

# 마이크로 컨트롤러를 이용한 디지털 PPF 제어기의 구현과 실험

김기영<sup>†</sup>, 허 석<sup>\*</sup>, 곽문규<sup>\*\*</sup>

Realization and Experiment of Digital PPF Controller  
Using Micro-Controller

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

## Abstract

This paper is concerned with the digital implementation of the active vibration suppression controller. The digital controllers are often implemented on the DSP board, which is very fast but expensive. There are many low-cost micro-controllers on the market but the feasibility of such micro-controllers for the active vibration suppression has never been conducted. In this study, we selected PIC 16F877 as a proper micro-controller for the digital implementation of the PPF controller. The circuit diagrams are explained in detail. Experimental results show that the low-cost micro-controller can be used as the active vibration controller.

## 1. 서론

압전재료가 구조물과 결합된 제어 시스템을 일반적으로 지능구조물이라고 부른다. 지능구조물의 능동진동제어기로서 여러 가지 제어기가 제안되었는데 예를 들면 Fanson과 Caughy[1]가 제안한 Positive Position Feedback(PPF) 제어기와 곽[2-5]등이 제안한 MIMO PPF와 수정LQG 제어기 등이 있다. 특히, SISO PPF 제어기는 OP Amp와

간단한 전자 회로를 이용해 구현할 수 있기 때문에 실제 현장에서 선호하고 있다. 디지털 제어기를 적용하고 싶은 경우에는 dSpace사의 제품과 같은 DSP 보드를 사용하고 있다. 그러나 DSP 보드는 고가로 능동진동제어기를 실용화하는데 적합하지 못하다. 본 연구에서는 저가의 마이크로 컨트롤러를 이용해 능동진동제어기를 구현하는 방법에 대해 조사하였다.

현재 우리 주변에는 헤아릴 수 없이 많은 종류의 마이크로 컨트롤러가 실생활 깊숙이 자리를 잡아가고 있다. 컴퓨터는 물론이고 TV, 냉장고, 완구 로봇 등의 제품에도 적어도 하나씩은 내장되어 있다. 가장 많이 사용되고 있는 제품으로 마이크로

† 동국대학교 기계공학과 대학원

\* 동국대학교 산업기술연구원

\*\* 동국대학교 기계공학과 교수

칩사의 PIC 시리즈가 있는데 그 중에서도 가장 많이 사용되고 있는 것은 PIC16F84이다. 개발자들 사이에서 PIC16F84[6]가 유명하게 된 이유는 한번 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.

본 연구에서는 앞에서 설명한 바와 같이 능동진동제어기의 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. 디지털 PPF 제어 알고리즘

SISO 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 대상 구조물의 고유진동수와 일치시킴으로써 능동진동제어를 이룩한다. 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. (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.

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

이 알고리즘을 PIC16F877에 프로그래밍화하기 위해서 CCS-C 프로그램[7]을 사용하였다. 프로그램의 구성의 일부는 다음과 같다.

```
while(1)
{
    ad = read_adc();
    x = ad;
    y = x/512.0-1.0;
    f=-a1*fml-a0*fm2+b2*(y+2.0*ym1+ym2);
    daf = (2.0*f+2.0)*255.0/4.0;
    da = daf;
    portb = da;
    ym2 = yml; yml = y;
    fm2 = fml; fml = f;
}
```

여기서 read\_adc()는 A/D 변환값을 읽는 함수이며 계산된 값을 8비트로 전환해 portb에 전달하게 된다.

디지털 PPF 제어기를 구현함에 있어 가장 중요한 파라미터는  $T_s$ 인데 그 역은 디지털 제어기의 Sampling 속력이 된다. 디지털 PPF 제어기가 효과적으로 작동하기 위해서는 Sampling 속력이 제어 대상인 진동모드의 고유진동수보다 빨라야 한다. 본 연구에서 채택한 PIC 16F877 마이크로

컨트롤러는 디지털 PPF 제어기를  $T_s=1.3273$  ms, 즉 753Hz로 구현할 수 있어 이 조건을 만족함을 알 수 있었다.

