

능동동조질량감쇠기와 수정 PPF 제어기를 이용한 구조물의 능동진동제어

Active Vibration Control of Structure Using Active Tuned Mass Damper and Modified PPF Controller

김기영* · 곽문규†
Ki Young Kim and Moon K. Kwak

Key Words : Active Vibration Control(능동진동제어), Modified Positive Position Feedback Controller(수정 PPF 제어기), Active Tuned Mass Damper(능동동조질량감쇠기)

ABSTRACT

This paper is concerned with the active vibration control of building structure by means of the active tuned mass damper and the modified positive position feedback controller. To this end, one-degree-of-freedom spring-mass-damper system equipped with ATMD is considered. The stability condition for the addressed system when applying the proposed PPF controller is derived by Routh-Hurwitz stability criterion. The stability condition shows that the modified PPF controller is absolutely stable if the controller gain is positive, so that the modified PPF controller can be used without difficulty. Theoretical study shows that the modified PPF controller can effectively suppress vibrations as the original PPF controller does in smart structure applications. To investigate the validity of the modified PPF controller, a simple experimental structure with an ATMD system driven by DC motor was built. The modified PPF control algorithm was implemented on Atmel 128 microcontroller. The experimental result shows that the modified PPF controller can also suppress vibrations for the real structure.

1. 서론

최근에 고층 건물, 다리등과 같은 구조물이 대형화함에 따라 지진이나 바람에 의해 유발되는 진동을 저감하기 위한 기술이 관심을 받게 되었다. 이러한 대형 구조물의 진동을 억제하기 위한 제어 기법으로는 수동제어, 능동제어, 반능동 제어, 복합 제어 등이 있으며 구체적으로는 동조 질량 감쇠기(Tuned Mass Damper, TMD)와 동조 액체 감쇠기(Tuned Liquid Damper, TLD), 능동동조질량감쇠기(Active Tuned Mass Damper, ATMD)등이 있다.

대형구조물의 기본 진동수는 낮기 때문에 저주파수 영역의 진동을 효과적으로 흡수할 수 있는 수동 제어 시스템이 유지 보수나 비용측면에서 유리하다. 그러나 제어할 수 있는 주파수 영역이 제한적이다. 능동 질량 감쇠기(Active Mass Damper)는 제어할 수 있는 주파수 대역이 수동 시스템에 비해 넓고 다양한 외부 가진에 대해 능동적으로 대처할 수 있다. 그러나 능동진동제어기를 적용하기 위해서는 제어 알고리즘을 구현하는 복잡한 제어시스템과 지속적인 전원 공급이 필요하다.

Pinkaew and Fujino[1]는 조화 가진을 받는 구조물의 진동을 최적 제어 이론과 STMD(Semi-active Tuned Mass damer)를 이용해 구현하는 방법을 연구하였다. 그들은 수동 방법인 TMD 에 비해 진동억제가 효과적으로 이루어 질 수 있음을 수치계산을 통해 입증하였다. Ricciardelli et al.[2, 3]는 TMD, AMD, ATMD 의 파라미터 최적화 문제와 LQR(Linear Quadratic Regulator)를 ATMD 에 적용하는 문제를 연구하였다.

Aldemir[4]는 MR(Magnetorheological) 감쇠기를 이용해 STMD 를 구현하는 방법을 연구하였다. Samali and Al-Dawod[5]는 퍼지 제어를 ATMD 에 적용했으며 Pourzeynali et al.[6]는 퍼지논리와 유전자 알고리즘을 TMD 에 적용하였다. Wang and Lin[7]는 ATMD 에 VSC(Variable Structure Control)과 FSMC(Fuzzy Sliding Mode Control)을 적용하였으며 수치계산 결과로 FSMC 가 보다 경제적이며 실용 가능한 제어기임을 보여 주었다. Balendra, Wang and Yan[8]는 ATLCD(Active Tuned Liquid Column Damper)의 제어기 설계 방법을 연구하였다. Moon et al.[9]는 철골구조물의 능동진동제어를 위한 선형 모터 감쇠기를 연구하였다. Moon and Chung[10]는 가속도 센서와 순간 최적제어 알고리즘을 이용한 구조물의 능동진동제어를 연구하였다. Chung et al.[11]는 오리피스 유체 댐퍼를 이용한 구조물의 진동제어를 연구하였다. Moon et al.[12]는 자기 유변감쇠기를 이용해 지반 기진력을 받는 구조물의 진동을 능동적으로 제어하는 방법을 연구하였

