP 앰프를 사용하여 아날로그 PPF제어기의 구성이 가능하다[3]. 식(1)을 디지털 제어기로 전환하기 위해서 다음과 같은 Bilinear 변환을 사용한다[3].

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

여기서 T_s 는 디지털 제어기의 Sampling 시간을 나타낸다. 불안정을 일으키지 않도록 충분히 빨라야 한다. (2)식을 (1)식에 대입하면 다음과 같은 식이 유도된다.

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

여기서

$$\begin{aligned} b_2 &= \frac{\omega_f^2}{\Delta}, \quad b_1 = \frac{2\omega_f^2}{\Delta}, \quad b_0 = \frac{\omega_f^2}{\Delta}, \\ a_1 &= \frac{(2\omega_f^2 - \frac{8}{T_s^2})}{\Delta} \\ a_0 &= \frac{(\frac{4}{T_s^2} - \frac{4\zeta_f \omega_f}{T_s} + \omega_f^2)}{\Delta}, \\ \Delta &= (\frac{4}{T_s^2} + \frac{4\zeta_f \omega_f}{T_s} + \omega_f^2) \end{aligned} \quad (4)$$

(3)식을 이산화된 형태로 표현하면 다음과 같다[3].

$$u_k = -a_1 u_{k-1} - a_0 u_{k-2} + b_2 (y_k + 2y_{k-1} + y_{k-2}) \quad (5)$$

여기서 y_k 는 감지기 값을 나타내며 u_k 는 계산된 제어력을 의미한다. 디지털 PPF 제어기를 구현함에 있어 가장 중요한 파라미터는 T_s 인데 그 역은 디지털 제어기의 샘플링 속력이 된다. 디지털 PPF 제어기가 효과적으로 작동하기 위해서는 샘플링 속력이 제어 대상인 진동 모드의 고유 진동수보다 빨라야 한다. 본 실험에서 사용한 진동 구조물의 기본 진동수는 최대 약 17Hz이며 DSP보드와 ROVIN은 각각 2KHz와 7KHz의 샘플링 속력을 가지고 있다. 따라서 디지털 PPF 제어기를 구현함에 있어 이 조건을 만족함을 알 수 있다. ζ_f 는 0.3의 감쇠율로 정하였으며 ω_f 는 FFT 프로그램으로 찾게 된다.

4. FFT 알고리즘

FFT 알고리즘[9,10]은 Cooley와 Turkey의 연구로 1960년대 중반부터 일반적으로 알려지게 되었다. 1942년 Danielson과 Lanczos는 알고리즘의 분명한 유도를 규정하였는데 N범위의 이산 푸리에 변환(Discrete Fourier Transform, DFT)이 각기 N/2 범위의 두개의 DFT 합으로 표현할 수 있음을 보였다. DFT는 디지털 신호 처리 시스템의 해석 및 설계에서 중요한 역할을 한다. DFT 알고리즘은 일반적으로 (6)처럼 표현이 된다.

$$F_k = \sum_{j=0}^{N-1} e^{2\pi ijk/N} f_j \quad 0 \leq k < N - 1 \quad (6)$$

여기서 f_j 는 N 개로 구분된 mesh point에서 time space 상의 복소수 데이터이고 F_k 는 주파수 공간을 N 개로 나눈 지점에서 계산된 푸리에 변환값이다. 합이 모든 $0 \leq k < N - 1$ 에서 수행되고 각각의 합이 N 범위를 가질 때 직접 합은 N^2 의 연산을 필요로 한다. 그러나 Cooley와 Turkey가 제안한 FFT 알고리즘은 $M \log_2(N)$ 의 연산을 통해서 수행될 수 있기 때문에 푸리에 변환 시간을 단축시킬 수 있는 장점이 있다[9,10]. FFT 알고리즘의 시작은 N 범위의 푸리에 합을 다음과 같이 $N/2$ 범위의 두 개의 푸리에 변환의 합으로 계산할 수 있음을 이용하고 있다.

$$\begin{aligned} F_k &= \sum_{j=0}^{N-1} e^{2\pi ijk/N} f_j \\ &= \sum_{j=0}^{N/2-1} e^{2\pi i(2j)k/N} f_{2j} + \sum_{j=0}^{N/2-1} e^{2\pi i(2j+1)k/N} f_{2j+1} \\ &= \sum_{j=0}^{N/2-1} e^{2\pi i(2j)k/N} f_{2j} + W_N^k \sum_{j=0}^{N/2-1} e^{2\pi ijk/(N/2)} f_{2j+1} \\ &= F_k^{even} + W_N^k F_k^{odd} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 $W_N = e^{2\pi i/N}$ (twiddle factor)이다. N 범위의 푸리에 변환을 수행하기 위해서는 기와 우요소에 대한 $N/2$ 범위의 F^{even} 과 F^{odd} 의 각각을 푸리에 변환해야만 한다. 원하는 푸리에 변환 F 를 위해서 두개의 부분 변환이 적절한 W^k 와 결합될 수 있다. 식(7)의 첨자 k 는 $0 \leq k < N$ 의 범위로 제한되는데 F_k^{even} 와 F_k^{odd} 는 $N/2$ 범위의 k 에 대하여 주기적이기 때문이다. 이런 원리로 FFT 알고리즘이 개발되었다.

