

# 펄스폭변조를 이용한 지능구조물의 능동진동제어

## Active Vibration Control of Smart Structure Using Pulse Width Modulation

곽 문 규† · 김 기 영\* · 방 세 윤\*\*

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

(2004년 11월 2일 접수 ; 2004년 12월 11일 심사완료)

**Key Words** : Active Vibration Control(능동진동제어), Smart Structure(지능 구조물), Pulse Width Modulation (펄스폭변조)

### ABSTRACT

This paper is concerned with the active vibration control of smart structure using actuator signal made of pulse width modulation. The pulse width modulation has been used in motor control, where the amount of energy fed into the motor is controlled by the pulse width instead of applied voltage. The advantage of using the pulse width modulation is that analog signal can be replaced by the digital signal so that we can reduce system costs and power consumption. The effect of pulse width modulation on the vibration response was investigated in this study and the valid transformation rule was found. Then, the pulse width modulation was realized using a microprocessor and electronic circuit. The active vibration suppression was carried out by combining the positive position feedback controller and the pulse width modulation. The experimental result shows that we can replace an expensive amplifier with a pulse width modulation system thus reducing the system cost. The result also shows that the active vibration control can be achieved by the pulse width modulation technique.

### 1. 서 론

압전세라믹과 같은 지능재료를 이용해 구조물의 진동을 제어하는 경우, 압전세라믹 작동기를 구동할 수 있는 고전압의 증폭앰프가 필요하다.<sup>(1)</sup> 고전압의 증폭앰프는 제어기의 DA 변환기에서 출력된 값을 증폭하는 장치인데, 고가의 장비<sup>(1)</sup>이며 크기가 커 소형화를 필요로 하는 응용에 적합하지 못하다. 이 연구에서는 이를 해결할 수 있는 한 방법으로 펄스폭변조기법을 제안하고자 한다. 펄스폭변조(pulse-width-modulation, PWM)는 모터의 제어에 많이 사용되고

있는 기법으로서 펄스의 폭을 조절해 시스템에 입력되는 에너지를 제어하는 방식이다.<sup>(2)</sup> PWM 기법은 아날로그 시스템을 디지털 방식으로 제어하는 방법이다. 이 방법을 사용하는 경우 시스템 비용과 전력소모를 현저하게 줄일 수 있다. 최근의 상용 마이크로프로세서나 DSP 보드들은 모두 PWM 출력을 탑재하고 있어, 이를 실제로 응용하는데 큰 어려움이 없다. PWM은 아날로그 신호를 디지털로 인코딩하는 방법이라고 말할 수 있는데, 사각파의 폭을 조절함으로써 아날로그 신호에 대응하는 디지털 신호를 생성하는 방법이다.<sup>(2,3)</sup> 이 경우 작동기에 제공되는 신호는 완전한 디지털 출력이거나 아니면 전원이 없는 상태가 된다. 전원은 반복되는 펄스의 연속 동작 형태로 작동기를 통해 아날로그 시스템에 제공됨으로써, 마치 아날로그 신호가 제공되는 효과가 있다. 이와 같은 효과를 얻기 위해서는 PWM의 주파수를 아주 높게 해야 하는데, 일반적으로 1 kHz에서 200 kHz 사

† 책임저자 : 정희원, 동국대학교 기계공학과  
E-mail : kwakm@dgu.ac.kr  
Tel : (02) 2260-3705, Fax : (02) 2263-9399  
\* 동국대학교 대학원 기계공학과  
\*\* 동국대학교 기계공학과

이의 펄스폭 변조 주파수가 사용된다. PWM 방식은 모터의 제어<sup>(3)</sup>, 우주구조물의 자세제어<sup>(4)</sup> 등에 폭넓게 이용되고 있다.

