

論文

자기변형재료와 PPF 알고리즘을 이용한 작동기의 진동제어

김민욱*, 황호연**

Vibration Control of Actuators Using
Magnetostrictive Materials and PPF Algorithm

Min-Oug Kim*, Ho-Yon Hwang**

ABSTRACT

In this research, using Terfenol-D actuator composed of magnetostrictive material as shaker and controller, active vibration control theory was applied and verified by experiments. PPF(Positive Position Feedback) algorithm which is effective for the control of low frequency vibration was used for the control of a structure. Responses of inputs due to various design variable used for the PPF filter were observed. To investigate the characteristics of magnetostrictive materials, actuator responses were measured for known inputs and satisfactory results were obtained to reduce the vibration level after applying the control input for the actuator.

Key Words : Vibration control(진동제어), PPF(Positive Position Feedback), Magnetostrictive material(자기변형재료), Actuator(작동기), Active control(능동제어)

I. 서 론

각종 정밀 측정기기 및 생산기계 등에 있어서 불가피하게 발생하는 진동 문제는 장비나 설비들의 정상적인 작동을 어렵게 하고 그로 인한 유지 보수비의 증가, 기계 효율의 저하라는 바람직하지 못한 결과를 나타낸다. 즉, 바람직하지 않은 진동은 시스템에 심각한 피해나 구조부재의 피로 파괴, 탑재 장비의 손상 및 기능 장애 등의 능률 저하를 가져온다. 따라서 진동 제어는 외부 교란에 중속된 구조물의 설계에 있어서 매우 중요한 사항 중 하나이다. 최근의 구조물들은 경량화·대형화 추세 속에 유연성이 증대한 반면 감쇠비는 감소하는 경향으로 인하여 가진력에 대한 진동응답이 과도하게 나타날 수 있다.

이러한 진동제어를 위해 기존에 사용된 방법들은 부가적인 질량을 추가하거나 구조물의 강성을 조절하여 진동을 제어하고자 하는 수동제어(Passive Control)개념과 실시간적으로 변하는 진동으로 인한 구조물의 반응을 원하는 수렴 값으로 제어하기 위한 능동제어(Active Control)의 두 가지 개념이 주를 이루어져 왔다. 이 두 가지 개념 중에서 저주파 영역의 진동제어를 제어하려면 수동제어기법보다는 능동제어기법이 효과적이다. 최근에 활발히 연구되고 있는 능동제어기법은 수동적인 진동제어로 진동제어가 어려운 경우에 사용되는 방법으로 지금까지는 압전작동기(piezoelectric actuator)와 감지기(sensor)를 사용한 능동진동제어에 관한 연구들이 주를 이루어왔다. 현재의 지능 구조물에 대한 능동제어를 위해 감지기 및 작동기의 재료로 주로 사용하는 압전 재료(Piezo-Material)는 과대 하중이나 고온 고압의 환경 하에서는 그 기능을 상실하는 단점을 가지고 있어 우주환경에서 운영되는 인공위성등에는 적용하기 어렵다.

* 2007년 09월 05일 접수 ~ 2007년 09월 20일 심사완료

* 세종대학교 항공우주공학과 대학원

** 정희원, 세종대학교 항공우주공학과
연락처, E-mail: hyhwang@sejong.ac.kr
서울시 광진구 군자동 98

신기술로 제작된 자기변형재료인 Terfenol-D 작동기는 제작시의 초기 하중부여로 관심 하중 영역에서 올바르게 작동하고 고온, 고압에 대한 영향을 거의 받지 않는다는 특성을 가지고 있다. 그러나 본 연구에서 사용한 자기변형재료인 Terfenol-D 작동기를 사용한 능동진동제어는 국내의 연구소와 대학에서 일부 수행되었을 뿐이다 [1~11]. 참고문헌 [6~9]에서는 압전재료를 사용한 이용한 능동진동제어 및 지능 구조물에 관한 연구를 수행하였다.

본 논문에서는 자기 변형 재료인 Terfenol-D 작동기를 제어기로 사용하는 능동제어 기법에 대한 기초적인 이론을 정립하고 이를 검증하기 위한 실험을 수행하였다. 이러한 제어기가 제진 테이블 등에 실제로 적용하기 전에 자기 변형 재료에 대한 특성을 파악하는 것이 우선 시 되어야 한다. 이를 위해 알려진 신호의 입력을 통한 작동기의 응답 신호를 측정하였으며, 응답 신호에 대하여 제어이론을 적용하였다.

진동제어를 위한 능동제어기에는 PPF(Positive Position Feedback) 알고리즘이 사용되었으며, 이는 구조물의 특성 주파수에 대한 진동모드를 선택하여 제어할 수 있다는 점에서 적용하기 편리한 기법이다. 또한 PPF제어기는 기본 진동수를 포함한 저차 모드의 제어에 주로 사용된다. 본 연구에서는 이러한 PPF알고리즘을 먼저 1자유도 시스템에 대해 Matlab Simulink를 사용하여 시뮬레이션하였다. PPF 제어기는 저주파 필터(Low Pass Filter)의 형태로 구성되며, 이는 폐회로(Closed Loop)의 되먹임(Feedback)으로 사용되어진다. PPF 제어기의 고유 진동수 값을 작동기의 1차 고유진동수 값과 동일하게 적용함으로써 작동기의 1차 고유진동수에 대한 감쇠를 이론적으로 확인하였다. 또한 디지털 제어기의 구현을 위하여 쌍일차(bilinear) 변환을 사용하고 이를 PPF 제어기에 적용하여 각각의 시스템 입력에 대한 제어 신호 생성 및 이득값(Gain) 설정을 통한 진동제어를 수행하였다.