5. 실험 장치 구성 및 실험 결과

DSP 보드와 ROVIN과의 데이터 이동은 시리얼 통신을 이용하였는데 DSP 보드는 3.3V, ROVIN은 5V를 전용으로 사용하기 때문에 각기 다른 전압으로 구동되는 통신 칩을 사용하였다. Fig.2는 전체적인 실험 구성을 보여준다. 감지기와 작동기가 부착된 진동 구조물의 고유 진동수는 약 17.3Hz를 갖고 무게 추를 부착할 경우에는 약 10.8Hz가 되는 것이 예측되었다. 실험에서는 고유 진동수를 가변하기 위해 Fig.2에서와 같이 무게 추를 붙일 수 있도록 만들었다. Fig. 3은 DSP가 장착된 컨트롤러와 ROVIN이 장착된 컨트롤러를 보여주고 있다. 초기에는 이 두 개의 컨트롤러가 작동을 하지 않다가 ROVIN에서 FFT 프로그램을 실행한 후 결과 값이 DSP 보드로 넘어 갔을 때 전체적인 적용

진동 제어 시스템이 작동되도록 만들었다. FFT 결과 값은 시리얼 LCD에 표시되는데 FFT 알고리즘을 실행한 결과 구조물의 진동수가 부가 질량이 없을 경우에 17Hz, 부가 질량을 추가할 경우에 10Hz가 LCD 창으로 표시됨을 확인할 수 있었다. ROVIN에서 DSP로 보내지는 시리얼 데이터 값은 한 바이트만 전송하도록 프로그램 되어 있기 때문에 주파수 값은 최대 255Hz까지 전송이 가능하다.

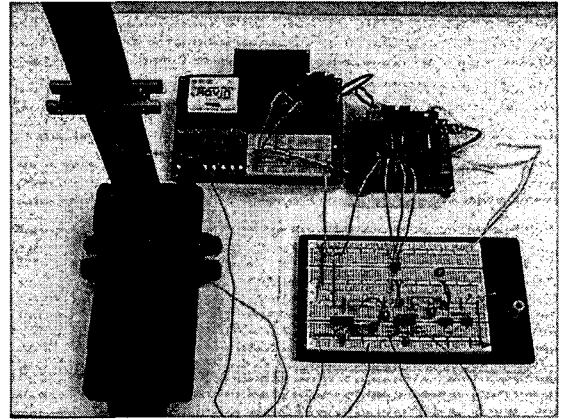


Fig.2 Experimental Setup

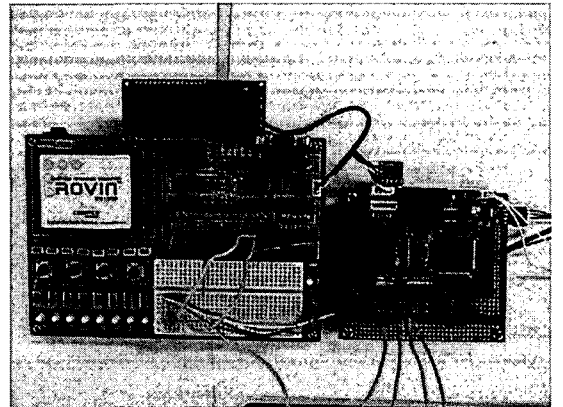


Fig. 3 Microcontroller and DSP

Fig. 4는 적용 PPF 제어 시스템의 구현을 위한 부대 전자 회로를 보여주고 있다. 차동앰프와 저주파 통과 필터, 브릿지 회로 등은 모두 OP Amp를 이용해 구현되었다. Fig. 5는 구조물의 고유진동 특성 변화를 주지 않은 상태의 자유 진동 응답을 보여주고 있다. Fig. 6은 부가 질량을 외팔보에 첨가시킨 상태의 자유 응답을 보여주고 있는데 그림에서 알 수 있듯이 부가 질량을 포함한 자유진동의 경우 진동수가 감소되었음을 알 수 있다. Fig.7은 진동 구조물에 질량이 추가된 상태에서 FFT 프로그램을 실행시켜 주파수 분석을 하고 그 결과를 DSP 보드에 내장된 PPF 제어

기를 조정하여 구조물을 제어한 결과이다. 그러나 자유단의 추가 질량을 제거했을 경우에는 10Hz에 맞추어진 PPF 제어기는 더 이상 효과적이지 못하다. 이 경우를 보여주는 것이 Fig.8이다.

