

# 아날로그 회로와 마이크로 프로세서를 이용한 PPF 제어기의 구현

## Implementation of PPF Controller Using Analog Circuit and Microprocessor

허 석<sup>†</sup> · 김 기 영\* · 곽 문 규\*\*

Seok Heo, Ki-Young Kim and Moon K. Kwak

(2003년 4월 28일 접수 : 2004년 5월 7일 심사완료)

**Key Words** : Smart Structure(지능 구조론), PPF Controller(양변위 케환 제어기), PIC16F877(마이크로 컨트롤러)

### ABSTRACT

This paper is concerned with the implementation of the active vibration suppression controller using analog circuit and microprocessor. The target active vibration controller is the positive position feedback(PPF) controller since it provides a simple algorithm suitable for both analog circuit and digital controllers. In this study, the analog PPF controller is realized using an operational amplifier and the digital PPF controller is realized using a low-cost micro-controller. The circuit diagrams are explained in detail. We then discuss the advantages and disadvantages of both methods from the view of practical implementation. Experimental results show that both implementation methods can be effectively used for the active vibration control but need to be chosen based on the mission objective.

### 1. 서 론

압전재료가 구조물과 결합된 제어 시스템을 일반적으로 지능구조물이라고 부른다. 지능구조물의 능동진동제어기로서 여러 가지 제어기<sup>(1~4)</sup>가 제안되었지만 실제로 이들 제어기를 어떻게 구현하는지에 대해서는 구체적으로 논의된 바가 없다. 지능구조물의 능동진동제어기로 제안된 제어기법 중 positive position feedback(PPF) 제어기<sup>(5)</sup>는 다른 제어기법들에 비해 아날로그 회로로 구현이 가능하고 디지털 제어기로 변환하더라도 비교적 단순한 알고리즘을 제공하기 때문에 실제 현장에서 선호되고 있다. 제어 알고리즘이 개발된 경우 이를 실험실 환경에서 시험하는 경우에

는 dSpace사<sup>(6)</sup>의 제품과 같은 DSP칩이 내장된 보드를 사용하고 있다. 그러나 실제로 이들 제어기를 실용화하기에는 고가의 DSP 보드가 적합하지 못하다. 본 연구에서는 저가의 전자회로와 마이크로 프로세서를 이용한 능동진동제어기의 구현방법에 대해 논하고자 한다. 특히, OP 앰프를 이용한 아날로그 PPF 제어기의 구현과 저가의 마이크로 프로세서를 이용한 디지털 PPF 제어기의 구현방법에 대해 조사하였다. PPF 제어기를 대상으로 연구를 수행하였지만, 본 연구의 결과는 PPF제어기에 국한되지는 않는다. 특히 디지털 제어기 구현 방법은 다른 제어기법에도 적용이 가능하다.

라플라스 변환을 사용하는 전달함수로 표현되는 제어기를 OP 앰프를 이용해 구현하는 방법에 대해서는 일부 교과서<sup>(7)</sup>에서 다루어지고 있다. 그러나 이 정보를 이용해 제어 시스템을 실용화하는 것은 쉽지 않다. 특히 감지기와 제어기가 포함되는 경우 전처리 앰프와 증폭 앰프도 구현해야 하는데 이에 대한 정보

† 책임저자 : 정회원, 동국대학교 기계공학과

E-mail : manwoo@dgu.edu

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

\* 정회원, 동국대학교 대학원 기계공학과

\*\* 정회원, 동국대학교 기계공학과

는 더 부족하다. 본 연구에서는 PPF 제어기를 아날로그 회로를 이용해 구현하는데 있어 필요한 회로의 구성과 그 특성을 먼저 자세하게 설명하고자 한다.