II. 본 론

2.1 개요

Fig. 1과 같이 하단의 가진기(shaker)와 상단의 작동기로 구성된 실험장치에서 하단의 가진기로부터 입력되는 외부 가진 신호에 대한 상단 작동기의 진동제어를 위하여 폐회로 시스템을 구성하

였다. 작동기의 전달함수는 1자유도 시스템의 전달함수 항으로 나타낼 수 있다. 또한 제어기의 전달함수는 본 연구에서 적용하고자 하는 PPF 제어 알고리즘으로 이루어져 있다.

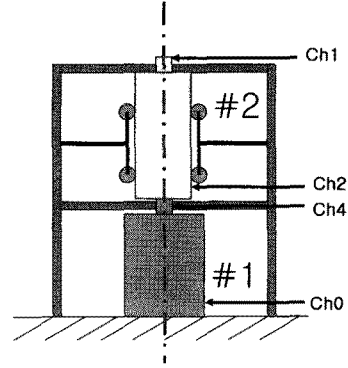


Fig. 1. Test configuration

2.2 능동제어

본 연구의 되먹임 제어 시스템에서 사용된 제어법칙(Control Law)은 PPF이며 PPF는 제어를 수행하기 위해 변위 측정값을 사용한다. 또한 PPF 제어는 구조물의 특성 주파수에 대한 진동모드를 선택하여 제어할 수 있다는 점에서 간단히 적용하기 편리한 기법으로 기본 진동수를 포함한 저차 모드의 제어에 주로 사용한다.

그러나 고유진동수들이 서로 근접한 경우에는 적용하는데 어려움이 있어 구조물의 고유진동수를 정확히 알아야 하고 저주파수 대역에서 탄성력을 저하시켜 정적불안정을 초래할 수 있다는 단점이 있다. PPF 제어에 대한 제어법칙은 두 개의 방정식 즉, 하나는 작동기에 대한 식 (1)이고 다른 하나는 PPF 필터에 대한 식 (2)로 나타낸다.

$$-\frac{d^2}{dt^2}(\xi) + 2\zeta\omega \frac{d}{dt}(\xi) + \omega^2\xi = g\omega^2n \quad (1)$$

$$-\frac{d^2}{dt^2}(n) + 2\zeta_f\omega_f \frac{d}{dt}(n) + \omega_f^2n = \omega_f^2\xi \quad (2)$$

여기서, g 는 이득값 >0 이고, ξ 는 모드 좌표 (Modal coordinates), n 는 필터 좌표, ω 와 ω_f 는 각각 작동기와 필터의 고유진동수이며 ζ 와 ζ_f 는 작동기와 필터의 감쇠비(Damping Ratio)를 나타낸다. Fig. 2의 블록 다이어그램에서 보여 주듯이, PPF 필터는 특정 주파수를 감쇠시키기 위하여 적용되었다.

이 PPF 필터에 대한 전달함수(식 (3))를 구하여 보면 저주파 통과(Low Pass) 필터와 동일한 형태로 나타난다는 것을 알 수 있다.

$$H(s) = \frac{\omega_f^2}{S^2 + 2\zeta_f \omega_f S + \omega_f^2} \quad (3)$$

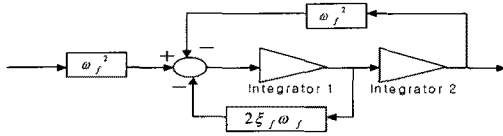


Fig. 2. PPF filter block diagram

PPF 필터 설계 시 선택하여야 할 4개의 변수로는 필터 주파수(ω_f), PPF 필터 감쇠(ζ_f), 샘플링 시간(Sampling Time) (T_s), 그리고 필터 이득(K)이 있다. PPF 제어기의 설계에 있어서 원하는 특성을 얻기 위해 이러한 변수들을 어떻게 설정하는지에 대한 설명을 다음에 나타내었다.

2.2.1 필터 주파수 결정

PPF 필터 주파수(ω_f)는 일반적으로 제어하고자 하는 구조물의 공진 주파수들과 동일한 값을 선택하나 궁극적으로는 최상의 결과를 줄 수 있는 실험 값에 의해 선택하게 된다. 다중 모드를 제어하기 위하여 여러 개로 구성된 PPF 필터의 경우에는, PPF 필터 주파수 결정 시 고주파수의 필터가 저주파수의 필터에 영향을 주기 때문에 고주파수부터 먼저 결정하여야 한다.

2.2.2 PPF 필터 감쇠비 결정

최상의 진동 제어를 수행하는 영역 내에서 실험적으로 구해진 값을 선택하나 대부분의 PPF 필터 감쇠비(ζ_f)는 0.01과 0.1사이에서 선택되어진다. 일반적으로 구조물의 감쇠비는 값의 증가에 따라 진동이 줄어드는 경향을 보이지만, PPF 필터에 사용되는 감쇠비 값의 경우는 값이 증가함에 따라 되먹임 후에 관측되는 결과를 비교하여 결정한다.