† 교신저자; 동국대학교 기계공학과
E-mail : kwakm@dongguk.edu
Tel : (02) 2260-3705, Fax : (02) 2263-9379
* 동국대학교 기계공학과 대학원,
현 (주)현대엘리베이터

다. Min et al.[13, 14, 15, 16]은 다양한 제어기를 사용하여 ATMD의 성능을 실험을 통해 증명하였다.

지능구조물의 능동진동제어기로 그 성능이 입증된 제어기중 하나가 양변위 되먹임(Positive Position feedback, PPF)제어기이다[17]. PPF 제어기는 다른 제어기법들에 비해 아날로그 회로로 구현이 가능하며 디지털 제어기로 변환하더라도 비교적 단순한 알고리즘으로 구현할 수 있다. Fanson and Caughey[17]가 제안한 PPF 제어기는 제어하고자 하는 진동모드를 선별하여 제어할 수 있으며 이 경우 다른 진동모드를 불안정하게 만드는 Spillover 현상이 나타나지 않는다. Kwak[18]은 Fanson and Caughey가 유도했던 단일 입출력(Single-Input Single-Output, SISO) PPF 제어기의 안정조건을 분석하였고 또한 SISO PPF 제어기의 이득, 필터주파수, 감쇠인자에 의한 페루프 시스템의 동적 특성을 연구하였다. 그러나 PPF 제어기는 압전작동기를 사용하는 경우를 고려해 구조물에 변위 형태의 작동력을 구사하는 제어기로 개발되어 ATMD와 같이 관성형태로 구조물에 제어력을 가하는 시스템으로의 적용에 대해서는 아직 연구된 바가 없다. 이 경우와는 반대로 Lee and Sim[19]은 압전감지기가 아닌 가속도계를 이용해 구조물의 변위가 계속되는 경우에 대해 가속도 되먹임을 PPF 제어기에 적용하는 것에 대해 이론적인 내용을 확립하였다.

본 연구에서는 기존의 PPF 제어기를 ATMD에 적용하기 위해 수정 PPF 제어기를 제안하였고 이 경우의 안정 조건을 Routh-Hurwitz 방법을 사용하여 유도하였다. 그리고 일자유도계에 대한 수치해석을 통해 수정 PPF 제어기의 타당성을 확인하였다. 본 연구에서 제안된 수정 PPF 제어기의 이론 연구 결과를 바탕으로 간단한 실험 장치를 만들어 실험을 수행하였다. 능동 질량을 구동하기 위해 DC 모터를 사용하였는데 모터 구동을 위해 Kwak[20]이 제안한 펄스폭 변조(Pulse Width Modulation, PWM) 방법을 사용하였다. 실험 결과는 수정 PPF 제어기가 ATMD의 능동진동제어기로 효과적으로 사용될 수 있음을 보여준다.