아날로그 회로를 이용한 제어기 구현에 비해 디지털 제어기는 프로그램을 이용해 구현할 수 있기 때문에 제어 알고리즘의 탄력적인 운용이 가능하다. 현재 우리 주변에는 헤아릴 수 없이 많은 종류의 마이크로 컨트롤러가 디지털 제어기로 사용되고 있다. 컴퓨터는 물론이고 TV, 냉장고, 완구 로봇 등의 제품에도 적어도 하나씩은 내장되어 있다. 가장 많이 사용되고 있는 제품으로 마이크로 칩사의 PIC 시리즈가 있는데 그 중에서도 가장 많이 사용되고 있는 것은 PIC16F84<sup>(8)</sup>이다. 개발자들 사이에서 PIC16F84가 유명하게 된 이유는 한 번 프로그래밍 할 수 있는 OTP타입 가격이 다른 마이크로 컨트롤러에 비해서 상대적으로 저렴하고 다양한 제품군으로 계속하여 발전시키고 있기 때문이다. PIC 시리즈는 PWM 발생부, UART, I2C, AD컨버터, USB 인터페이스 등과 같은 여러 가지 기능을 갖춘 광범위한 제품군을 보유하고 있으면서도 서로 동일한 명령 체계를 가지고 있어 쉽게 호환된다는 장점과 I/O의 수, 내부메모리의 크기 등에 따라 세부화되어 개발자의 요구에 맞는 제품을 제공한다는 장점까지 갖고 있다. 그러나 이런 마이크로프로세서가 진동제어기에 적용된 바가 없다.

본 연구에서는 앞에서 설명한 바와 같이 능동진동 제어기의 디지털 구현을 위해 마이크로칩사에서 개발한 PIC 시리즈 중 RISC형 마이크로 컨트롤러 PIC16F877을 채택하였다. 실험 결과 PIC 16F877과 같은 마이크로 컨트롤러가 능동진동제어기로 사용하기에 부족함이 없음이 입증되었다.

## 2. 아날로그 및 디지털 PPF 제어 알고리즘

Single-Input Single-Output PPF 제어기는 다음과 같은 전달함수로 표현된다.

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

여기서  $\omega_f$ 와  $\zeta_f$ 는 PPF 보상회로의 필터 주파수와 감쇠인자이다. 일반적으로 PPF제어기는  $\omega_f$ 를 대

상 구조물의 고유진동수와 일치시킴으로써 능동진동 제어를 이룩한다. 식 (1)로 표현되는 PPF 제어기는 실제로는 저주파수통과필터와 그 형태가 동일하다. 따라서 OP 앰프로 구현되는 저주파수통과필터 회로를 이용하면 구현이 가능하다.

식 (1)을 디지털 제어기로 전환하기 위해서 다음과 같은 Bilinear 변환을 사용한다.

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

여기서  $T_s$ 는 디지털 제어기의 sampling 시간을 나타낸다. 식 (2)를 식 (1)에 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

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

식 (3)을 디지털 제어 알고리즘을 위한 이산화된 형태로 표현하면 다음과 같다.

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

여기서  $y_k$ 는 감지기 값을 나타내며,  $u_k$ 는 계산된 제어력 값을 나타낸다. 아래첨자가  $k-1$ 이 되면 한 sampling 시간 전의 값을 의미한다. 따라서 제어 알고리즘은 반복적으로 이전값들을 이용해 현재 값을 계산하게 된다. sampling 시간의 영향을 줄이기 위해서는 이 시간이 짧을수록 좋다.

### 3. 아날로그 PPF 제어기 제작

압전세라믹 감지기와 작동기가 부착된 보를 대상으로 아날로그 PPF 제어기를 구현하였다. 먼저 압전세라믹 감지기의 전하신호를 전압으로 변환하기 위한 전하앰프가 필요하다. 전하앰프는 고주파통과필터의 형태를 가지는데 이를 위해 OP 앰프를 이용하여 Fig. 1과 같은 전자 회로를 구성하였다. 전하앰프의 주파수 특성은 전하앰프의 입력단자에 압전세라믹 감지기를 직렬연결하고 FFT 신호분석기를 사용하면 구할 수 있다. 실제 사용된  $R_c$  는 10 M $\Omega$ ,  $C_c$  는 100 nF 이다.

Fig. 1의 전자회로에 대한 전달함수는 다음 식으로 표현된다.

$$\frac{V_c}{V_p} = -\frac{C_p}{C_c} \frac{s}{s + 1/(R_c C_c)} \quad (6)$$

고주파 통과 필터의 코너 주파수는 식(6)에서 보이는 바와 같이  $R_c$ 와  $C_c$ 의 값에 의해 결정되는데 제어하고자 하는 진동 신호의 기본 진동수보다 낮게 설정되어야 한다.