### 3. 전자 회로의 구성과 실험

본 실험에 사용된 마이크로컨트롤러는 PIC 16F877 (20MHz)인데 8비트 CMOS 원칩 마이크로컨트롤러로 8K 워드의 플래쉬 프로그램 메모리와 368 byte의 데이터 메모리, 256 byte의 EEPROM을 가지고 있고 10비트 A/D 컨버터가 8채널 내장되어 있다. 80c196이나 8051 컨트롤러 같은 경우, 외부에 EPROM을 장착하기 때문에 부피가 그만큼 커지지만 PIC 계열은 내장된 EEPROM에 의하여 소형화가 가능하다. EEPROM을 사용하기 때문에 ERASE/WRITE가 여러 번 가능하다. 진동제어를 위해서는 고속의 데이터 처리가 필요하기 때문에 20Mhz 칩을 사용하였다. 이 경우 1명령 실행 속도는 200ns가 된다.

디지털 능동진동 제어기의 타당성 조사를 위해 압전세라믹 감지기와 작동기가 부착된 보드를 사용하였다. 기본 제어 흐름도는 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 보이는 바와 같이 압전감지기로부터 계측된 전압은 전하앰프와 차동앰프를 거쳐 PIC 16F877의 A/D 채널에 전달된다. 차동앰프를 사용하는 이유는  $\pm 15V$  범위의 신호를 0~5V 전압으로 변환해야 하기 때문이다.

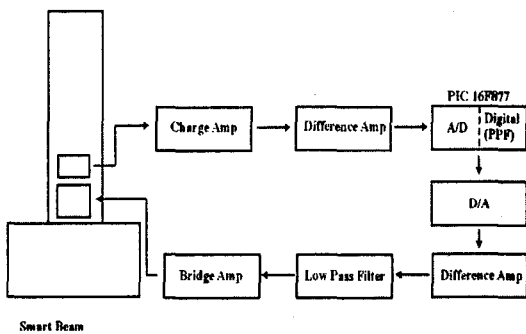


Fig. 1 Control System

전하앰프에서  $R_c$ 는  $10M\Omega$ ,  $C_c=47nF$ 을 사용하였고 차동앰프에서는  $R_1=2k\Omega$ ,  $R_2=1k\Omega$ ,  $R_3=1k\Omega$ ,  $R_4=5k\Omega$ 를 사용하였다. PIC 16F877에 내장된 A/D 변환기는 0~5V의 입력 전압을 10비트, 즉 0부터

1024의 정수값으로 변환한다. 이렇게 변환된 감지기 값은 PIC 16F877에 프로그래밍되어 있는 PPF 제어 알고리즘에 전달되어 적절한 제어값을 계산하게 된다. 제어값은 8 비트 D/A 컨버터를 거쳐 차동앰프에 전달되고 브릿지 앰프를 통해 증폭되어 압전작동기에 전달된다. 차동앰프를 사용하는 이유는 A/D변환기와는 반대로 0~5V의 전압신호를  $\pm 15V$  범위의 신호로 바꾸어야 하기 때문이다.