2. 수정 PPF 제어기 설계

다음 그림. 1과 같이 일자유계 스프링-질량-댐퍼 시스템에 ATMD가 추가되었다고 가정하자. 이 경우 운동방정식은 다음과 같이 유도된다.

$$(M + m_a)\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m_a\ddot{u} + kF \quad (1)$$

여기서 M 은 주구조물의 질량, m_a 는 ATMD의 질량, c 는 점성감쇠계수, k 는 스프링상수, F 는 주구조물에 작용하는 외부 교란, x 는 주구조물의 변위, u 는 ATMD의 주구조물에 대한 상대 변위를 나타낸다. 이식을 $(M + m_a)$ 로 나누고 새로운 변수를 도입하면 식 (1)을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\ddot{x} + 2\zeta_n\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = -g_a\omega_n\ddot{u} + \omega_n^2f \quad (2)$$

여기서 $\zeta_n = c/2(M + m_a)\omega_n$ 는 구조물의 감쇠인자, $\omega_n = \sqrt{k/(M + m_a)}$ 는 구조물의 고유진동수, $g_a = m/(M + m_a)$ 를 나타낸다.

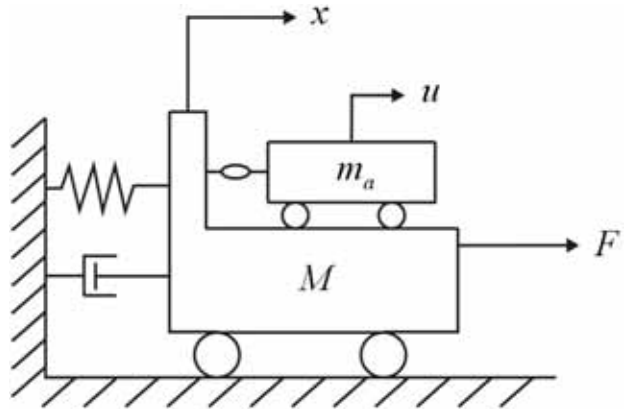


Fig. 1 1 DOF Spring-Mass-Damper System with ATMD

본 연구에서는 식 (2)로 주어진 운동방정식에 대해 다음과 같이 수정된 PPF 제어기의 사용을 제안하고자 한다.

$$\ddot{u} + 2\zeta_f\omega_f\dot{u} + \omega_f^2u = g_b\omega_nx \quad (3)$$

여기서 ζ_f, ω_f 는 수정 PPF 제어기의 감쇠인자와 필터주파수를 나타낸다. 그리고 g_b 는 이득을 나타낸다. 식(3)은 기존의 PPF 제어기와 비교했을 때 오른쪽 항만 다르게 나타난다.

식(2)와 (3)에 대해 라플라스 변환을 취하고 이를 통합하면 다음과 같은 행렬식이 유도된다.

$$\begin{bmatrix} s^2 + 2\zeta_n\omega_n s + \omega_n^2 & g_a\omega_n s^2 \\ -g_b\omega_n & s^2 + 2\zeta_f\omega_f s + \omega_f^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X(s) \\ U(s) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \omega_n^2 F(s) \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

따라서 특성 방정식은 다음과 같이 유도된다.

$$s^4 + c_1s^3 + c_2s^2 + c_3s + c_4 = 0 \quad (5)$$

여기서

$$c_1 = 2(\zeta_n\omega_n + \zeta_f\omega_f)$$

$$c_2 = (\omega_n^2 + \omega_f^2 + 4\zeta_n\zeta_f\omega_n\omega_f + g_ag_b\omega_n\omega_f) \quad (6)$$

$$c_3 = 2(\zeta\omega_n + \zeta_f\omega_n)\omega_n\omega_f$$

$$c_4 = \omega_n^2\omega_f^2$$

Routh-Hurwitz 방법을 식(5)에 적용해 안정 조건을 구하면 다음과 같은 결과가 유도된다.

$$g_a g_b > -4\zeta\zeta_f - \frac{\zeta\zeta_f(\omega_n^2 - \omega_f^2)^2}{(\zeta\omega_f + \zeta_f\omega_n)(\zeta_f\omega_f + \zeta\omega_n)\omega_n\omega_f} \quad (7)$$