2.2.3 샘플링 시간(Sampling Time) 결정

PPF 필터의 샘플링 시간(T_s)은 구조물의 응답 신호에 대하여 연속적인 상태 제어를 디지털 제어기로 바꾸기 위해 사용한다. 본 연구에서 PPF 제어기는 10kHz의 샘플링 비율(sampling rate)을 사용하였다.

2.2.4 PPF 필터 이득(Gain) 결정

PPF 필터 이득값, K의 선택은 PPF 제어기 설계에 있어서 가장 중요한 요인이다. 다중의 이득을 가진 다중 PPF 필터 제어기에 대한 설계 절차의 경우에는 상위 주파수에 대한 이득값의 설정 후, 점차적으로 하위 주파수의 이득값을 설정하는 방식을 사용하여야 한다.

2.2.5 PPF 제어기의 구성 예

Fig. 3은 실험 구조물에 있어서 4개 모드를 제어하기 위한 PPF 필터 제어기 설계에 대한 한 예를 나타내고 있다. 먼저 상위 주파수에 대한 필터의 구성에 있어서 이득변수를 선정하기 전에 3개의 저주파수 PPF 필터의 이득값은 0으로 설정한다. 각각의 필터는 단지 한 개의 모드를 제어하기 위하여 설계되었다.

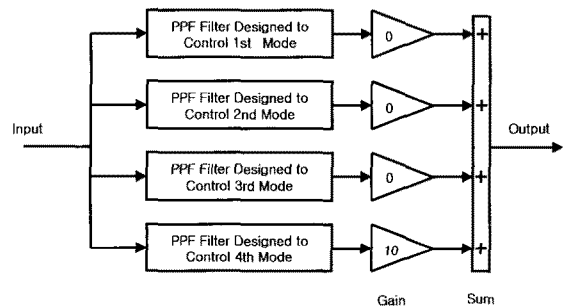


Fig. 3. Block diagram of PPF controller

주파수와 이득값은 최대의 감쇠를 얻을 때까지 여러 값들을 적용하여야 한다. 일단 네 번째 모드(mode)의 필터 변수 값이 설정되면, 두 번째로 높은 세 번째 모드의 필터가 첫 번째 필터와 구조물의 폐회로 시스템과 같이 설계된다. 계속적인 동일한 방식으로 최저(1st mode) 필터까지 설계를 한다. 만일 최 저차 진동수의 필터를 먼저 설계하는 경우에는 고 주파수 필터의 동특성이 저 주파수 필터의 설계 세부사항들에 영향을 미치게 된다.

2.3 Matlab Simulink Tool을 사용한 PPF 알고리즘의 적용

PPF 필터의 설계 시 고려되었던 4가지 변수들 중에서 PPF 필터 주파수(ω_f), 필터 이득(K) 그리고 감쇠비(ζ_f) 값의 변화에 따른 각기 다른 주파수의 조화(Sine) 입력 신호에 대한 PPF 필터 응

답을 관측하였다. PPF 필터 주파수는 10Hz로 튜닝 하였으며, 이에 대한 필터 이득 및 감쇠비 값의 변화에 따른 PPF 필터 응답을 구하였다. 감쇠비는 이론적으로 정해진 0.01~0.1사이와 0.5의 값을 적용했을 때에 입력 신호에 대한 제어기의 응답 특성을 서로 비교하였다.

입력되는 사인파 값은 10Hz와 저 주파수 영역인 5Hz, 그리고 상대적으로 고 주파수 영역인 50Hz, 100Hz를 입력 값으로 사용하였다. 제어기에 대한 필터 이득값은 각각의 입력 사인파 신호에 대하여 PPF 필터를 지난 제어 신호와 입력 신호와의 상대적인 크기를 고려하여 값을 결정하였다.

샘플링 시간은 시스템의 불안정을 일으키지 않도록 충분히 작은 값인 10kHz(0.0001초)를 사용하였으며, PPF 제어기의 디지털 제어기로의 구현은 식 (4)와 같다.

$$H(z) = \frac{b_2 z^2 + b_1 z + b_0}{z^2 + a_1 z + a_0} \quad (4)$$

여기서,

$$b_2 = \frac{\omega^2}{\Delta}, \quad b_1 = \frac{2\omega^2}{\Delta}, \quad b_0 = \frac{\omega^2}{\Delta}$$

$$a_1 = \frac{2\omega^2 - \frac{8}{T_s^2}}{\Delta}$$

$$a_0 = \frac{\frac{4}{T_s^2} - \frac{4\zeta\omega}{T_s} + \omega^2}{\Delta}$$

$$\Delta = \frac{4}{T_s^2} + \frac{4\zeta\omega}{T_s} + \omega^2 \quad (5)$$

각각의 값들은 필터 주파수와 감쇠비의 설정에 따라 변경된다.

