

## 자기 변형 작동기를 이용한 진동 절연 시스템

### The Vibration Isolating System using a Magnetostrictive Actuator

°정 학근\*, 박 기환\*

\* 광주과학기술원 기전공학과 (Tel:+82-62-970-2391; Fax:+82-62-970-2384; E-mail:Khpark@smart.kjist.ac.kr)

**Abstract** When a magnetostrictive material is exposed to a magnetic field, its geometry changes due to a magnetostrictive effect. The magnetostriction is analogous to the piezoelectricity. The displacement of the magnetostrictive material is proportional to the applied current while that of the piezoelectric material is proportional to the voltage. A magnetostrictive material generates large displacement and higher compressive force compared with a piezoelectric material. These advantages provide a good performance of a vibration isolation of a platform. In this work, it is applied to a driving actuator for vibration isolation of a platform. The properties of a magnetostrictive material are investigated in terms of hysteresis and displacement vs. applied current for a various preload. Modeling of the displacement of the vibration isolating actuator is performed as it behaves as a flow source. A sliding mode controller is designed to demonstrate the ability of the magnetostrictive actuator to reduce the vibration at the platform. The effectiveness of the proposed scheme is demonstrated through experimental works. The experimental results of the vibration of the platform are presented in terms of time response and frequency response.

**Keywords** Magnetostrictive Material, Vibration Isolation, Sliding Mode Control

## 1. 서론

진동이 기계나 구조물에 가해질 수 있는 악영향을 감소시키기 위해 스프링이나 댐퍼 같은 수동적인 소자를 이용한 진동 절연에 대한 많은 연구가 진행 되어져 왔다. 그러나 이러한 방법은 특정한 주파수에 대해서만 진동 절연 성능을 나타낸다는 한계점을 가진다. 현재는 모든 주파수 대역에서 진동 절연의 성능을 가질 수 있도록 지능재료의 능동적인 제어에 대한 연구가 국내외적으로 많이 진행되고 있고 전기 유동 유체[2], 압전 재료[4, 5] 그리고 형상 기억 합금[6] 등을 작동기 또는 감지기로 사용하는 연구가 활발히 진행중이다.

많은 능동 소자들중에서 자기 변형 재료(magnetostrictive material)는 외부에서 가해진 자계에 비례한 변위를 발생시키는 작동기로, 진동 절연을 위해 활발히 연구되는 압전 재료에 비해 큰 변위와 압축력에 강한 장점을 가진다. 따라서 본 논문에서는 자기 변형 재료를 이용하여 진동 절연 시스템을 구성하고 그 성능을 시험하고자 한다. 자기 변형 재료를 진동 절연 작동기로 사용하기 위해 자기 변형 재료의 변위 특성이 effort source와 flow source로 모델링된 경우의 변위 관계식을 알아 보고, 자기 변형 재료의 변위 특성이 flow source로 모델링 되는 진동 절연 시스템의 성능을 조사한다.

진동 절연 시스템에는 모델링 상수의 불확실성과 외란에도 강인한 제어 성능을 보이는 슬라이딩 모드 제어 알고리즘이 적용된다. 슬라이딩 모드 제어기는 상태 공간에서 미리 설정한 슬라이딩 평면에 시스템의 상태를 유지시키면서 제어 대상의 상태에 따라 제어기의 구조를 바꾸면서 목표치에 도달시키는 제어 방식이다. 따라서 슬라이딩 모드 제어기는 슬라이딩 평면에 도달하기 전의 기간에는 매개 변수의 변동이나 외란에 민감하여 불연속 입력에 의한 상태 궤적이 채터링하게 된다. 이런 채터링 현상으로 인해 모델링에서 고려하지 않은 고주파 성분은 제어 입력에 포함되어 본 논문과 같이 모든 주파수 대역에서의 진동 절연을 목표로하는 시스템에서는 제어기 성능이 저하된다. 상태 궤적의 채터링 현상을 피하기 위해 슬라이딩 평면 근처에 경계층을 설정하여, 그 경계층 영역 안에서는 불연속 입력을 연속 입력으로 변환시킨다. 경계층의

영역은 시스템의 상태가 정상 상태에 도달하면 점근적으로 "0"으로 수렴하도록 설정하여 정상 상태 오차를 줄인다.