전하앰프를 통해서 나온 출력 값은 PPF 제어기 입력되는데 PPF제어기는 실제로 저주파수 통과 필터와 동일한 형태로 이루어져 있다. 저주파수 통과 필터의 필터주파수를 구조물의 고유 진동수에 맞추면 90도 위상각이 발생하여 능동감쇠효과를 줄 수 있게 된다. Fig. 2는 PPF 제어기 회로, 즉 저주파수 통과

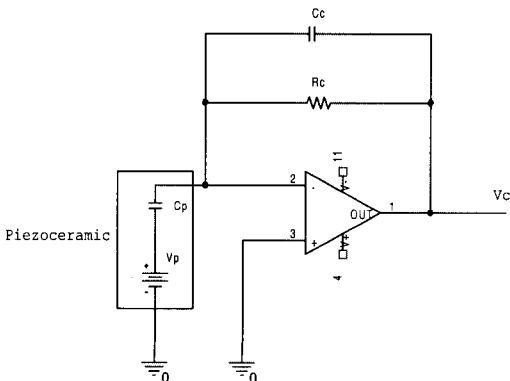


Fig. 1 Circuit of charge amplifier

필터를 나타낸다. 본 연구에서 고려한 보구조물의 고유진동수는 약 10 Hz로 PPF 필터주파수를 10 Hz에 맞추고 약간의 변화를 줄 수 있게 만들기 위하여  $R_1$  은 5 M $\Omega$ ,  $R_2$  는 1 M $\Omega$  가변저항,  $C_1$  은 100 nF,  $C_2$  는 1 nF을 사용하였다.

Fig. 2의 회로에 대한 입출력의 관계식은 식 (7)과 같이 유도된다.

$$\frac{V_o}{V_c} = \frac{1}{C_1 R_1 C_2 R_2} \times \frac{1}{s^2 + \frac{C_2(R_1 + R_2)}{C_1 R_1 C_2 R_2} s + \frac{1}{C_1 R_1 C_2 R_2}} \quad (7)$$

식 (7)로부터 알수 있듯이 PPF제어기의 필터주파수는  $R_1, R_2, C_1, C_2$ 에 의해 결정된다.

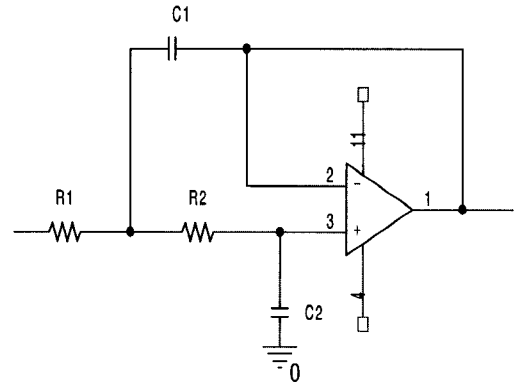


Fig. 2 PPF controller circuit

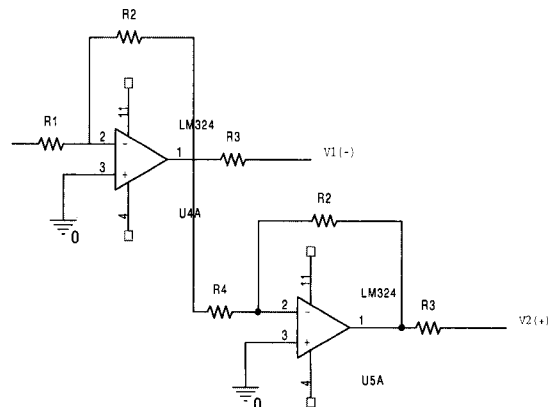


Fig. 3 Circuit of bridge amplifier

저주파수 통과 필터에서 나온 출력 값은 압전세라믹 작동기를 구동하는데 있어 전압값이 작기 때문에 증폭앰프를 이용하여야 한다. 그러나 본 실험에서는 압전세라믹을 부착한 지능구조물이 고전압을 사용하지 않아도 되는 구조물이기 때문에 OP 앰프를 이용하여 Fig. 3과 같은 간단한 브릿지 앰프 회로를 구성하였다. 실제 회로에 사용된 저항값  $R_1$ 은 1 k $\Omega$ ,  $R_2$ 는 10 k $\Omega$ ,  $R_3$ 는 100  $\Omega$ ,  $R_4$ 는 10 k $\Omega$ 이며 유도된 브릿지 앰프의  $V_1$ 과  $V_2$ 에 대한 관계식은 식 (8)과 같다.