2.4 되먹임(Feedback)에 의한 전체 시스템의 응답 측정

작동기 응답특성 실험 결과로부터 구한 동일축상에 결합된 작동기의 고유진동수 478Hz 및 감쇠비 $\zeta=0.11$ 을 이용하여 폐회로 시스템에서의 작동기에 대한 전달함수를 구성하였다. 또한, PPF 필터 구성에서 주파수 = 10 Hz, $T_s=0.0001$, 감쇠비 = 0.1의 값을 적용하여 시스템을 구성하였다. Fig. 4는 전체적인 시스템에 대한 폐회로를 나타

내고 있으며, 참고 이득값(Reference Gain)은 PPF 필터에 적용된 이득값을 의미한다.

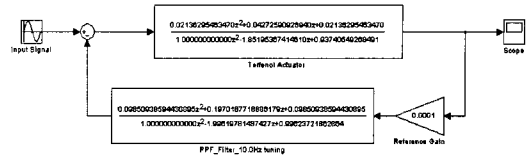


Fig. 4. Block diagram of the overall system

2.3. 실험장치 및 방법

2.3.1 Terfenol-D 작동기 모델

자기변형(Magnetostrictive) 작동기의 전형적인 형태를 Fig. 5에 나타내었다. 이 변환기의 주요 구성으로는 강자성체인 Terfenol-D 막대 와 전선으로 감싸여 있는 원통 코일, 영구 자석 그리고 압축 볼트와 스프링으로 구성된 압축 응력이 가해지는 기계장치로 이루어져 있다. 작동기의 입력으로 시간에 종속적인 제어력 I(t)가 원통코일에 가해지면 이것은 자력장(H) 및 이에 상응하는 자력 이력(B), 막대 내에 자화(M)를 생성한다. 작동기 중심부에 위치한 막대는 주위의 코일에 의해 발생하는 모멘트에 의해서 작동하게 된다.

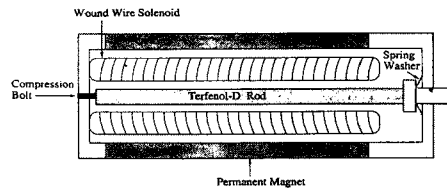


Fig. 5. Cross section of the typical Terfenol actuator

3.2 Terfenol-D 작동기의 특성

Terfenol-D는 금속요소인 TERbium, Iron(Fe)과 개발기관인 Naval Ordnance Lbs(NOL) 및 Dysprosium(-D)에서 조합된 합성어이며 미국 해군에서 개발된 고성능의 전자기 재료로서 자기장 하에서 형상이 바뀌는 특성(magnetostrictive)이 매우 큰 물질이다. 지금까지의 능동감쇠의 작동기로 사용되어온 압전재료는 저주기 피로특성이 나쁘고 힘을 받게 되면 그 특성이 급격히 저하되는 단점을 가지고 있는데 비해 Terfenol-D는 이러한 단점을 개선한 매우 획기적인 신소재이다 (Table 1).

Terfenol-D의 물성에 대한 대표적인 특징은 상

은에서 변형률(strain)이 가장 큰 재료로 알려져 있고, 자기역학적 결합계수($K_{33} = 0.75$)도 매우 높기 때문에 전기에너지를 역학적 에너지로 효율적으로 변환시킬 수 있다. 단점으로는 압축강도는 700 MPa로 높으나, 인장강도는 30 MPa로 매우 낮아서 재료가 깨지기 쉬워 장치 설계 시 세심한 주의가 필요하다.

Table 1. Characteristics of Terfenol-D actuator

Advantage	Defect
<ul style="list-style-type: none"> - HIGH STRAIN & HIGH FORCE - HIGH RELIABILITY /UNLIMITED LIFE CYCLE - WIDE BANDWIDTH - WIDE TEMPERATURE RANGE - MICROSECOND RESPONSE TIME 	<ul style="list-style-type: none"> - FRAGILE (WEAK FOR TENSILE FORCE) - WEAK FOR CORROSION

2.3.3 실험 방법

2.3.3.1 개요

능동제어기법을 적용한 실험장치의 개요는 Fig. 6과 같다. 함수생성기(Function Generator)를 통하여 나오는 신호는 증폭기(amp) CH #1을 통하여 증폭된 후, 작동기 #1의 가진 신호로 입력되게 된다.

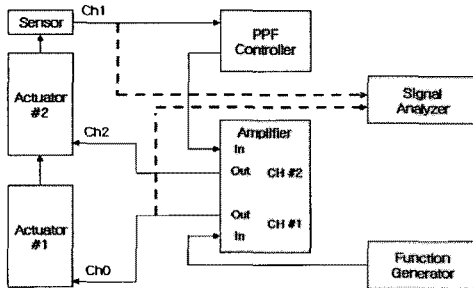


Fig. 6. Active control test setup

작동기 #1의 작동에 의하여 작동기 #2도 동시에 움직이게 되는데, 작동기 #2의 끝에 설치된 센서(가속도계 또는 비접촉 변위 센서)를 통하여 입력 신호에 대한 출력 응답을 관측하였다. 센서로부터 출력된 신호는 PPF 알고리즘을 통하여

증폭기 CH #2에 입력되어 증폭되게 된다. 이 증폭된 신호는 작동기 #2의 입력 신호로 적용되어 제어를 수행하게 된다. 여기서, 작동기 #1로 입력되는 신호와 센서를 통하여 나오는 두 신호를 신호분석기(Signal Analyzer)를 사용하여 FFT 분석을 수행하였다.