본 논문에서는 수동 진동 절연기의 한계점과 능동 진동 절연기 장점을 부각시키기 위해 수동 진동 절연 소자와 능동 진동 절연 소자를 모두 포함하는 진동 절연 시스템을 구성한다.

제어를 위해 필요한 입력신호인 베이스와 플랫폼의 변위는 비접촉 변위센서인 정전형 센서로 측정되고, 자기 변형 작동기는 컨버터와 전류 증폭기를 통해 구동된다. 제어기는 신뢰도와 견실성을 높이기 위해 TM320C31을 CPU로 제작된 헤론사의 DSP보드를 이용하여 구성된다.

본 논문의 구성은 2장에서는 자기 변형 재료의 특성 및 기본 관계식을 설명하고, 진동 절연 시스템의 구성에 대해 3장에서 설명하고, 4장에서는 제안된 슬라이딩 모드 제어 기법에 대하여 소개하고, 5장에서는 실험결과를, 마지막으로 6장에서는 결론에 관하여 기술한다.

## 2. 자기 변형 재료의 특성 및 모델링

Fig.1과 같은 자기 변형 물체에 외부 자계에 의해서 생기는 자화력(magnetizing force)은 식(1)과 같이 구해진다.

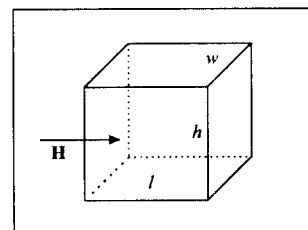


그림 1 자기 변형 물질

Fig. 1 The magnetostrictive material

$$F = \frac{\phi^2}{2\mu wh} - \frac{\phi^2 l}{2\mu^2 wh} \frac{\partial \mu}{\partial l} \quad (1)$$

여기서  $w, h, l$ 은 각각 자기 변형 재료의 폭, 높이, 길이이고,  $\phi$ 는 자속(magnetic flux),  $\mu$ 는 자기 변형 재료의 투자율인데,  $\mu = \mu(\rho)$ 로 밀도에 대한 함수이다. 식(1)에서 보듯이 자화력은 외부에서 가하는 자계의 제곱에 관한 함수이기 때문에 자계의 방향과는 무관하고 그 세기에만 관계한다. 따라서 외부 자계의 방향이 반대가 되더라도 내부 자역들의 자화 방향만 반대가 될 뿐 자화력은 같으므로 자기 변형 재료는 외부 자계에 대해 항상 늘어나게 된다. 따라서 자기 변형 재료가 양방향의 움직임을 가지도록 하기 위해서 기계적으로나 전자기적으로 바이어스를 가해야 한다. 전자기적으로 자기 변형 재료에 바이어스를 거는 방법은 자기 변형 재료 주위에 영구자석, 또는 솔레노이드를 설치하여 이 자계에 의해 자기 변형 재료가 양의 변형률을 가지게 하는 것이다. 이와 같이 자기 변형 물질이 양의 변형률을 가진 상태에서 자계의 세기와 방향을 조절하면 자기 변형 재료가 양방향의 움직임을 가지도록 할 수 있다. 기계적으로 바이어스를 거는 방법은 초기에 압축력을 자기 변형 재료에 가해서 수축시켜 음의 변형률을 가지게 하는 것이다. 여기에 일정 자계를 가하여 자기 변형 재료의 변형률을 압축력을 가하기 전의 상태로 만들어 기준 위치로 설정하면 자기 변형 재료가 기준 위치로부터 양 방향의 움직임을 가지도록 할 수 있다.

식(1)에서 우변의 첫째 항은  $\phi^2$ 에만 의존하므로 정자력(magnetostatic force)에 관한 항으로, 두번째 항은  $\frac{\partial \mu}{\partial H}$ 에 의존하므로 자기 변형에 관한 항으로 볼 수 있으므로 식(1)의 계수들을 실험적으로 구하기 위해 자기 변형 물질의 변형률은 다음과 같이 외부에서 작용되는 압축력과 자계의 세기로 관한 것으로 표현할 수 있다.

$$S = s^H T + dH \quad (2)$$

식(2)에서  $S$ 는 자기 변형 재료의 변형률,  $s^H$ 는 자기 변형 재료의 탄성계수,  $T$ 는 외부에서 가해지는 압축력,  $d$ 는 외부에서 가해지는 압축력이 없을 때 자기 변형 재료의 변형률과 가해지는 자계의 세기와의 비를 나타내는 자기 변형률 상수,  $H$ 는 자기 변형 재료에 가해지는 자계의 세기이다.