이 연구에서는 기존의 아날로그 방식<sup>(5)</sup>과는 달리 PWM 방식을 이용해 압전세라믹 작동기를 구동하는 방법을 조사하였다. 먼저 PWM으로 가진되는 경우 일자유도 진동계의 응답이 어떻게 나타나는지 검토하였다. 펄스폭을 결정하는데 있어 변위 일치에 근거를 둔 공식과 속도 일치에 근거를 둔 공식 중 어떤 공식을 사용하는 것이 타당한지 조사하였다. 조사 결과 속도 일치에 근거를 둔 공식이 타당함이 발견되었다. 이와 같은 이론 연구 결과를 바탕으로 PWM 장치의 구현에 대해 토의하였으며, 실험을 통해 PWM 방식의 효율성을 입증하였다. PWM 신호를 압전세라믹 작동기에 적용함으로써 지능구조물의 능동진동제어를 펄스 신호를 통해 성취할 수 있음을 확인하였다. 이 연구의 결과를 이용하면 차후에는 고가의 증폭앰플 사용하지 않아도 될 것으로 판단된다.

## 2. PWM 가진에 의한 진동응답

마이크로프로세서와 같은 디지털 제어기를 이용해 진동계에 제어력을 가하는 경우 아날로그 형태의 제어력은 Fig. 1(a)에 보이는 바와 같이 표본추출시간 동안에 일정한 값을 가지는 이산 제어력으로 변환된다. 그렇지만 Fig. 1(a)에서 보이는바와 같이 가진폭은 각각 다르게 나타난다. 이 연구에서는 가표본추출시간 구간마다 다른 진폭을 PWM을 이용해 동일한 가진폭을 가지지만 듀티(duty)비가 다른 펄스로 바꾸는 방법을 제안하고자 한다.

Fig. 1에 보이는 기진력에 대한 응답을 구하기 위해 다음식과 같은 일자유도 진동계의 단위계단가진응답을 고려해보자.

$$s(t) = \frac{1}{k} [1 - e^{-\zeta\omega_n t} (\cos\omega_d t + \frac{\zeta\omega_n}{\omega_d} \sin\omega_d t)] \quad (1)$$

여기서  $k$ 는 스프링 상수,  $\zeta$ 는 감쇠비,  $\omega_n, \omega_d$ 는 각각 비감쇠와 감쇠 고유진동수를 나타낸다.

식 (1)을 고려하면 Fig. 1(a)에서 단위 계단 함수의 가진폭이  $f$ 로 주어진 경우에 대해 0초에서 시작하여 분할된 시간 간격  $\Delta T$ 가 흐른 후의 응답은 다음

과 같이 유도된다.

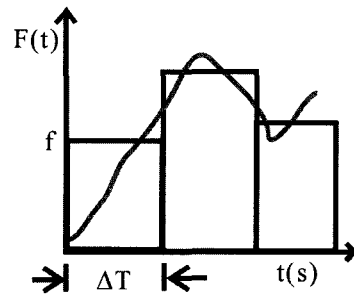
$$x(\Delta T) = \frac{f}{k} [1 - e^{-\zeta\omega_n \Delta T} (\cos\omega_d \Delta T + \frac{\zeta\omega_n}{\omega_d} \sin\omega_d \Delta T)] \quad (2)$$

그리고 이 경우의 속도 변화는 다음과 같이 유도된다.

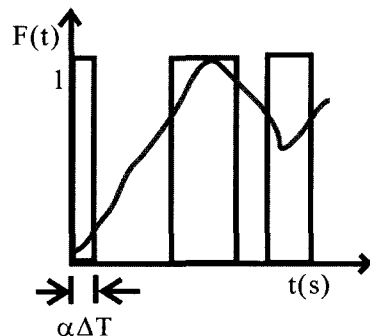
$$v(\Delta T) = \frac{f\omega_n}{k\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n \Delta T} \sin\omega_d \Delta T \quad (3)$$

Fig. 1(b)의 경우는 펄스폭 변조가 이루어진 경우인데 단위계단 기진력이 표본추출시간,  $\Delta T$ , 전 구간에 걸쳐 작용하는 것이 아니고 일부 시간영역  $\alpha\Delta T$ 에 작용하는 경우이다. 이 경우에 표본추출시간이 끝나는 시점의 응답이 다음과 같이 유도된다.

$$x(\Delta T) = \frac{1}{k} [1 - e^{-\zeta\omega_n \Delta T} (\cos\omega_d \Delta T + \frac{\zeta\omega_n}{\omega_d} \sin\omega_d \Delta T)]$$



(a) Step



(b) PWM

Fig. 1 Equivalent excitations

$$-\frac{1}{k} [1 - e^{-\zeta \omega_n (1-\alpha) \Delta T} (\cos \omega_d (1-\alpha) \Delta T + \frac{\zeta \omega_n}{\omega_d} \sin \omega_d (1-\alpha) \Delta T)] \quad (4)$$