$$V_1 = - \frac{R_2 R_4 + (R_2 + R_4) R_3}{R_1 R_4} V_o$$

$$V_2 = \frac{R_2^2 + R_2 R_3}{R_1 R_4} V_o \quad (8)$$

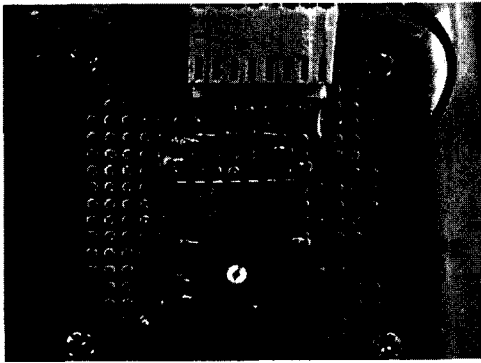


Fig. 4 PPF control patch

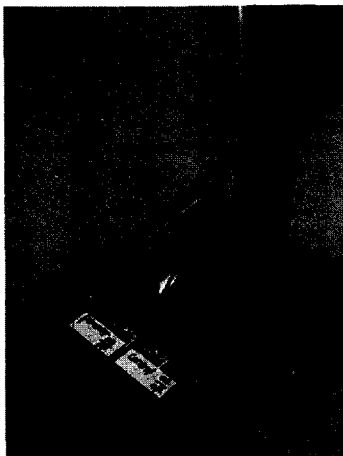


Fig. 5 PPF control demo system

앞의 저항값을 대입하면 약 20배 가량 증폭이 됨을 알 수 있다.

위에서 설명한 회로들을 모두 구현하기 위해서는 4개의 OP 앰프가 필요하다. 현재 시판되고 있는 LM324 칩은 OP 앰프 4개를 가지고 있어 위에서 보인 회로들 모두를 이 칩 한 개로 구현할 수 있다. Fig. 4는 LM324 OP 앰프 칩 한 개를 이용해 구성한 아날로그 PPF 제어기를 보여주고 있다. 그림으로부터 알 수 있듯이 아주 작은 크기로 제작이 가능하다. 그러나 대용량의 증폭앰프를 필요로 하는 경우에는 좀더 큰 전자회로가 필요하다.

참고로 LM324 칩을 사용하는 경우 전원은  $\pm 15$  V이다. 본 실험에서는 9 V 전원 4개를 사용하여  $\pm 18$  V를 사용하였는데 이 경우 압전세라믹에 제공되는 최대 전압차는 36 V가 될 수 있다.

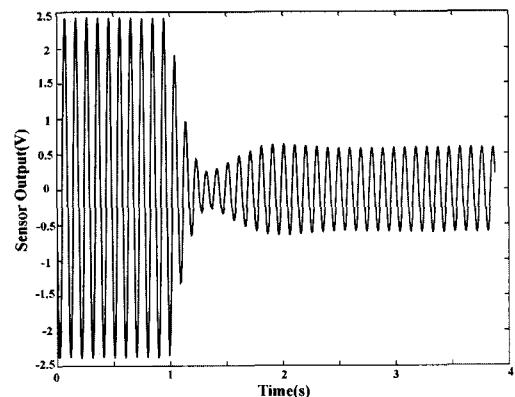
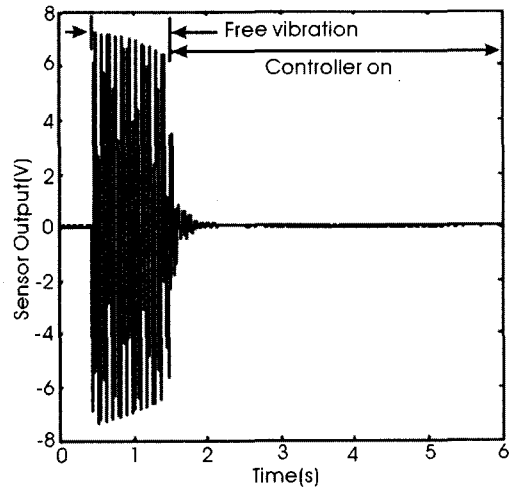


Fig. 6 Free and force vibration controlled response by analog PPF controller

Fig. 5는 압전세라믹 작동기와 감지기를 부착한 복합재 외팔보와 제어기 회로 및 스위치, 배터리를 야크릴 케이스에 담은 데모 시스템을 보여주고 있다. Fig. 6은 데모 시스템의 외팔보를 자유진동과 강제진동시키고 제어기를 구동하였을 경우의 응답을 보여주고 있다. 이 그림으로부터 개발된 아날로그 PPF 제어기가 효과적임을 알 수 있다.