본 논문에서는 직경이 6.0 [mm], 길이가 25.0 [mm]인 자기 변형 재료를 사용하여 Fig.2와 같이 예압용 스프링( $k_2$ )에 의해 자기 변형 재료가 기계적으로 바이어싱이 되고 있는 구조로 구성한다. 자기 변형 재료가 양방향의 움직임을 가질 수 있게 하는 두 가지 방법중 기계적으로 바이어스를 거는 방법을 택한 이유는 구조가 간단고, 자기 변형 재료가 가지는 히스테리시스 특성도 감소시킬 수 있기 때문이다.

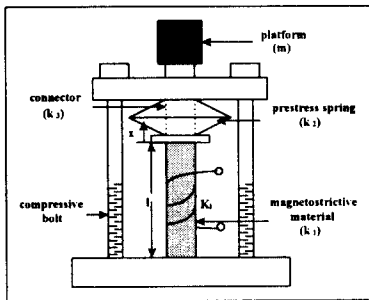


그림 2 자기 변형 작동기의 구조

Fig. 2 Configuration of a magnetostrictive actuator

식(2)에서 언급했듯이 자기 변형 재료의 변형률은 외부에서 가해지는 자계의 세기에 비례할 뿐만 아니라 외부에서 가해지는 압축력에도 영향을 받으므로, Fig.2와 같은 구조에서 플랫폼의 질량( $m$ )이 아주 작고, 그 동작 주파수가 저주파의 영역이면 물체에 의해 자기 변형 재료에 유입되는 반발력은 자기 변형 재료의 기계적 바이어스를 위해 가해진 압축력 — 이 힘과 같은 크기의 힘을 자기 변형 재료가 반발력으로 발생시키고 있다 — 에 비해

아주 작기 때문에 자기 변형 재료는 외부에서 가해주는 자계의 세기에만 비례해서 변위가 생기게 된다. 이런 경우처럼 액추에이터가 전기적인 입력에 대해 출력으로 움직이는 물체의 관성력에 관계없이 비례적으로 변위를 발생시키면 flow source로 해석할 수 있고, 등가 모델은 Fig.3의 (a)와 같이 나타낼 수 있다. 이때 자기 변형 재료의

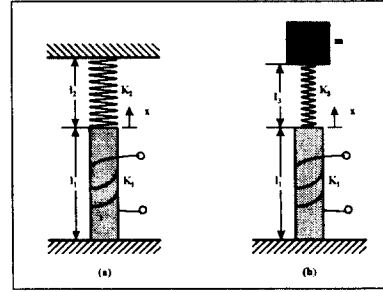


그림 3 자기 변형 작동기의 등가 모델

Fig. 3 The simplified model of the magnetostrictive actuator

변위는 식(3)와 같이 구해진다.

$$x = \frac{l_1 d H}{1 + k_2/k_1} \quad (3)$$

여기서  $k_1$ 은 자기 변형 재료의 등가 스프링 상수이다. 예압 스프링 상수( $k_2$ )는 통상 자기 변형 재료의 등가 스프링 상수( $k_1$ )에 비해 작으므로 식(3)는 다음과 같이 외부자계에 변위가 선형적으로 변하는 관계식을 얻는다.

$$x = l_1 d H \quad (4)$$

그러나 만일 플랫폼의 질량이 크고, 그 동작 주파수가 어느 정도의 고주파의 영역에서 동작한다면 물체에 의해 자기 변형 재료에 유입되는 반발력이 무시될 수 없기 때문에 자기 변형 재료의 변위는 외부의 자계의 세기 뿐만 아니라 이 반발력까지 고려되어서 구해져야 한다. 이런 경우처럼 전기적 입력에 대해 액추에이터의 출력이 관성력이 고려되어서 나타나면 그 액추에이터는 effort source로 해석할 수 있고, 등가 모델은 Fig.3의 (b)와 같이 나타낼 수 있다. 이 때 자기 변형 재료의 변위는 식(5)와 같이 구해진다.

$$x = \frac{(1 + \frac{m}{k_2} \omega^2)}{1 + \frac{m(k_1 + k_3)}{k_1 k_3} \omega^2} l_1 d H \quad (5)$$

여기서  $m$ 은 플랫폼의 질량이고,  $k_3$ 는 플랫폼과 자기 변형 재료를 연결하고 있는 커넥터의 스프링 상수,  $\omega$ 는 자기 변형 재료에 가하는 자계의 주파수이다. 식(5)에서 플랫폼의 질량이 작고, 또 자계의 주파수가 저주파 영역이면 결국 식(4)로 간략화 된다.