만일 수정 PPF 제어기의 필터 주파수가 구조물의 고유진동수와 같다면 다음과 같은 안정조건이 유도된다.

$$g_a g_b > -4\zeta\zeta_f \quad (8)$$

식(8)에서 알 수 있듯이 이득 중의 하나가 음수 값을 가질 수 있다. 이것은 이득이 모두 양수이어야만 안정인 기존의 PPF 제어기의 경우와 다르며 수정 PPF 제어기를 적용할 경우 이득의 선택이 기존 PPF 제어기에 비해 확대되어 있음을 의미한다. 물론 이득이 모두 양수이면 위에서 유도한 안정 조건을 무조건 만족한다. 다시 말해서 g_a 는 질량비로 양수이기 때문에 $g_b > 0$ 면 무조건 안정이다.

식(2)와 (3)에 대해 다음과 같은 수치값들을 고려해 보자. $\omega_n = \omega_f = 1$, $\zeta = 0.01$, $\zeta_f = 0.3$, $g_a = 1$, $g_b = 0.1$. 이 경우 전달함수 $X(s)/F(s)$ 는 다음과 같은 보드 선도를 가진다. 그림. 2 에서 알 수 있듯이 구동 원리는 기존의 PPF 제어기와 다르지 않다. 따라서 수정 PPF 제어기는 변위 계측 센서와 관성 질량을 이용하는 ATMD 시스템에 적합함을 알 수 있다.

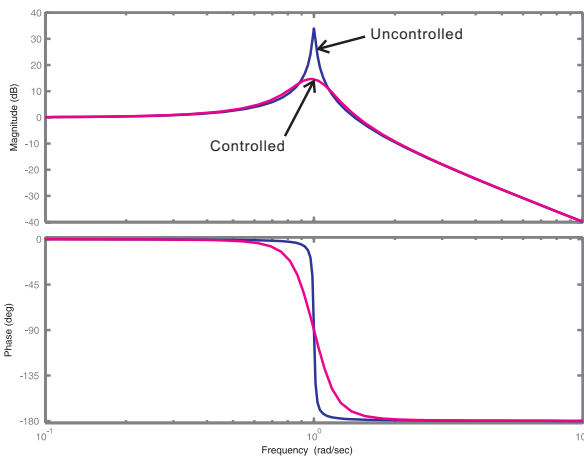


Fig. 2 Bode Diagrams of 1 DOF Spring-Mass-Damper System

3. ATMD 제어 실험

이론적으로 확인된 수정 PPF 제어기를 실제 ATMD 시스템에 적용하고 그 타당성을 확인해 보았다. 먼저 실험을 위해 그림. 3 과 같이 간이 실험 장치를 구성하였다. 그림. 3 은 1 층 건축물을 보여주는 알루미늄 프레임 구조와 기둥보에 부착된 압전 센서, 상위 수평층에 부착된 ATMD 를 보여주고 있다.

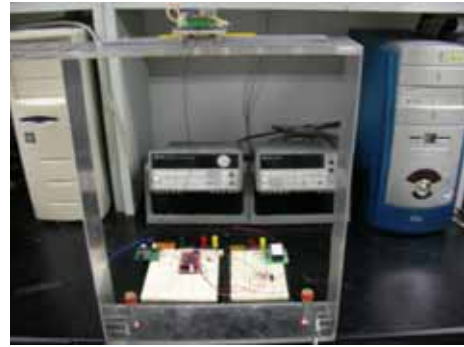


Fig. 3 ATMD Experimental Setup

간이 실험 장치는 그림. 4 와 같은 블록 흐름도를 가진다. 구조물의 진동 신호는 압전 감지기에 의해 출력되며, 이 전하 신호를 전압으로 변환하기 위해 전하앰프를 사용하였다. 마이크로 컨트롤러에 내장된 ADC 는 0~5V 의 전압을 10 bit 의 분해능을 가지고 디지털 값으로 변환하기 때문에 전하앰프에서 출력된 진동 신호를 ADC 의 사용 전압에 맞추기 위해 차등앰프를 사용하여 센서 신호를 0~5V 의 전압 범위를 가지도록 만들었다.