Fig. 7은 주파수 분석을 위한 신호분석기 및 제어 실험에 사용된 Terfenol-D 작동기 및 실험 장치에 대한 구성을 보여주고 있다.

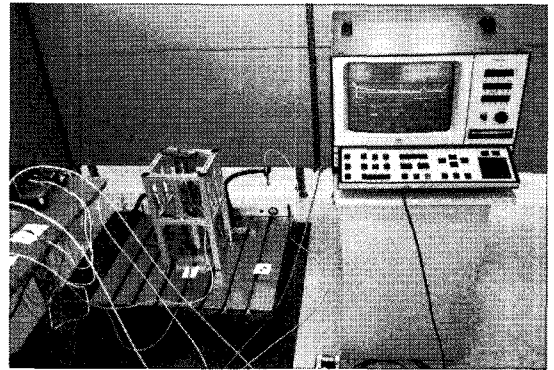


Fig. 7. Signal analyzer and test setup

2.4. 실험결과

2.4.1 Terfenol 작동기의 응답 특성 측정

능동제어 실험을 수행하기 이전에 Terfenol 작동기에 입력되는 무작위(White Noise) 가진 신호에 대한 Terfenol 작동기의 주파수 응답 특성을 관측하였다(Fig. 8). 하나는 자체 제작, 진동 가진용으로 사용할 작동기를 나타내며, 다른 하나는 미국 ETREMA사에서 제작된 것을 구매하여 진동 제어용으로 사용할 작동기를 나타내고 있다.

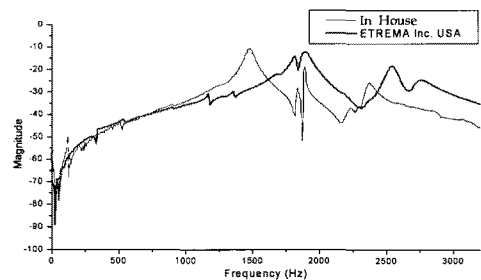


Fig. 8. Frequency response function of Terfenol actuator

본 연구의 진동 제어 연구 범위인 0~400Hz 내에서의 무작위 신호에 대해 Terfenol 작동기의

주파수 응답 함수(Fig. 9)를 자세히 관찰하면 잡음(Noise)에 의한 영향으로 Terfenol 작동기의 정확한 응답 측정이 불가능하였다. 따라서 대역 여파기(Band pass filter)를 50Hz 이하 부분에 적용하여 이러한 문제를 해결하였다.

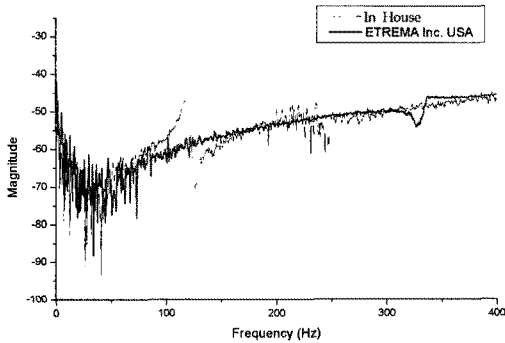


Fig. 9. Frequency response function of Terfenol actuator(0-400 Hz)

2.4.2 실험 장치의 응답 측정

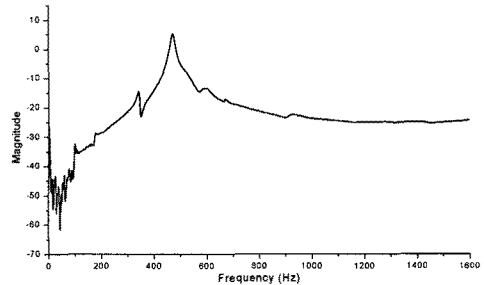
Terfenol 작동기에 알려진 주기 함수 신호를 적용하였을 때, 이에 대한 응답 특성을 관측하였다. Fig. 1과 같이 동일 축 상에 두 개의 Terfenol 작동기를 설치하였으며 Terfenol 작동기 #1은 가진을 위해 사용하였고, Terfenol 작동기 #2는 제어기로부터 나오는 신호를 입력으로 받아 작동하는 제어용 작동기로 사용되었다. 가이드 및 고무 바퀴가 달린 롤러를 사용하여 Terfenol 작동기 #2에 대한 지지 및 좌우 진동에 대한 문제점을 보완하였다.

Fig. 1에서의 채널 설정은 Ch0번을 알려진 주기 가진 함수 신호 입력 채널, Ch1을 Terfenol 작동기 #2로부터의 변위 센서 측정 채널, Ch2는 PPF 필터를 통한 후의 제어용 작동기 #2로의 신호 입력 채널, Ch4를 Terfenol 작동기 #1로부터의 변위 센서 측정 채널로 각각 설정하였다.