위에서 설명하였듯이 아날로그 전자회로를 이용하여 SISO PPF 제어기를 간단하게 구현할 수 있다. 그러나 좀더 복잡한 전달함수로 표현되는 제어기나 여러 개의 모드를 제어하고자하는 경우에는 아날로그 전자 회로가 추가되어야 한다. 또한 입력이 여러 개이고 출력도 여러 개가 되는 경우에는 전자회로가 복잡해지게 되는데 이 경우 제어기 회로를 검증하는 것이 어렵게 된다. 그리고 제어 알고리즘에 변화가 있는 경우에는 전자회로의 일부를 바꾸어 주어야하는 불편함이 따르게 된다.

#### 4. 마이크로 프로세서를 이용한 디지털 PPF 제어기의 구현

아날로그 전자회로를 이용해 SISO PPF 제어기를 간단하게 구현할 수 있지만 확장성에 문제가 있음을 지적하였다. 제어 알고리즘을 디지털화하여 구현하는 경우에는 모든 계산이 전자회로의 연결이 아닌 알고리즘을 통해 이루어지기 때문에 제어기를 좀더 탄력적으로 운용할 수 있다.

본 연구에서는 저가의 마이크로 프로세서인 PIC 16F877(20 MHz)을 이용해 SISO PPF 제어기를 구

현하고 타당성을 조사하였다. PIC 16F877은 8비트 CMOS 원칩 마이크로 컨트롤러로 8 K 워드의 플래쉬 프로그램 메모리와 368 byte의 데이터 메모리, 256 byte의 EEPROM을 가지고 있고 8채널의 10비트 A/D 컨버터를 내장하고 있다. 80c196이나 8051 컨트롤러 같은 경우, 외부에 EPROM을 장착하기 때문에 부피가 그만큼 커지지만 PIC 계열은 내장된 EEPROM에 의하여 소형화가 가능하다. 또한 EEPROM을 사용하기 때문에 제어 알고리즘을 여러 번 지웠다 썼다 할 수 있다. 진동제어를 위해서는 고속의 데이터 처리가 필요하기 때문에 20 MHz 칩을 사용하였다. 이 경우 1명령 실행 속도는 200 ns가 된다.

디지털 PPF 제어기의 타당성 조사를 위해 Fig. 7과 같은 제어 시스템을 구성하였다. Fig. 7에서 보이는 바와 같이 압전감지기로부터 계속된 전압은 전압앰프와 Fig. 8의 차동앰프를 거쳐 PIC 16F877의 A/D 채널에 전달된다. 차동앰프를 사용하는 이유는  $\pm 15$  V 범위의 신호를 0~5 V 전압으로 전환하거나 또는 반대로 전환해야 하기 때문이다. 실제 사용한 값은  $R1=2$  k $\Omega$ ,  $R2=1$  k $\Omega$ ,  $R3=1$  k $\Omega$ ,  $R4=5$  k $\Omega$ 이다.

PIC 16F877에 내장된 A/D변환기는 0~5 V의 입력 전압을 10비트, 즉 0부터 1023의 정수값으로 변환한다. 이렇게 변환된 감지기 값은 PIC 16F877에 프로그래밍되어 있는 PPF 제어 알고리즘에 전달되어 적절한 제어값을 계산하게 된다. 제어값은 Fig. 7에 보이는 바와 같이 8 비트 D/A 컨버터를 거쳐 차동 앰프에 전달되고 브릿지 앰프를 통해 증폭되어 압전 작동기에 전달된다.