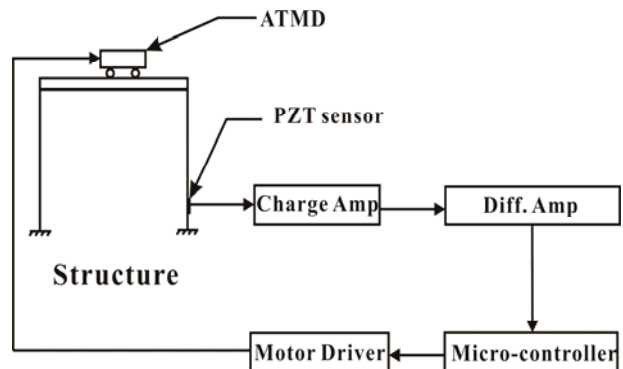


Fig. 4 System Block Diagram

마이크로 컨트롤러에 입력된 센서 값을 가지고 수정 PPF 제어 알고리즘을 이용해 모터 구동 신호를 생성해 이를 모터 드라이버에 제공하여

ATMD 를 구동하였다.

본 실험에서 사용된 마이크로 컨트롤러는 Atmel 사의 Atmega128 이다[20]. Atmega128 은 8bit 컨트롤러지만 128kbyte 의 대용량의 플래시 메모리를 내장하고 있고 RISC 아키텍처로 되어 있다. 일반적인 마이크로 컨트롤러는 외부 클럭을 내부에서 2 분주하거나 4 분주해서 시스템 클럭을 사용하지만 AVR 시리즈는 외부 클럭을 그대로 시스템 클럭으로 사용하기 때문에 거의 모든 명령어가 한 클럭에 동작된다.

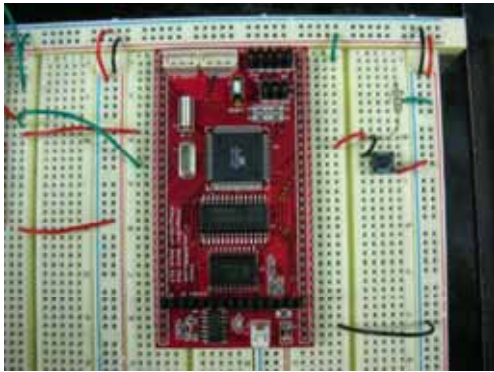


Fig. 5 Atmega 128 Board

따라서 프로그램을 고속으로 행할 수 있는 능력을 가지고 있다. 이 마이크로 컨트롤러에 수정 PPF 제어 알고리즘을 구현하는 방법을 토의해보자.

수정 PPF 제어기는 다음과 같은 전달함수로 표현된다.

$$H(s) = \frac{g_b \omega_f}{s^2 + 2\zeta_f \omega_f s + \omega_f^2} \quad (9)$$

일반적으로 PPF 제어기는 ω_f 를 제어 대상 구조물의 고유진동수와 일치시켜 능동진동제어를 수행한다. 식(9)를 디지털 제어기로 변환하기 위해서 다음과 같은 Bilinear 변환을 사용한다[21].

$$s = \frac{2}{T_s} \frac{z-1}{z+1} \quad (10)$$

여기서 T_s 는 디지털 제어기의 샘플링 시간을 의미하며 식(10)을 식(9)에 대입하며 다음과 같은 식이 유도된다.