자기 변형 재료의 변위식에 포함되어 있는 자기 변형률 상수는 다음과 같은 실험을 통해 구한다. 먼저 플랫폼에서 가해지는 힘이 없는 상태를 고려해 보자. Fig.2의 자기 변형 재료에 스프링에 의해 임의의 초기 압축력  $T_0 = 6.9 [N/mm^2]$ 가 가해진 상태에서 자계의 세기에 비례하는 자기 변형 재료의 변형률은 Fig.4의 곡선 (a)로 실험적으로 구해진다. 이 상태에서  $6.9 [N/mm^2]$ ,  $13.8 [N/mm^2]$ ,  $20.7 [N/mm^2]$ 의 압력이 예압 스프링을 통해 더 부가된 상태에서의 자계의 세기에 비례하는 자기 변형 재료의 각각의 변형률 곡선은 Fig.4의 곡선 (b), (c), (d)로 구해진다. 이 곡선들을 이용하면 플랫폼에서 가해지는 힘을 고려한 자계에 따른 변위 관계도 알 수 있다. 초기 압축력  $6.9 [N/mm^2]$ 인 상태의 자기 변형 재료에 플랫폼에서  $6.9 [N/mm^2]$ 의 압축력이 부가되면  $25 \times 10^3 [A/m]$ 의 자계가 가해 질 때 변형률은  $600 [ppm]$ 이 아니라  $200 [ppm]$ 이 됨을 Fig.4를 통해서 알 수 있다. 또 플랫폼에서 자기 변형 재료에  $13.8 [N/mm^2]$ 의 압축력이

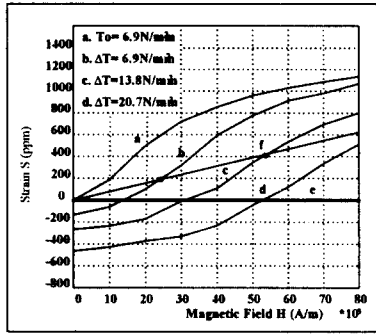


그림 4 자기 변형 재료의 변형률 곡선  
Fig. 4 The strain curves of magnetostrictive actuator under various preloads

전달되던 자계의 세기가  $53 \times 10^3 [A/m]$ 일 때 변형률은  $400 [ppm]$ 이 된다. 이런 방법을 통해 구해진 Fig.4의 (f)곡선은 플랫폼에서 전달되는 힘이 고려된 자계의 세기에 따른 자기 변형 재료의 변위 곡선이다. 따라서 식(3)과 같이 자기 변형 재료의 변위를 flow source로 해석하는 경우는 실험적으로 Fig.4의 (a),(b),(c),(d)곡선을 이용하여 각각의 예압하에서의 자기 변형률 상수를 얻을 수 있다. 식(5)와 같이 자기 변형 재료의 변위를 effort source로 해석하는 경우의 자기 변형 재료의 변위 관계식은 Fig.4의 (f)곡선을 이용하여 구할 수 있다.

### 3. 진동 절연 시스템의 구성 및 해석

진동 절연 시스템은 자기 변형 물질에 자계를 주기 위한 솔레노이드, 자기 변형 작동기, 플랫폼, 베이스, 예압용 스프링 그리고 작동기와 플랫폼을 연결하는 스프링으로 구성된다. 솔레노이드는 길이가  $25 [mm]$ , 권선수가  $800 [Turns]$ 이다. 이 솔레노이드가 발생시키는 자계의 세기는 암페어 법칙을 이용하여 계산된다.