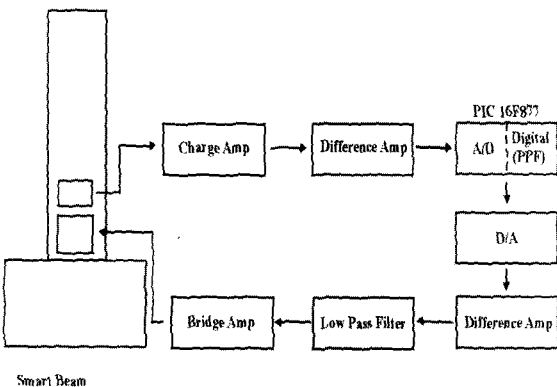


Fig. 7 Digital PPF control system

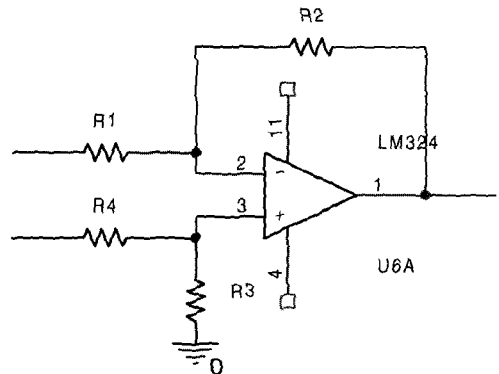


Fig. 8 Circuit of difference amplifier

PIC16F877에 다운로드될 제어알고리즘은 C언어를 이용해 작성되었다. 컴파일된 언어는 16진법 파일로 만들어져 다운로드 프로그램을 이용해 PIC 16F877에 프로그램화된다. 여러 종류의 C 컴파일러가 존재하지만 본 연구에서는 CCS-C 프로그램<sup>(9)</sup>을 사용하였다.

디지털 PPF 제어를 구현하는데 있어 가장 중요한 파라미터는  $T_s$ 이다.  $T_s$ 는 sample and hold 시간인데 디지털 제어기는 이 시간동안 값을 유지하게 된다. 디지털 PPF 제어가 효과적으로 작동하기 위해서는 sampling 시간이 짧아야 한다. 다시 말하면  $1/T_s$ 가 제어 대상인 진동모드의 고유진동수보다 커야 제어가 가능하다. 본 연구에서 채택한 PIC 16F877 마이크로 컨트롤러는 디지털 PPF 제어 알고리즘을  $T_s=1.3273$  ms, 즉 753 Hz로 구현할 수 있어 약 11 Hz의 진동모드를 제어하는데 큰 무리가 없음을 확인할 수 있었다. 디지털 제어기는 연속된 신호를 이산 신호로 변환하기 때문에  $T_s$ 가 아주 짧지 않으면 이산 신호가 압전작동에 전달될 때 잡음이 발생할 수 있다. 이런 현상을 제거하기 위해 Fig. 7에 보이는 바와 같이 D/A를 통해 나온 신호를 저주파 통과 필터 회로를 거쳐 부드럽게 만들었다. 본 실험에서 사용한 지능구조물의 기본 고유진동수는 약 11 Hz이기 때문에 cut off frequency를 200 Hz로 충분히 잡고, OP 앰프를 사용한 저주파통과필터를 구성

하였다. 실제로 사용한 값은  $R1=5$  k $\Omega$ ,  $R2=1$  M $\Omega$ ,  $C1=100$  nF,  $C2=1$  nF이다. 저주파 통과필터에서 나온 출력은 앞선 세라믹 작동기를 구동하는데 있어서 충분하지 않기 때문에 앞에서 사용했던 브릿지 앰프를 동일하게 사용하였다. Fig. 10은 PIC 16F877과 필요한 부가 전자 회로를 조합하여 만들어진 디지털 PPF 제어기의 실제 모습이다. 차동앰프와 저주파수 통과필터, 브릿지 앰프를 위해 LM324 칩을 사용하였다.

Fig. 11은 보를 자유진동과 강제진동시키고 일정시간이 흐른 후 제어를 구동하였을 경우의 감지기 시간 응답을 보여주고 있다. 그림으로부터 알 수 있듯이 디지털 PPF 제어가 성공적으로 작동하고 있음을 알 수 있다.

디지털 PPF 제어기는 앞에서 제작한 아날로그 PPF 제어기에 비해 C 언어를 이용해 제어 알고리즘을 구성하기 때문에 제어알고리즘의 확인이 용이한 반면 부가 전자회로가 필요하게 됨을 알 수 있다. 따라서 아날로그 PPF 제어기에 비해서 크기가 커진다. 그러나 아날로그 PPF제어기의 필터주파수 조정이 수동으로 이루어지는 반면에 디지털 PPF 제어기에서는 수치적으로 결정할 수 있다.

Fig. 12는 DSP 보드에 디지털화된 PPF제어기를 다운로드한 후 자유진동과 강제진동을 시킨 뒤에 얻은 응답곡선을 보여 준다. 따라서, Fig. 6,11,12의 응답곡선들로부터 자유진동제어와 강제진동제어에 대한 성능이 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다.