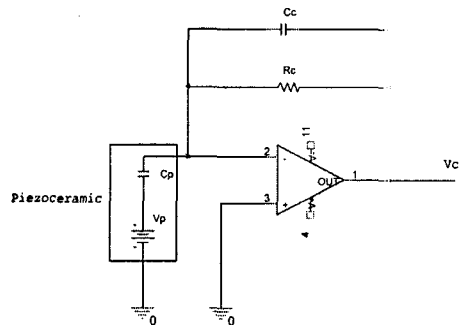


Fig. 2 Circuit of Charge Amplifier

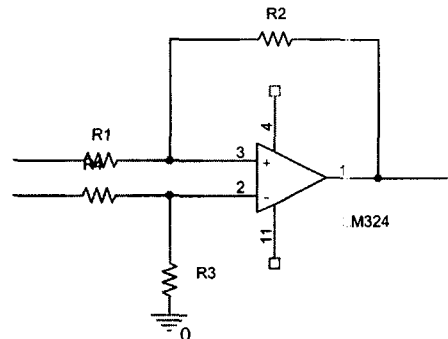


Fig. 3 Circuit of Difference Amplifier

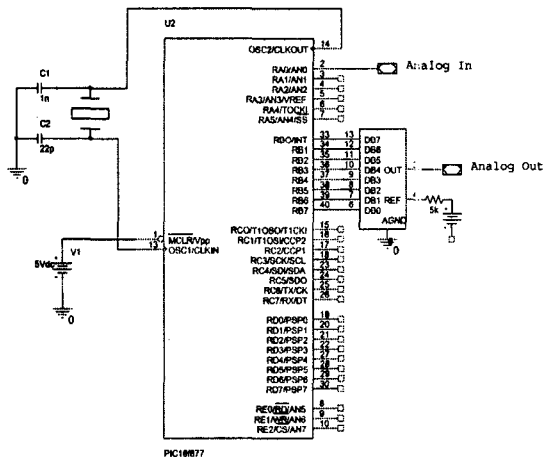


Fig. 4 PIC 16F877 and D/A

Fig. 4는 PIC 16F877 제어기에 D/A칩이 연결된 회로도로서 외부의 부가 회로가 없이 최소의 회로 구성으로 충분히 그 성능을 발휘할 수 있음을 알 수 있다.

연속된 신호를 이산 신호로 변환하기 때문에 Sampling Time이 아주 빠르지 않으면 이 신호가 압전작동기에 전달될 때 잡음이 발생한다. 이런 현상을 제거하기 위해 D/A를 통해 나온 신호를 저주파 통과 필터 회로를 거쳐 부드럽게 만들었다. 본 실험에서 사용한 지능구조물의 기본 고유진동수는 약 11Hz이기 때문에 Cut off frequency를 200Hz로 충분히 잡고, Op Amp를 사용한 능동 LPF(Fig. 5)를 구성하였다. 여기서  $R1=5K\Omega$ ,  $R2=1M\Omega$ ,  $C1=100nF$ ,  $C2=1nF$ 를 사용하였다.

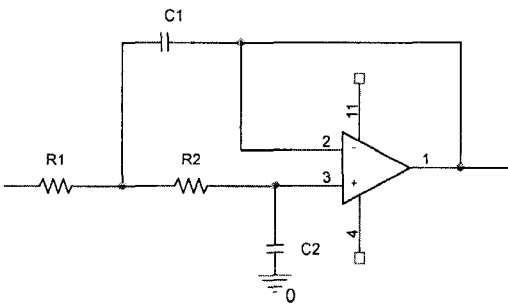


Fig. 5 Circuit of Low Pass Filter

LPF에서 나온 출력은 압전 세라믹 작동기를 구동하는데 있어서 충분하지 않기 때문에 Op Amp를 이용한 Bridge Amp(Fig. 6)를 구성하여 V- 와 V+로 출력을 만들었다. 실제 회로도 는 Fig. 6과 같으며 사용된 저항 소자의 값은  $R1=1k\Omega$ ,  $R2=10k\Omega$ ,  $R3=100\Omega$ ,  $R4=10k\Omega$  이다.

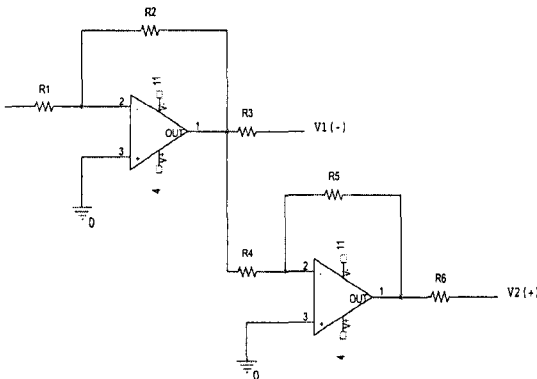


Fig. 6 Circuit of Bridge Amplifier

Fig. 7은 위에서 설명한 회로를 조합하여 만들어진 디지털 PPF 제어기의 실제 모습이다. 사용된 OP Amp는 LM324로서 구동 전압은  $\pm 15V$ 이다. Fig. 7과 같은 전자 회로를 이용해 능동진동제어를 구현할 수 있었다.