$$H(z) = \frac{b_2 z^2 + b_1 z + b_0}{z^2 + a_1 z + a_0} \quad (11)$$

여기서

$$\begin{aligned} b_1 &= g_b \omega_f / \Delta, \quad b_1 = 2g_b \omega_f / \Delta, \quad b_0 = g_b \omega_f / \Delta \\ a_1 &= (2\omega_f^2 - 8/T_s^2) / \Delta \\ a_0 &= (4/T_s^2 - 4\zeta_f \omega_f / T_s + \omega_f^2) / \Delta \\ \Delta &= 4/T_s^2 + 4\zeta_f \omega_f / T_s + \omega_f^2 \end{aligned} \quad (12)$$

식(11)을 이산화된 형태로 표현하면 다음과 같은 식(13)이 유도된다.

$$u_k = -a_1 u_{k-1} - a_0 u_{k-2} + b_2 (y_k + 2y_{k-1} + y_{k-2}) \quad (13)$$

여기서 y_k 는 감지기 값을 나타내며, u_k 는 제어기에서 계산된 제어력 값을 나타낸다. 다음 그림. 6 은 이산화된 수정 PPF 제어 알고리즘 식 (13)을 마이크로 컨트롤러에 구현한 C 프로그램을 보여주고 있다.

```

t_ad = ad_value;
y = t_ad/512.0-1.0;
f=-1.0*(-1.9795)*fm1-0.9806*fm2
  + 0.00026439*(y + 2.0*ym1 + ym2);
ym2 = ym1;
ym1 = y;
fm2 = fm1;
fm1 = f;

```

Fig. 6 Modified Digital PPF Control Algorithm

앞에서 언급하였듯이 ADC 에서 변환된 디지털 진동 신호는 차등 앰프를 거쳐 0~5V 로 변환되고 변환된 신호가 마이크로 컨트롤러의 10bit A/D 입력단자에 전달된다. 따라서 프로그램의 첫 번째 과정은 10 비트, 즉 0~1023 의 정수값을 가지는 센서 신호를 제어 알고리즘 계산에 합당하도록 -1~+1 변환하는 계산식을 포함하고 있다. 식 (12) 에 주어진 각 계수값을 계산하기 위해서는 시스템의 최저차 고유진동수 (ω_n) 값과 필터 감쇠계수 (ζ_f), 샘플링 시간(T_s)이 필요하다. 최저차 고유진동수 값은 간단한 자유진동 실험을 통해 구했는데 약 3.8Hz 인 것으로 계측되었다. 사용한 소형 모터 구동기가 최대 5Hz 까지 구동이 가능하기 때문에 최저차 진동 모드를 제어하는데 큰 무리가 없었다. 필터 감쇠계수는 기존 PPF 제어기에서 보편적으로 사용되는 값, 0.3 으로 설정했다[18]. 샘플링 시간은 고정 값을 사용할 수 없으며 주어진 수정 PPF 제어 알고리즘의 계산 시간에 의해 결정된다. 본 연구에서는 그림. 6 에 주어진 수정 PPF 제어 알고리즘에 대한 마이크로 컨트롤러의 계산 속도를 먼저 계측하였다. 계측 결과 샘플링

시간은 1.3725ms, 즉 샘플링 주파수 728.6Hz 로 구동할 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서는 이 값들을 이용해 수정 PPF 제어기의 계수 값들을 계산하여 사용하였다. 이득 g_b 는 마이크로 컨트롤러의 출력 신호를 계측하여 조정하였다.

수정 PPF 제어 알고리즘을 이용해 계산된 값은 약한 신호이기 때문에 ATMD 의 모터 구동 신호로 사용할 수 없다. 본 연구에서는 모터 구동을 위한 PWM 신호[22]를 생성해 이를 모터 드라이버에 입력해 모터를 구동하는 방식을 채택하였다.

그림 7 은 구조물의 자유진동 데이터와 수정 PPF 제어기가 적용된 구조물의 진동 신호를 비교한 결과이다. 그림. 7 으로부터 수정 PPF 제어기가 ATMD 시스템의 제어기로 타당함을 확인할 수 있다.