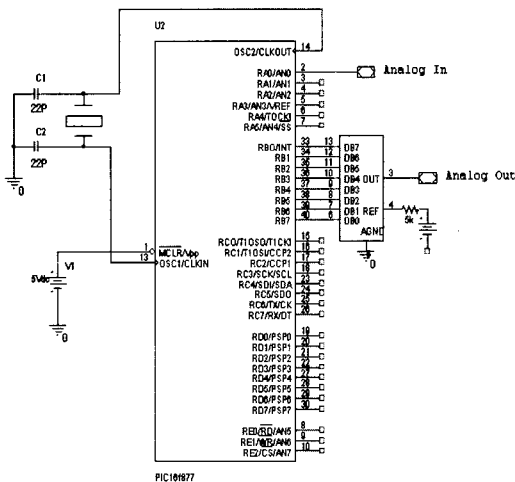


Fig. 9 PIC 16F877 and D/A

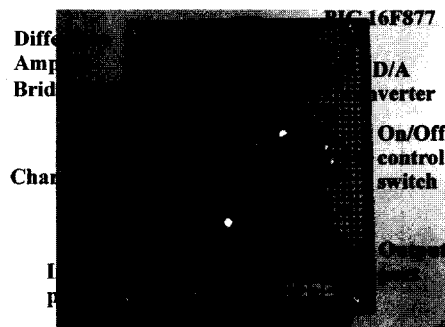


Fig. 10 Digital PPF controller

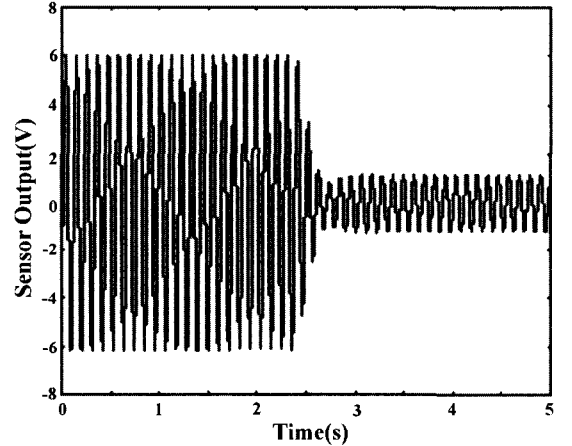
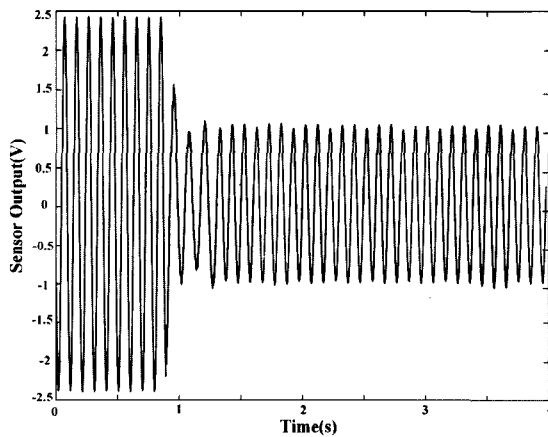
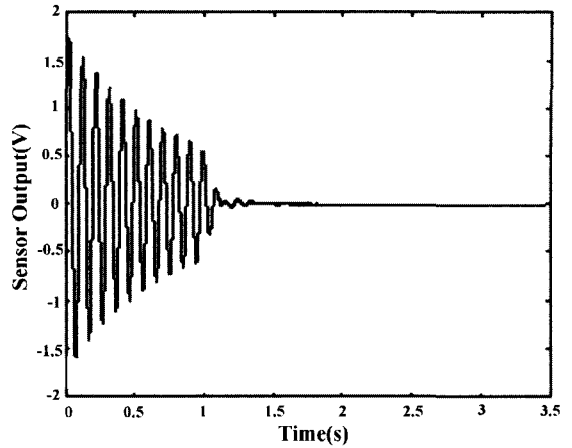
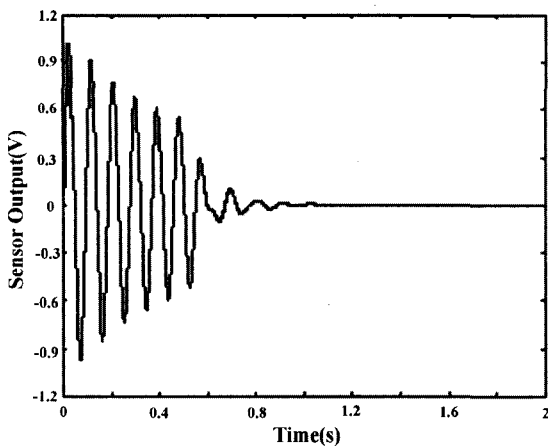


Fig. 11 Free and force vibration controlled response by digital PPF controller

Fig. 12 Free and force vibration controlled response by digital PPF controller(DSP board)

### 5. 토의 및 결론

본 연구에서는 지능구조물의 진동제어를 위한 제어기를 실용화하는데 있어 필요한 아날로그 전자회로 구현과 디지털 마이크로프로세서를 이용하는 방법을 조사하였다. 진동제어 대상물로는 압전세라믹 감지기 및 작동기가 부착된 외팔보를 고려하였다. 본 연구에서 고려한 제어기는 SISO PPF 제어기로서 이미 진동제어에 있어 이론적으로 또 실험적으로 그 성능이 입증된 제어기이다.