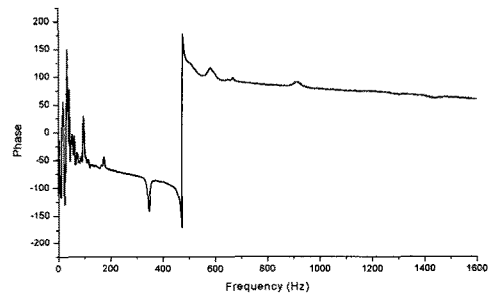
이와 같이 동일 축 상에 결합된 두 Terfenol 작동기에 대하여 0~400Hz인 범위에서의 응답 특성을 살펴보았다. Ch0에서 2V의 무작위 입력 신호를 적용하였을 때, Ch1에서의 가속도계 응답을 이용하여 FFT 분석기를 통한 Terfenol 작동기의 주파수 응답 함수를 Fig. 10에 나타내었고 시간 영역에서의 임펄스 응답(Impulse Response)을 Fig. 11에 나타내었다.

Fig. 10의 주파수 응답에서 나타나듯이 동일 축 상에 결합한 Terfenol 작동기에 대한 고유진

동수들 중 478Hz에서 위상이 -180° 에서 $+180^\circ$ 로 바뀌고 첫 번째 고유진동수는 478Hz임을 확인할 수 있다.



(a) Magnitude plot



(b) Phase plot

Fig. 10. Frequency response function of coaxially combined Terfenol actuator (Ch1/Ch0)

Fig. 11의 임펄스 응답을 사용하여 시스템에 대한 감쇠(damping)를 계산하였다. 그래프의 기울기가 선형인 구간에 대한 진폭의 크기(Magnitude) 변화에 따른 시간 변화 값을 이용하여 시스템에 대한 감쇠를 구할 수 있다.

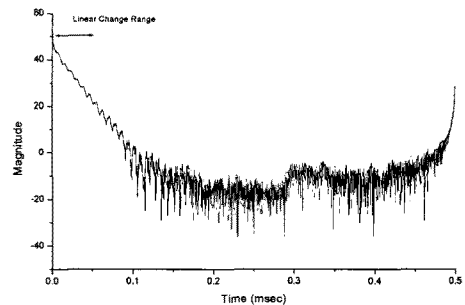


Fig. 11. Impulse Response of coaxially combined Terfenol Actuator in time domain (1) (Ch1/Ch0)

즉, 일부 부분에 대해 다항식(Polynomial Fit)을 적용하여 구한 4차의 식($Y = 0.04841 + 0.00338X - 2.08696E-4X^2 + 2.96248E-6X^3 - 1.08608E-8X^4$)을 측정 데이터와 같이 Fig. 12에 나타내었다.

선형 변화구간에서 8.7dB 감소되는데 걸린 시간은 $\tau=19.8ms$ 이다. $\sigma=1/\tau$ 에서 $\sigma=50.5 \text{ rad/sec}$ 이며, $\zeta=\sigma/\omega$ 의 관계식으로부터 ζ 를 구할 수 있다. ω 는 동일 축 상에 설치된 두 Terfenol 작동기의 주파수 응답으로부터 구해진 478Hz의 값을 적용하였을 때, 구해지는 감쇠비는 $\zeta=0.11$ 이다.

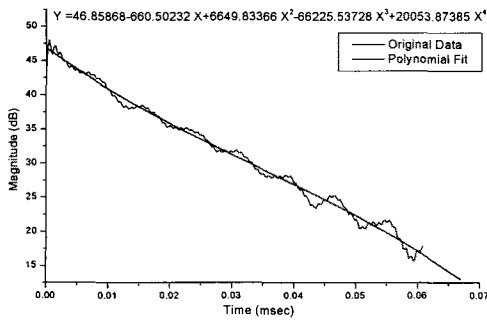


Fig. 12. Impulse Response of coaxially combined Terfenol Actuator in time domain (2) (Ch1/Ch0)

PPF 필터 주파수는 100Hz로 설정하였고 5Hz, 10Hz, 20Hz, 50Hz, 100Hz의 사인파를 입력 신호로 작동기 #1에 적용하였다. Amp#1과 Amp #2에 적용한 증폭 이득값은 Table 2와 같다.

Fig. 13에서는 작동기 #1에 사인파 5Hz, Amp #1 이득값 = 40, 작동기 #2의 Amp #2 이득값 = 35로 가진하였을 때 제어 전과 후의 Ch1의 신호를 나타내고 있다.

Table 2. Amp Gain value for excitations

Frequency(Hz)	Amp #1	Amp #2
5	40	35
10	50	45
20	30	32
50	30	28
100	40	34

또한, Ch1에서의 가속도계 센서를 통한 응답 신호에 대한 주파수응답함수(FRF) 분석을 수행하였다. 여기서, Amp #1만 가진 된 상태 즉, 제어 전 상태 일 때의 FRF 분석 결과와 Amp #2를

통한 제어 후 상태 일 때의 FRF 분석 결과를 Fig. 14에 나타내었다. 가진 주파수 5Hz에 대하여 제어전 120dB에서 제어 후에 93dB로 27dB의 감소를 나타내었다. 이를 진폭의 줄어든 크기로 나타내면 $-27=20\ln(x2/x1)$ 에서 $x2/x1=0.044668$ 로 제어 이전 진폭의 4.47%로 대폭 줄어듦을 알 수 있다.