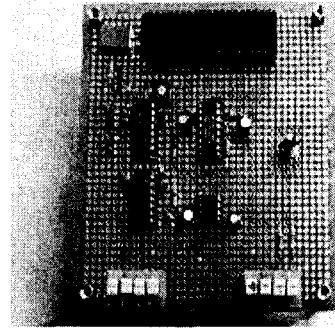


Fig. 7 Microcontroller Setting Model

#### 4. 실험 결과

Fig. 7의 전자회로를 압전 세라믹 감지기와 작동기에 연결하고 실험을 수행하였다. 디지털 PPF제어기의 필터주파수는 외팔보의 고유진동수와 같은 11Hz로 맞추었으며  $\zeta_r$ 는 0.3을 사용하였다. 비교적 큰 감쇠인자 값을 사용하는 이유는 처리할 수 있는 주파수 폭을 넓히기 위함이다. Fig. 8은 보를 자유 진동시키고 일정시간이 흐른 후 제어기를 켜는 경우의 감지기 시간 응답을 보여주고 있다. 그림으로부터 알 수 있듯이 진동제어기가 성공적으로 작동하고 있음을 알 수 있다.

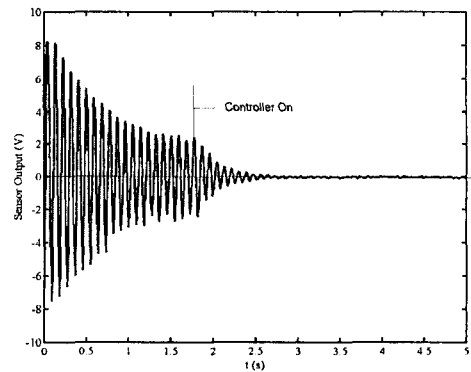


Fig. 8 Time Response Plots

#### 4. 토의 및 결론

본 논문에서는 저가의 마이크로 컨트롤러로서 가장 많이 사용되고 있는 PIC 시리즈 중 PIC16F877을 이용하여 디지털화한 PPF제어기를 구현하는 방법을 소개하였다. PIC16F877(20Mhz)은 DSP 칩처럼 신호 처리 전용이 아니기 때문에 충분한 메모리와 빠른 계산수행능력을 갖지 못하지만 디지털 PPF 제어기를 약 753Hz로 구현할 수 있었기 때문에 10Hz 정도의 기본 진동수를 제어하는데 부족함이 없음을 알 수 있었다. 따라서 PIC 컨트롤러로 충분히 PPF 제어기를 구현 할 수 있고 다른 디지털 능동진동제이기도 가능함을 결과로부터 확인할 수 있었다.

마이크로 컨트롤러를 이용하여 디지털 능동진동제어기를 설계함으로써 능동 진동 제어기의 소형화 및 저가의 제어기 제작이 가능해졌다. 이런 제어기를 지능구조물에 적용하면 보다 현실적인 제품을 구현할 수 있다. 더 나아가서 PIC 계열 중의 18F 시리즈는 clock이 40Mhz로 고속이기 때문에 좀더 복잡한 형태의 디지털 능동진동 제어기도 충분히 구현할 수 있을 것으로 보인다. 뿐만 아니라 그 이상의 성능을 발휘할 수 있는 다른 소형 마이크로 컨트롤러들이 시중에 속속 등장하고 있기 때문에 더욱 정확하고 더욱 빠른 수행 능력을 가지고 능동진동제어에 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 후 기

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

#### 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, April 1990, pp. 717-724
- [2] 곽문규, "압전재료를 이용한 지능구조물의 능동진동제어", 한국소음진동공학회지, 제 5권 제 3호, 1995년 9월, pp. 292-302.
- [3] 라완규, 곽문규, 윤광준, "압전감지기와 작동기를 이용한 복합재료 격자구조물의 능동진동제어", 한국항공우주학회지, 제25권, 제5호, 1997, pp. 76-85.
- [4] 곽문규, 라완규, 윤광준, "PPF와 SRF 조합제어 기법을 사용한 지능구조물의 능동진동제어", 한국소음진동공학회지, 제7권 제5호, 1997, pp. 811-817.
- [5] 곽문규, "지능구조물의 능동진동제어를 위한 다중 PPF 제어기와 수정 LQG 제어기의 비교 연구", 한국소음진동공학회지, 제 8권 제 6호, 1998, pp. 1121-1129.
- [6] 이희문, "PIC16F84의 기초+a", 성안당
- [7] 오정원, "CCS-C 실전 가이드", 컴파일 테크노러지