제어시스템의 구성에 있어 아날로그 제어기와 디지털 제어기 모두 압전세라믹 감지기의 신호를 전압으로 변환하는 전하앰프와 제어력을 증폭하는 증폭앰프가 기본적으로 필요하다. 아날로그 PPF 제어기는

한 개의 OP 앰프를 이용해 구현이 가능하다. 반면에 디지털 PPF 제어기는 한 개의 마이크로 프로세서와 신호처리를 위한 부가적인 전자회로들이 필요하다. 따라서 전자회로의 구성으로 보면 아날로그 PPF 제어기가 훨씬 간단하다. 디지털 PPF 제어기를 구현하는데 있어 가장 중요한 파라미터는 디지털 알고리즘을 계산하고 출력하는데까지 걸리는 시간이다. 이 시간은 마이크로 프로세서의 성능과 직결되는데 본 연구에서 채택한 PIC 16F877 칩은 11 Hz의 진동모드를 제어하는데 큰 어려움이 없었다. 물론 아날로그 PPF 제어기에는 이런 문제점이 없다. 아날로그 PPF 제어기를 실제로 구현하기 위해서는 적절한 저항값과 콘덴서값을 결정해야 하지만 디지털 PPF 제어기를 구현하는 경우에는 제어 알고리즘이 수식 형태로 프

로그래밍화되기 때문에 이런 문제점이 없다. 특히 PPF 제어기를 적용하는 경우 필터 주파수를 제어할 진동 모드와 고유진동수와 일치 시켜야 하는데 아날로그 PPF 제어기의 경우에는 저항과 콘덴서를 수동으로 조정하여 이루어지는 반면에 디지털 PPF 제어기의 경우에는 프로그램 상의 수치값으로 결정이 된다. 따라서 제어기의 파라미터 값을 바꾸어야 하는 경우에는 디지털 PPF 제어기가 유리하다.

결론적으로 한 개의 진동모드 제어를 위한 SISO PPF 제어기는 아날로그 회로를 이용하는 것이 바람직하다. 그러나 좀더 많은 진동모드와 복잡한 제어 알고리즘은 디지털 마이크로 프로세서를 사용하는 것이 바람직하다. 본 연구에서 제작한 아날로그 PPF 제어기와 디지털 PPF 제어기 모두 성공적으로 진동 제어를 이룩하였다.

## 후 기

본 연구는 국방과학연구소 기초연구사업(ADD-01-5-1)의 지원을 받아 수행되었다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

(1) 곽문규, 1995, "압전재료를 이용한 지능구조

물의 능동진동제어", 한국소음진동공학회논문집, 제 5 권, 제 3 호, pp. 292~302.

(2) 라완규, 곽문규, 윤광준, 1997, "압전감지기와 작동기를 이용한 복합재료 격자구조물의 능동진동 제어", 한국항공우주학회지, 제 25 권, 제 5 호, pp. 76~85.

(3) 곽문규, 라완규, 윤광준, 1997, "PPF와 SRF 조합제어 기법을 사용한 지능구조물의 능동진동제어", 한국소음진동공학회논문집, 제 7 권, 제 5 호, pp. 811~817.

(4) 곽문규, 1998, "지능구조물의 능동진동제어를 위한 다중 PPF 제어기와 수정 LQG 제어기의 비교 연구", 한국소음진동공학회논문집, 제 8 권, 제 6 호, pp. 1121~1129.

(5) Fanson, J. L. and Caughey, T. K., 1987, "PositivePosition Feedback Control for Large Space Structures," AIAA Journal, Vol. 28, No. 4, April 1990, pp. 717~724

(6) <http://www.dspaceinc.com>

(7) Kuo, B.C., Automatic Control Systems, 7th ed., Prentice-Hall International, 1995.

(8) 이희문, "PIC16F84의 기초+a", 성안당, 2003

(9) 오정원, "CCS-C 실전 가이드", 컴파일테크노러지, 2003