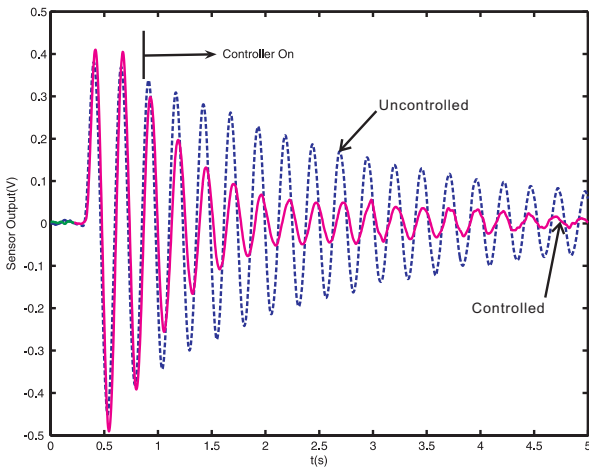


Fig. 7 Time Histories of Sensor Output

4. 토의 및 결론

본 연구에서는 먼저 ATMD 가 부착된 일자유도 스프링-질량-댐퍼 시스템의 운동방정식을 유도하고 ATMD 의 제어기로서 수정 PPF 제어기의 사용을 제안하였다. ATMD 에 적용된 수정 PPF 제어기의 안정성을 조사하기 위해 Routh-Hurwitz 방법을 사용하여 안정조건을 유도하였다. ATMD 에 수정 PPF 제어기를 사용할 경우 기존의 지능 구조물에 사용된 PPF 제어기에 비해 안정조건 영역이 더 큼을 입증하였다. 이 사실은 ATMD 의 제어기로서 수정 PPF 제어기가 효과적으로 사용될 수 있음을 뒷받침한다. 이론적인 수치 해석을 통해 ATMD 에 수정 PPF 제어기를 사용하면 기존의 PPF 제어기가 주는 진동 억제 성능과 동일

한 성능을 보장함을 확인하였다.

이론적으로 입증된 수정 PPF 제어기의 실제 적용 가능성을 조사하기 위해 간단한 진동 구조물을 제작하고 DC 모터로 구동되는 ATMD 를 부착해 실험을 수행하였다. 수정 PPF 제어 알고리즘의 구현을 위해서 Atmega 128 마이크로 컨트롤러를 사용하였으며 계측 결과 주어진 시스템에 대해 충분히 빠른 계산 시간을 제공할 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서 구성한 간이 실험 장치에는 소형 기어드 DC 모터가 사용되었다. 기어간의 유격과 모터의 최소 구동 전압 때문에 제어기에서 계산된 제어력이 작을 경우 백래시로 인해 ATMD 를 구동할 수 없는 경우가 발생하였다. 실제 시스템에 있어 ATMD 의 구동기로 AC 서모 모터를 사용한다면 이러한 문제가 최소화될 것으로 예상된다. 이와 같이 간단한 실험 장치를 이용해 진동 억제 성능을 계측해본 결과 시간 응답이 급속히 감소함을 확인할 수 있었다. 이 결과는 수정 PPF 제어기가 ATMD 의 제어기로서 타당함을 입증한다.

본 연구에서는 ATMD 가 부착된 일자유도 시스템에 대하여 이론을 정립하고 수치해석과 간단한 실험을 통해 수정 PPF 제어기의 타당성을 입증하였지만 ATMD 가 부착된 다자유도 시스템에 대한 수정 PPF 제어기의 안정성 및 타당성을 검증할 필요가 있다.