또한 이 경우의 속도 변화는 다음과 유도된다.

$$v(\Delta T) = \frac{w_n}{k\sqrt{1-\zeta^2}} [e^{-\zeta \omega_n \Delta T} \sin \omega_d \Delta T - e^{-\zeta \omega_n (1-\alpha) \Delta T} \sin \omega_d (1-\alpha) \Delta T] \quad (5)$$

여기서 두 가지 경우를 생각할 수 있다. 첫 번째 경우는 펄스폭 변조를 하여  $\Delta T$ 에서의 변위응답이 같아지도록 만드는 것이다. 이 경우 식 (2)와 식(4)가 동일한 값을 가져야 한다.  $\Delta T$ 가 아주 작다고 가정할 경우 (2)식과 (4)식은 다음과 같이 근사시킬 수 있다.

$$\frac{f w_n^2 \Delta T^2}{2k} = \frac{w_n^2 \Delta T^2 \alpha (2-\alpha)}{2k} \quad (6)$$

식 (6)으로부터 다음과 같은 관계식이 유도된다.

$$\alpha = 1 - \sqrt{1-f} \quad (7)$$

두 번째 경우는  $\Delta T$ 에서의 속도 응답이 같아지도록 만드는 경우이다. 이 경우 식 (3)과 (5)가 동일한 값을 가져야 한다.  $\Delta T$ 가 아주 작다고 가정할 경우 식 (3)과 식 (5)은 다음과 같이 근사시킬 수 있다.

$$\frac{f \omega_n^2 \Delta T}{k} = \frac{\alpha \omega_n^2 \Delta T}{k} \quad (8)$$

따라서 식 (8)으로부터 다음과 같은 관계식이 유도된다.

$$\alpha = f \quad (9)$$

여기서 PWM으로 변환할 경우의 펄스폭 결정에 대한 공식이 2개가 유도됨을 알 수 있다. 두 가지 공식 중 어느 것이 유효한지 결정하기 위해 첫 번째 공식으로부터 결정된 PWM파를 사용하는 경우와 두 번째 공식으로 결정된 PWM파를 사용하는 경우에 아주 짧은 시간  $\Delta T$ 가 흐른 후 응답이 어떻게 나타나는지 살펴보자. 이를 위해 다음과 같은 운동방정식을 고려하였다.

$$\ddot{x} + 0.2\dot{x} + x = u \quad (10)$$

$u=0.5$ 인 경우에 대한 시스템 응답은 식 (2)를 사용해 구할 수 있으며 각각의  $\alpha$ 에 대한 응답은 식 (4)를 이용해 구할 수 있다. Fig. 2는  $\Delta T=0.01s$ 인 경우의 응답을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 예상한대로 공식 (7)에 근거하면 변위가 같아지고 공식 (9)에 근거하면 속도가 같아짐을 알 수 있다. 여기서 PWM 파를 구현하기 위해 0.01초를 100등분하여 펄스폭을 조정하였다. 따라서 공식 (7)에 근거하면 29 구간 동안  $u=1$ 이 되며 공식(9)에 근거하면 당연히 50구간 동안  $u=1$ 이 된다.

짧은 시간이 흐른 후의 응답 비교에 대한 것으로는 판단이 어려워 1초 후의 응답을 계산하여 그 차이를 살펴보았다. Fig. 3은 1초 후의 응답이 어떻게 달라지는지를 보여주고 있다. 그림으로부터 속도 일치에 근거를 둔 공식 (9)가 더 엄밀해에 가까운 응답을 주고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 PWM 파의 펄스폭은 제어기의 출력값의 최대값을 기준으로 그 비에 따라 듀티비를 결정하면 됨을 알 수 있다.