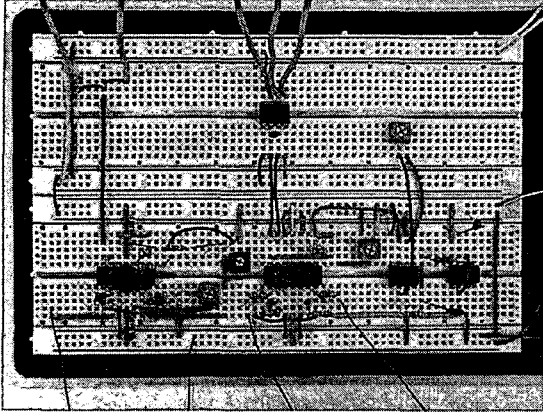


Fig. 4 Electric Circuits for Adaptive PPF Controller

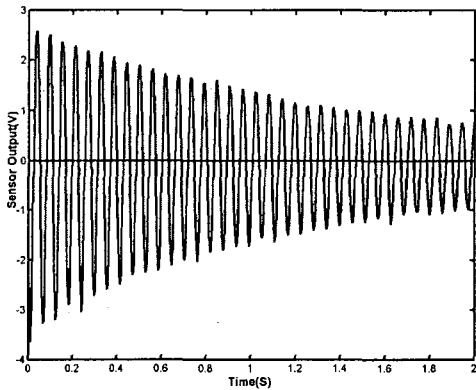


Fig.5 Free Vibration Response

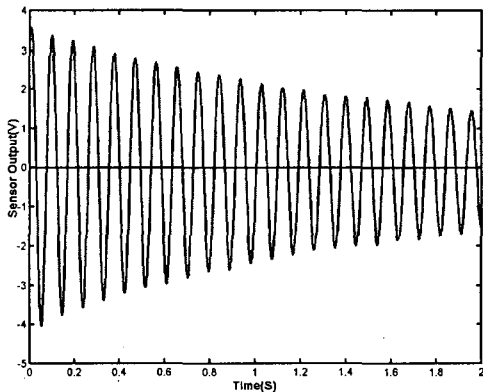


Fig. 6 Free Vibration Response with Added Mass

Fig. 9는 변화가 발생한 시스템에 대해 다시 FFT 프로그램을 실행하고 그 해석 결과를 반영하여 재조정된 PPF 제어기를 적용한 결과이다. Fig. 8과 비교했을 경우 진동 억제 효과가 회복되었음을 확인할 수 있다.

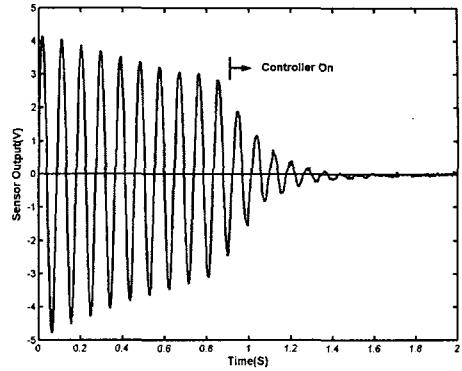


Fig.7 Controlled Response of Beam with Added Mass by PPF Controller tuned to 10Hz