5. 후기

이 연구는 국방과학연구소가 지원하는 수중운동체특화 연구센터의 수중/구조진동 연구실 지원으로 이루어졌다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

- (1) Pinkaew, T. and Fujino, Y., 2001, "Effectiveness of semi-active tuned mass dampers under harmonic", *Journal of Engineering Structures*, Vol. 23, pp. 850~856.
- (2) Ricciardelli, F., Pizzimenti, A. D. and Mattei, M., 2003, "Passive and active mass damper control of the response of tall buildings to wind gustiness", *Journal of Engineering Structures*, Vol. 25, pp. 1199~1209.
- (3) Ricciardelli, F., Occhiuzzi, A. and Clemente, P., 2000, "Semi-active Tuned Mass Damper control strategy for wind-excited structures", *Journal of Engineering Structures*, Vol. 88, pp. 57~74.

- (4) Aldemir, U., 2003, "Optimal control of structures with semiactive-tuned mass dampers", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 266, pp. 847-874.
- (5) Samali, B. and Al-Dawod, M. 2003, "Performance of a five-storey benchmark model using an active tuned mass damper and a fuzzy controller", *Journal of Engineering Structures*, Vol. 25, pp. 1597-1610.
- (6) Pourzeynali, S., Lavasani, H. H. and Modarayi, A. H., 2007, "Active control of high rise building structures using fuzzy logic and genetic algorithms", *Journal of Engineering Structures*, Vol. 29, pp. 346-357.
- (7) Wang, A.-P. and Lin, Y.-H., 2007, "Vibration control of tall building subjected to earthquake excitation", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 299, pp.757-773.
- (8) Balendra, T. , Wang, C. M. and Yan, N. , 2001, "Control of wind-excited towers by active tuned liquid column", *Journal of Engineering Structures*, Vol. 23, pp. 1054-1067.
- (9) Moon, S.-J., Chung, T.-Y., Lim, C.-W. and Kim, D.-H., 2004, "A linear motor damper for vibration control of steel structures", *Journal of Mechatronics*, Vol. 14, pp. 1157-1181.
- (10) Moon, S.J., Chung, T.-Y.,1995, "Active control of structural vibration using an instantaneous control algorithm including acceleration", *Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, pp. 254-260.
- (11) Chung, T.-Y., Lim, C.-W., Kim, B.-H. and Moon, S.-J., 2002, "An experimental study on the building vibration control using orificed fluid dampers", *Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 12, No. 6, pp. 254-260.
- (12) Moon, S.J., Kim, B.-H. and Jeong, J.-A, 2004, 2004, "An experimental study on a Magneto-Rheological fluid damper for structural control subject to base excitation", *Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 14, No. 8, pp. 767-773.
- (13) Min, K.-W. and Lee, S.-K., 1999, "LQG controller for the vibration control of building structures", *Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. 12, No. 2, pp. 243-249.
- (14) Min, K.-W., Kim, S.-C., Park, J.-G. and Joung, J.-W., 2001, "Experimental study on the active control of building using sliding mode control method", *Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, pp. 431-435.
- (15) Min, K.-W., Lee, S.-J., Ju, S.-J., Kim, H.-J. and Park, M.-K., 2003, "Performance of LQR and H₂ controller for an experimentally-identified structure with AMD", *Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea*, pp. 461-470.
- (16) Min, K.-W. and Joung, J.-W., 2002," Modified sliding mode control of structures using MR dampers", *Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 12, No. 3, pp. 243-250.
- (17) 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.
- (18) Kwak, M. K. and Han, S.-B., 2004, "The Stability Conditions, Performance and Design Methodology for the Positive Position Feedback Controller", *Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 208-213.
- (19) Lee, S. W. and Sim, E. "Active Vibration of Flexible Structures with Acceleration Feedback", *Journal of Guidance*, Vol. 16, No. 2, pp. 413-415.
- (20) [Http://www.atmel.com](http://www.atmel.com)
- (21) Heo, S., Lee, S. B., Kwak, M. K. and Back, K. H., 2004," Real-time active vibration control of smart structure using adaptive PPF controller", *Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 267-275.
- (22) Kwak, M. K., Kim, K. Y. and Bang, S. Y., 2005, "Active vibration control of smart structure using pulse width modulation", *Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 105-111.