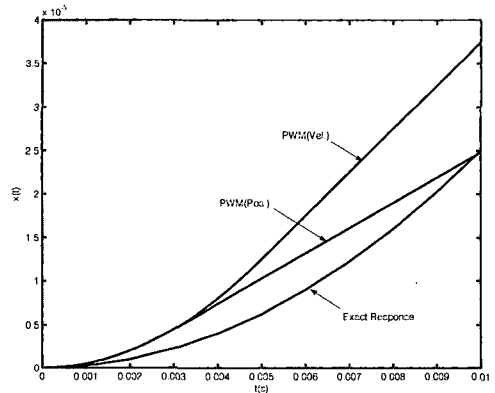


Fig. 2 Time response in short-time interval

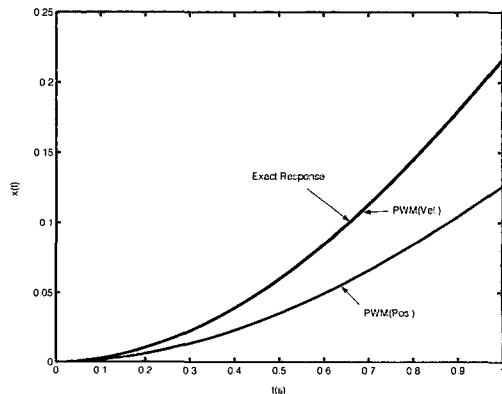


Fig. 3 Time response in long-time interval

### 3. PWM 구현 방법

이 연구에서는 압전세라믹 감지기와 작동기를 장착한 복합재료를 지능구조물로 이용해 실험을 수행하였다. Fig. 4는 지능구조물과 OP 앰프, 마이크로프로세서

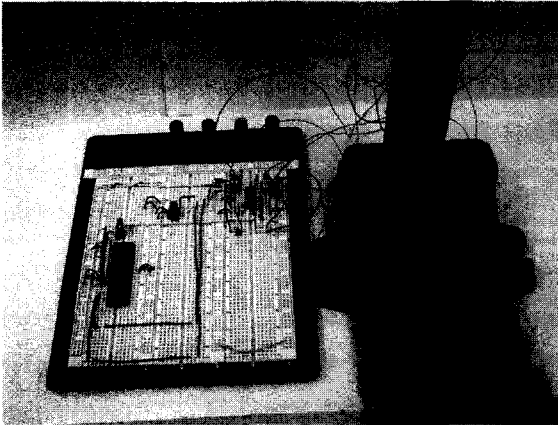


Fig. 4 Breadboard and cantilever

서가 부착된 브레드보드를 보여주고 있다. Fig. 5는 Fig. 4의 시스템에 대해 좀더 구체적인 구성을 보여주고 있다.

PWM 파의 구현 및 증폭을 위해 Fig. 6에 보이는 것과 같은 차등앰프를 사용하였다. 차등앰프는 마이크로프로세서에서 생성된 2개의 PWM파를 증폭하는 역할을 담당한다. 마이크로프로세서에서 생성된 PWM파는 0과 5 V의 디지털 신호이다. 차등앰프는 이를 증폭하여 +15 V의 펄스를 생성한다. 2개의 PWM파를 이용하는 이유는 제어기에서 계산한 출력