같은 방법으로 20Hz의 사인파 입력에 대하여 Table 2에 주어진 이득값에 따라 제어 알고리즘을 적용하였을 때의 결과를 Fig. 15와 16에 나타내었다. 가진 주파수 20Hz에 대하여 제어전에 120dB에서 제어 후에 102dB로 18dB 감소하였다.

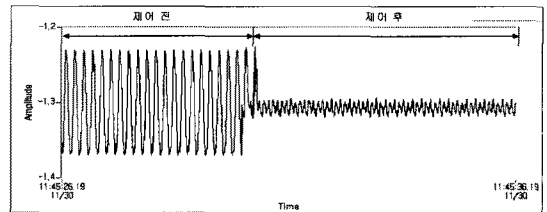
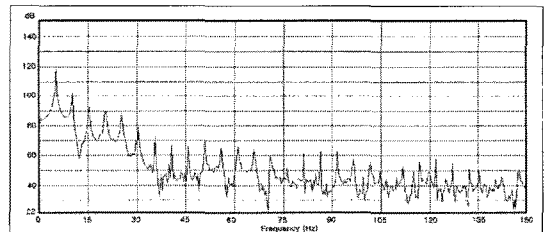
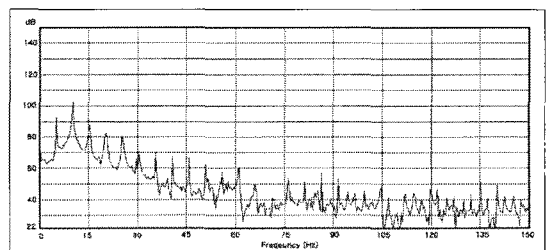


Fig. 13. Comparison of signal before and after control for sine 5Hz input (Ch1/Ch0)



(a) Before control



(b) After control

Fig. 14. Frequency response functions for sine 5Hz input (Ch1/Ch0)

같은 방법으로 100Hz의 사인파 입력에 대하여 Table 2에 주어진 이득값에 따라 제어 알고리즘을 적용하였을 때의 결과를 Fig. 17에 나타내었다. 가진 주파수 100Hz에 대하여 제어전에 91dB에서 제어 후에 81dB로 10dB 감소하였다.

Table 3에서는 각 주파수별 앰프(Amp) 이득값

의 적용에 따른 Ch1 센서 신호의 제어 전·후에 대한 최대(Max), 최소(Min) 전압을 측정된 값과 각각의 입력 신호에 대한 제어 전·후의 진폭의 변화 결과를 함께 나타내었다. 예상했던 바와 같이 저주파의 진동제어에 사용하는 PPF 알고리즘을 적용한 결과 고주파로 갈수록 진동제어의 효과가 떨어지는 것을 알 수 있다.

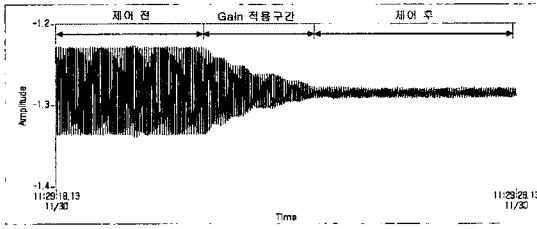
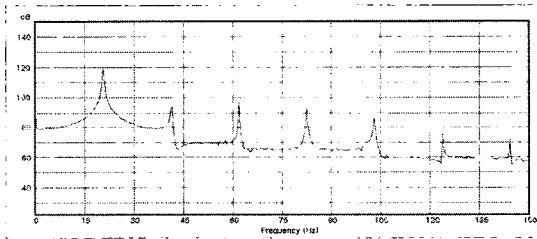
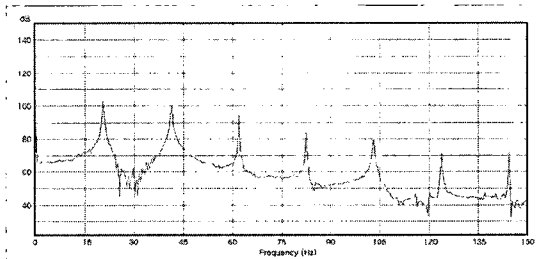


Fig. 15. Comparison of signal before and after control for sine 20Hz input (Ch1/Ch0)



(a) Before control



(b) After control

Fig. 16. FRF for sine 20Hz input (Ch1/Ch0)

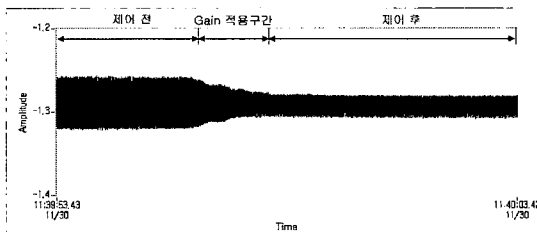


Fig. 17. Comparison of signal before and after control for sine 100Hz input (Ch1/Ch0)