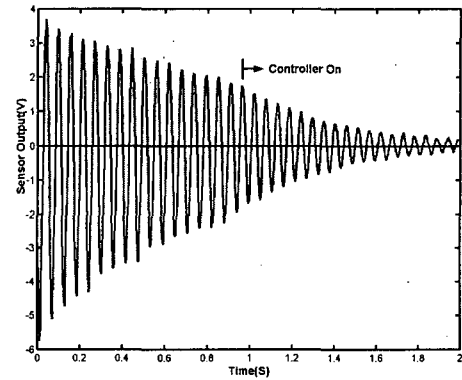


Fig.8 Controlled Response of Beam without Added Mass by PPF tuned to 10Hz

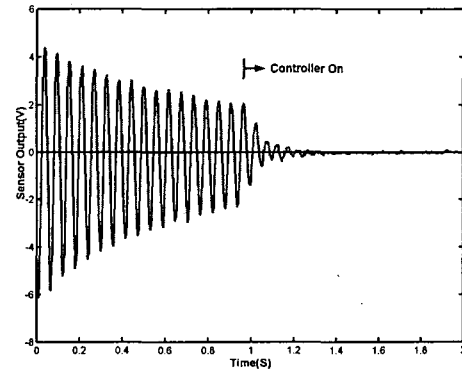


Fig.9 Controlled Response of Beam without Added Mass by PPF re-tuned to 17Hz

본 논문에서는 지능구조물의 보다 효과적인 능동진동제어를 위해 저가의 마이크로 컨트롤러와 DSP 칩을 사용하여 구현된 적응 PPF 제어기를 소개하였다. 본 연구에서는 마이크로 컨트롤러를 이용해 감지기 데이터 수집 및 FFT 프로그램을 수행하였다. FFT 프로그램의 실행을 통해 감지기 데이터에 가장 큰 영향을 주는 진동수를 파악하고 그 결과를 PPF 제어기를 내장한 DSP보드에 제공해 디지털 PPF 제어기가 내부 및 외부의 진동 변화 특성에 제어 파라미터를 조절할 수 있도록 만들었다. 본 실험에서 사용한 마이크로 컨트롤러는 최대 2KHz의 샘플링 속력을 가지고 있기 때문에 200Hz까지의 주파수 측정이 가능하다. 그리고 DSP 보드는 A/D변환 속도를 따지면 거의 2Mhz까지 가능하며 PPF 제어기를 실행한 샘플링 속도는 약 7KHz 이다. 따라서 200Hz정도의 기본 진동수를 제어하는데 있어 전혀 부족함이 없다고 말할 수 있다. 그러나 본 연구에서 사용한 소형 DSP칩의 메모리 및 처리 속도로 인하여 DSP가 FFT 계산과 PPF 제어를 동시에 수행하는 것은 불가능해 본 연구에서는 마이크로 컨트롤러를 추가해 이 문제를 해결하였다.

이전에 개발된 적응 능동 진동 제어기는 PC와 고가의 DSP 보드에 기반을 두고 있어 실용화하는데 부족하였다. 그러나 본 연구에서 개발한 시스템은 소형화 및 비용 절감에 있어 실용성이 높다고 말할 수 있다.

본 연구에서 개발한 적응 PPF 제어기의 타당성 조사를 위해 압전세라믹 감지기와 작동기를 부착한 외팔보를 사용하였다. 실험은 외팔보에 질량을 추가하거나 제거함으로써 진동 특성에 변화를 주고 본 연구에서 제안한 적응 PPF 제어기가 이에 대응할 수 있는지를 확인하는 작업으로 이루어졌다. 실험 결과 본 연구에서 제안한 적응 PPF 제어 시스템이 구조물의 진동 특성 변화에 잘 적응하여 진동 억제에 성공적으로 이룩할 수 있음을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 개발한 적응 PPF 제어기는 하나의 입력과 하나의 출력으로 이루어져 있지만 다중 입출력 시스템으로 확장이 가능하다. 또한 강제 진동의 경우에도 그 성능을 발휘할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 국방과학연구소가 지원하는 수중운동체 특화 연구센터의 수중/구조진동 연구실 지원으로 이루어졌다. 관계자 여러분께 감사드린다.

참 고 문 헌

- (1) 광문규, "압전재료를 이용한 지능구조물의 능동진동제어", 한국소음진동공학회지, 제 5권 제 3호, 1995년 9월, pp. 292-302.
- (2) Fanson, J. L. and Caughey, T. T., 1987, "Positive Position Feedback Control for Large Space Structures," AIAA Journal, Vol. 28, No. 4, April 1990, pp. 717-724.
- (3) 허석, 김기영, 광문규, "아날로그 회로와 마이크로 프로세서를 이용한 PPF 제어기의 구현", 한국소음진동공학회 논문집, 제 14권 제 6호, 2004년, pp. 455-462.
- (4) 허석, 광문규, 1998, "FFT 알고리즘을 이용한 실시간 적응 PPF 제어기의 개발", 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp. 799-804.
- (5) 신태식, 광문규, 1999, "유전자 알고리즘을 이용한 능동 진동제어기의 실시간 조정", 한국소음진동공학회논문집, 제 10권, 제 6호, pp. 1083-1093.
- (6) 허석, 광문규, 2001, "유저자 알고리즘을 이용한 지능구조물의 PPF 제어기 실시간 다중변수 조정", 한국소음진동공학회논문집, 제 11권, 제 1호, pp.147-155.
- (7) 허석, 이승범, 광문규, 백광현, "적응형 PPF 제어기를 이용한 지능구조물의 실시간 능동진동제어", 한국소음진동공학회 논문집, 제 14권 제 4호, 2004년, pp. 267-275.
- (8) <http://www.comfile.co.kr>
- (9) Paul H.W. Thomas L.P. Keith O. "Random Vibrations Theory and Practice", 1995, John Wiley & Sons, Inc. pp. 341-365.
- (10) William, H.P. William, T.V. Saul, A.T. Brian, P.F. "Numerical Recipes in C.," Cambridge Univ. Press 2ed. 1992, pp. 496-559.