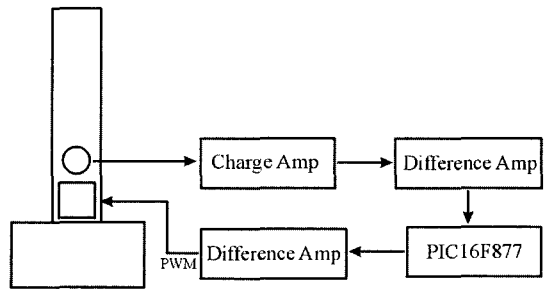


Fig. 5 Experimental setup

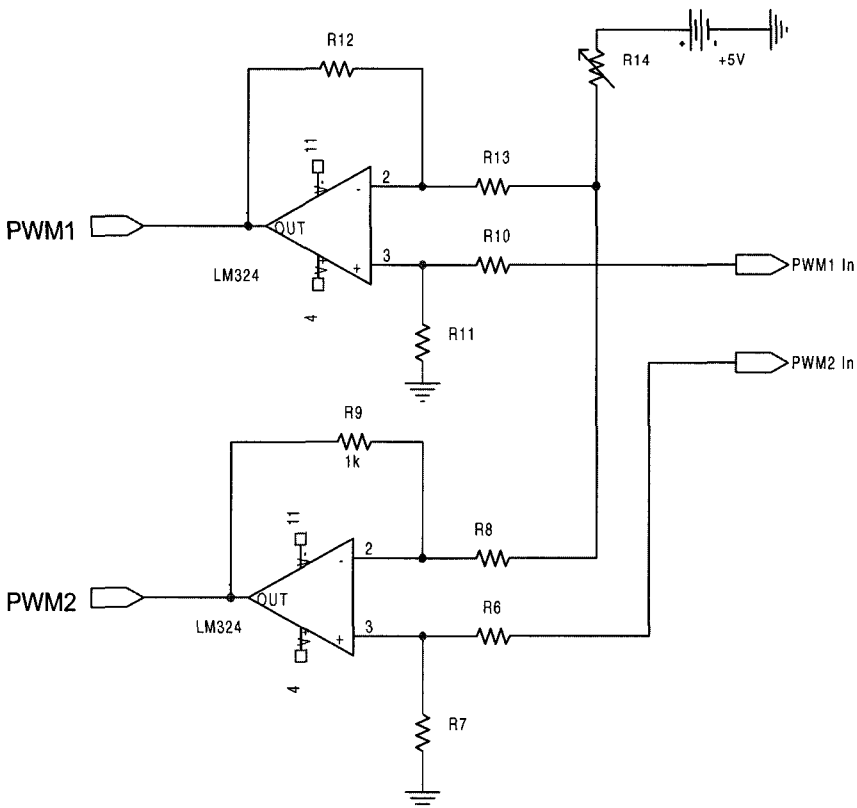


Fig. 6 Difference amplifiers

값이 음수값을 가질 수 있기 때문이다. 양수의 제어력이 계산될 경우 첫 번째 PWM과 출력단에서는 그 제어력에 비례한 듀티비의 PWM파가 생성되며 두 번째 PWM과 출력단에서는 0V가 출력된다. 음수의 제어력이 계산될 경우에는 첫 번째 PWM과 출력단에서는 0V가 출력되면 두 번째 PWM과 출력단에서는 절대값에 비례한 듀티비를 가지는 PWM파가 생성된다. 따라서 압전세라믹 작동기에 작용하는 제어력 펄스의 전압은  $\pm 15\text{V}$ 이다.

이 연구에서 사용한 마이크로프로세서는 Fig. 7에 보이는 것과 같은 PIC16F877로서 AD 변환기와 PWM 생성기를 모두 가지고 있는 범용 마이크로프로세서이다. 압전감지기 신호는 전하앰프와 차등앰프를 거쳐 마이크로프로세서에 입력되는데 차등앰프를 사용하는 이유는 감지기 신호가 양수 또는 음수 값을

가지는 반면에 마이크로프로세서의 AD 변환기가 0에서 5V 사이의 입력값을 받아들이기 때문이다.

먼저 이와 같은 장비들을 이용하여 PWM 파를 압전세라믹 작동기에 입력하였을 경우 우리가 예상한 바와 같은 아날로그 신호 효과를 얻을 수 있는지 조사하였다. 마이크로프로세서, PIC16F877을 이용하여 지능구조물의 고유진동수, 10 Hz 사인파에 해당하는 40 kHz의 PWM파를 생성하여 압전세라믹 작동기에 적용하였다. 이 PWM 파를 압전작동기에 입력하였을 경우 나타나는 지능구조물의 감지기 신호는 Fig. 8과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 10 Hz로 진동을 하면서 동시에 약간의 높은 진동수 가진이 동시에 발생함을 알 수 있다. 이것은 PWM 사각파의 영향으로 발생하는 것이다. 그러나 저주파수의 제어력을 구현하는 것에는 큰 문제가 없음을 알 수 있다.

#### 4. 능동진동제어 실험

사인파에 해당하는 PWM파를 생성하여 구조물에 가한 경우 사인파 가진과 동일한 응답을 얻을 수 있음을 확인하였다. 이와 같은 실험 결과를 바탕으로 능동진동제어력을 압전세라믹 감지기 값을 바탕으로 계산하고 PWM파로 구현하여 이를 압전세라믹 작동기에 적용해 능동진동제어가 가능한지 살펴보았다. 이 연구에서 사용한 능동진동제어기는 양변위피막임