Table 3. Magnitude reduction after control input for different frequencies

Frequency(Hz)	Voltage(V)		Uncollected (dB)	Controlled (dB)	Mag. ratio %	
	Max	Min	Log scale	Log scale		
5	Amp#1 구동 후	-1.226	-1.367	(120)	(93)	4.47
	Amp#2 구동 후	-1.287	-1.311	1×10^6	4.47×10^4	
10	Amp#1 구동 후	-1.177	-1.365	(120)	(88)	2.51
	Amp#2 구동 후	-1.272	-1.306	1×10^6	2.51×10^4	
20	Amp#1 구동 후	-1.233	-1.343	(120)	(102)	12.6
	Amp#2 구동 후	-1.287	-1.299	1×10^6	1.26×10^5	
50	Amp#1 구동 후	-1.257	-1.328	(120)	(108)	25.1
	Amp#2 구동 후	-1.287	-1.304	1×10^6	2.51×10^5	
100	Amp#1 구동 후	-1.262	-1.323	(91)	(81)	31.5
	Amp#2 구동 후	-1.282	-1.311	3.55×10^4	1.12×10^4	

III. 결 론

본 연구에서는 자기 변형 재료인 Terfenol-D 작동기를 진동 가진기 및 제어기로 사용하여 PPF 능동제어 기법을 적용하고 이를 검증하는 실험을 수행하였다. 이는 구조물의 능동제어에 필요한 특정 저주파 고유진동수에 대한 진동모드를 선택하여 제어할 수 있다는 장점을 가지고 있다. PPF 필터에 사용되는 설계 변수 값의 변경에 따른 입력 신호의 응답 특성을 관찰하였고 PPF 필터의 설계 변수 중에서 감쇠비 값은 0.1일 때, 시스템의 응답 특성이 가장 우수하다는 것을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 구조물의 경우와는 다르게 과도한 감쇠비 값의 증가는 오히려 시스템의 응답 특성을 나쁘게 한다는 것을 알 수 있었다. 또한 PPF 필터 이득값은 이론 및 실제 반복적인 실험을 통해서 구한 경험값으로 설정하였다.

제진 테이블의 진동을 제어하기 위한 제어기로서의 역할을 수행하기 이전에 우선 자기 변형 재료에 대한 특성을 파악하기 위해 알려진 신호의 입력을 통한 작동기 응답 신호를 측정하였으며, 제어이론을 적용한 후의 진동의 폭이 크게 줄어드는 응답도 관찰하였다. PPF 필터 주파수 보다 상대적으로 낮은 입력신호에 대해서는 제어 효과가 우수하였지만 PPF 필터 주파수 근처의 입력신호에 대해서는 제어 능력이 다소 낮게 나타났으며, 상대적으로 큰 주파수의 입력 신호에서는 제어 효과가 상당히 떨어짐을 알 수 있었다. 그러나 고주파의 가진에 대해서는 수동(passive) 제어에 의해서도 제진이 가능하고 본 연구에서 사

용된 PPF 알고리즘은 저주파수의 제진에 사용되는 알고리즘이므로 본 연구결과는 타당하다고 할 수 있다.

PPF 알고리즘은 저차의 몇 개의 모드만을 제어함에 따라 진동을 완전히 제어하지 못하는 한계점을 가지고 있으며 알려진 가진 입력 신호에 대한 제어에서는 PPF 제어 기법이 잘 적용되지만, 미지의 외부 가진력에 대한 제어에 있어서는 추가적으로 적응(Adaptive) 제어 개념을 적용하는 연구를 추후 수행해야 할 것이다.

참고문헌

- [1] M. I. Friswell, and D. J. Inman, "The relationship between positive position feedback and output feedback controllers", *Smart material and structures*, vol. 8, 1999, pp. 285-291.
- [2] J. L. Fanson, and T. K. Caughey, "Positive Position Feedback Control for Large Space Structures", *AIAA Journal*, vol. 28, no. 4, April, 1990, pp. 717-724.
- [3] P. D., Andrew, "A Comprehensive Experimental Evaluation of Actively Controlled Piezoceramics with Positive Position Feedback for Structural Damping", *Master of Science in Mechanical Engineering, Virginia Polytech Institute, Blacksburg, Virginia*, April 10, 2000.
- [4] S. Jinsiang, "Adaptive Vibration Control by Using Magnetostrictive Actuator", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 9, Feb, 1998, pp. 87-94.
- [5] Jinsiang Shaw, "Active Vibration Isolation by Adaptive Control", *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Control Applications*, August, 1999, pp. 1509-1514.
- [6] 광문규, "동적 모델링 및 능동진동제어 기술 연구", *한국소음진동공학회지*, 제 12권, 제 3호, 2002, pp. 147-153.
- [7] 허석, 광문규, "유전자 알고리즘을 이용한 지능구조물의 PPF 제어기 실시간 다중변수 조정", *한국소음진동공학회지*, 제 11권, 제 1호, 2001, pp. 147-155.
- [8] 광문규, 라완규, 윤광준, "PPF와 SRF 조합제어기법을 사용한 지능구조물의 능동진동제어", *한국소음진동공학회지*, 제 7권, 제 5호, 1997, pp.811~817.
- [9] 신태식, 광문규, "Real-Time Tuning of the Active Vibration Controller by the Genetic Algorithm", *한국소음진동공학회지*, 제 10권, 제 6호, 2000, pp. 1083~1093.
- [10] Y. W. Hwon and H.C. Bang, *The Finite Element Method Using MATLAB*, Second Edition, CRC Press, 2000.
- [11] D. J. Inman, *Engineering Vibration*, 2nd Edition, Prentice-Hall, 2001.