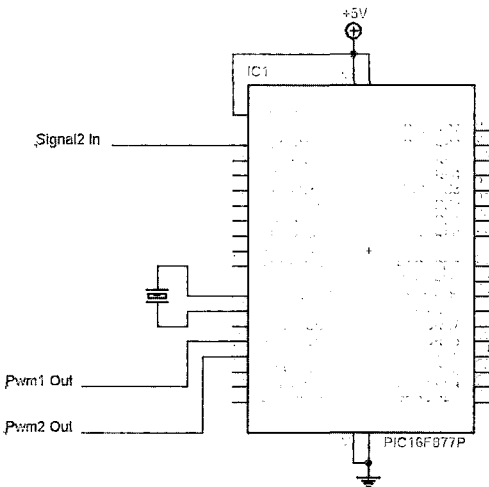


Fig. 7 PIC 16F877 microprocessor

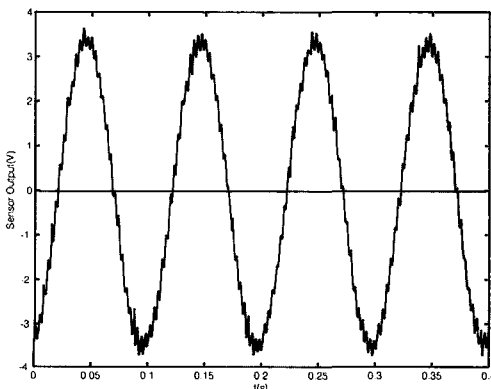


Fig. 8 Sensor output by sine-equivalent PWM excitation

```

ad = read_adc();
x = ad;
y = x/512.0-1.0;
f=-a1*fm1-a0*fm2+b2*(y+2.0*y1+ym2);
daf = (2.0*f+2.0)*124.0/4.0;
duty = daf;
ym2 = ym1; ym1 = y;
fm2 = fm1; fm1 = f;
if(ad < 512)
{
    set_pwm2_duty(0);
    set_pwm1_duty(duty);
}
if(ad)=512)
{
    set_pwm1_duty(0);
    set_pwm2_duty(duty);
}
    
```

Fig. 9 Part of control program

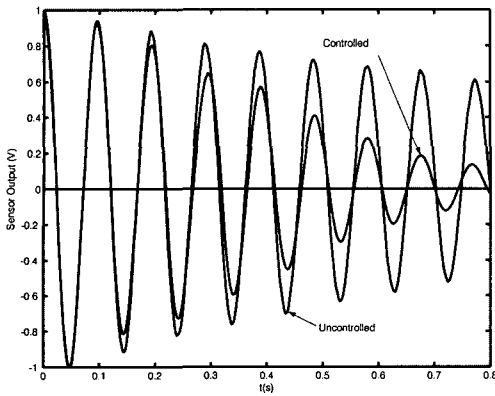


Fig. 10 Experimental time histories of uncontrolled and controlled responses

(PPF)제어기<sup>(5,6)</sup>로서 디지털로 변환된 것을 사용하였다. Fig. 9는 마이크로프로세서에 저장된 프로그램의 일부를 보여주고 있는데 제어력,  $f$ 를 계산하는 줄이 디지털 PPF 제어기를 나타낸다. 앞에서 설명한 바와 같이 출력값의 부호에 따라 두개의 PWM 출력값이 결정된다. Fig. 10은 제어기가 적용되지 않은 경우의 응답과 디지털 PPF 제어기를 이용해 얻어진 응답을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 진동이 잘 억제되고 있음을 알 수 있다.

### 5. 결과 및 토의

이 연구에서 우리는 지능구조물의 능동진동제어를 위한 방법으로서 PWM파를 이용하는 방법을 제안하였다. 압전세라믹 작동기를 이용하는 경우에 고전압의 아날로그 증폭앰프가 필요한데 이 연구에서는 아날로그 증폭앰프를 사용하지 않는 방법으로서 PWM파를 사용하여 디지털화한 신호를 사용하는 방법을 고려했다.

이 연구에서 고려한 PWM파는 아날로그 신호를 인코딩한 디지털 신호로서 이러한 신호를 이용하는 경우 시스템을 구축하는 비용 절감과 시스템에 필요한 전력 절감을 동시에 이룩할 수 있다. PWM파는 스위치를 아주 빠르게 켜다 끄다 하는 방식으로 전형적인 디지털 신호라고 말할 수 있다. 진동제어에 PWM 파를 이용하는 연구는 전혀 수행된 바가 없다. 이 연구에서는 먼저 일자유도 진동계를 고려하여 PWM파가 진동응답에 미치는 영향을 조사하였다. 아날로그 신호를 PWM으로 바꾸는 경우에 PWM파의

폭을 결정하는 문제가 대두된다. 이 연구에서는 변위를 일치시키는 공식과 속도를 일치시키는 공식을 유도하여 그 차이점을 조사하였다. 그 결과 속도를 일치시키는 공식, 즉 아날로그 신호의 최대값을 기준으로 계산한 값을 펄스폭으로 결정하는 방식이 가장 좋음을 확인하였다.

이론적인 연구 결과를 바탕으로 실제의 지능구조물에 PWM파를 적용할 경우 우리가 원하는 가진이 일어나는지 살펴보았다. 이를 위해 압전작동기와 감지기가 부착된 지능구조물과 OP 앰프, 마이크로프로세서를 이용해 사인과 가진을 했을 경우 그 응답이 가진 주파수와 일치하는 사인과 응답이 생성되는지 살펴보았다. 사인과 가진 실험 결과 40 kHz의 PWM파로 10 Hz의 사인과 구현이 가능함을 확인할 수 있었다.

PWM파를 이용한 사인과 가진에 대한 실험 결과를 바탕으로 능동진동제어기를 구현하였는데 두 개의 PWM 출력을 이용하였다. 또한 OP 앰프를 이용하여 차등앰프를 구현하여 사용하였는데, 디지털 입출력으로 0과 5V 값을 사용하기 때문에 이를 아날로그 시스템인 압전감지기 및 작동기와 연결하기 위해서 필요하였다. 능동진동제어기로는 그 효율성이 입증된 양변위되먹임 제어기를 디지털 형태로 전환하여 사용하였다. 실험 결과 진동이 능동적으로 제어 될 수 있음을 확인하였다.

### 6. 결 론

이 연구에서 제안한 PWM 방식은 기존의 DA 변환기와 고전압 아날로그 증폭앰프를 사용하는 방식과 비교해 다음과 같은 장점이 있다. DA 변환 과정에서 발생할 수 있는 시간지연을 방지할 수 있다. 그리고 아날로그 증폭앰프를 필요로 하지 않는다. 따라서 고속의 저가 스위칭 앰프로 고가의 증폭앰프를 대체할 수 있어 시스템 구현 비용이 절감된다.

이 연구에서 아날로그값으로 계산되는 제어력으로 PWM파로 변환하는 과정에서 발생할 수 있는 문제점을 살펴보았다. 제어력에 해당하는 PWM파의 듀티비는 속도 공식에 근거한 보다 간단한 비례 공식이 적합하다는 것을 확인하였다. 그리고 PWM파로 전환된 제어력이 아날로그 제어력과 동일한 효과를 얻을 수 있음을 실험을 통해 확인하였다. 그리고 PWM파를 이용해 능동진동제어가 성공적으로 이루어 질 수 있음을 입증하였다.

## 후 기

이 연구는 국방과학연구소가 지원하는 수중운동체 특화연구센터의 수중/구조진동 연구실 지원으로 이루어졌다. 관계자 여러분께 감사드린다.

## 참 고 문 헌

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

(2) Horowitz, P. and Hill, 1980, W., The Art of

Electronics, Cambridge University Press.

(3) 이희문, 2002, PIC16F84의 기초 +  $\alpha$ , 성안당.

(4) Song, G., Buck, N. V. and Agrawal, B. N., 1999, "Spacecraft Vibration Reduction Using Pulse-Width Pulse-Frequency Modulated Input Shaper", J. of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 22, No. 3, pp. 433~440.

(5) 허석, 김기영, 광문규, 2004, "아날로그 회로와 마이크로 프로세서를 이용한 PPF 제어기의 구현", 한국소음진동공학회논문집, 제 14 권, 제 6 호, pp. 455~462.

(6) 광문규, 한상보, 허석, 2004, "양변위 되먹임 제어기의 안정성, 제어 성능 및 설계 방법", 한국소음진동공학회논문집, 제 14 권, 제 3 호, pp. 208~213.