$$\oint H \cdot dl = nI \quad (6)$$

여기서  $n$ 은 솔레노이드에 감긴 권선수이다. 플랫폼의 질량은  $0.18 [kg]$ 으로 하였고, 예압용 스프링은 그 상수가  $170 [kN/m]$ 으로 하였고, 자기 변형 작동기와 플랫폼의 연결부를 그 상수를  $35 [kN/m]$ 인 스프링( $k_3$ )으로 했는데 그 이유는 저주파 대역에서의 수동 소자의 진동 절연 성능을 살피기 위해서이다. 이렇게 구성된 시스템에서 플랫폼이 진동중에 자기 변형 재료에 미치는 압축력은 플랫폼의 질량, 진동 주파수의 제곱, 변위량의 곱에 의해 결정되며 최대치는  $0.1 [N/mm^2]$  정도이다. 따라서 예압용 스프링으로 초기 압축력을  $6.9 [N/mm^2]$ 으로 한다면, 플랫폼이 자기 변형 작동기에 주는 압축력은 무시될 수 있으므로, 자기 변형 재료는 flow source로 해석할 수 있고, 그 변위는 식(4)와 식(6)을 이용하여 다음과 같이 솔레노이드에 입력되는 전류에만 관한 식으로 표현할 수 있다.

$$x = dnI \quad (7)$$

여기서 자기 변형률 상수  $d$ 는 Fig.4의 곡선(a)에서  $17 \times 10^{-9}$ 으로 구해지고, 솔레노이드에 인가되는 전류가  $2 [A]$ 일때 자기 변형 재료의 변위는  $27.2 [\mu m]$ 가 된다.

이와 같이 구성된 진동 절연 시스템의 운동 방정식은 액추에이터를 flow source로 해석하므로, 식(8)과 같이 간단히 이차의 방정식으로 구해진다.

$$m\ddot{x}_p + c\dot{x}_p + k_3x_p = c(\dot{x}_b + \dot{x}) + k_3(x_B + x) \quad (8)$$

$m$ 은 플랫폼의 질량,  $c$ 는 점성 마찰 계수,  $k_3$ 는 플랫폼과 연결되어 있는 스프링의 상수,  $x_b$ 는 베이스의 변위,  $x_p$ 는 플랫폼의 변위이고  $x$ 는 자기 변형 재료의 변위이다. 진동 절연 시스템을 모델링한 운동 방정식 식(8)에 있는 파라미터중 플랫폼의 질량( $m$ )과 수동 진동 절연 소자로 사용된 스프링 상수( $k_3$ )는 측정하여 구할 수 있지만, 점성 마찰 계수( $c$ )는 측정하기 힘들어 정확한 값을 알기가 어렵다. 그러므로 본 논문에서는 모델링의 파라미터의 불확실성에서도 강인한 제어 특성을 보이는 슬라이딩 모드 제어기법으로 제어기를 설계한다.

### 4. 슬라이딩 모드 제어기 설계

슬라이딩 모드 제어기의 특징으로는 시스템의 상태가 슬라이딩 현상 중일 경우에는 시스템의 매개 변수의 변화에 무관하고 외란에도 강인한 특성을 얻을 수가 있다. 슬라이딩 평면을  $s(x; t)$ 로 나타낸다면

$$s(x, t) = \left( \frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} \tilde{x} \quad (9)$$

여기서  $\tilde{x} = x - x_d$ 이고  $x$ 는 출력,  $x_d$ 는 목표치이다. 한편, 슬라이딩 제어 입력  $u$ 는 식(10)의 조건을 만족하도록 결정한다.

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2 \leq -\eta |s| \quad (10)$$

식(10)과 같은 슬라이딩 조건을 만족하는 해는 식(12)의 형태로 구해진다.

$$u = \hat{u} - k \cdot \text{sgn}(s) \quad (11)$$

여기서,  $\hat{u}$ 는  $s(x, u) = 0$ 일 때의 제어 입력이다.  $k \cdot \text{sgn}(s)$ 는 평면  $s(x) = 0$ 에 접근하는 상태 궤적(state trajectory)의 함수이다.

Fig.5와 같은 진동 절연 시스템에 슬라이딩 모드 제어기를 적용하면 원하는 출력이 플랫폼의 변위( $x_p$ )이므로  $\tilde{x} = x_p - x_{pd}$ 로 하면, 여기서  $x_{pd}$ 는 플랫폼의 원하는 위치이므로 '0'이 되어,  $\tilde{x} = x_p$ 가 된다. 따라서 슬라이딩 평면은 식(9)에서  $n = 1$ 로 정하면, 다음과 같이 구해진다.

$$s(x, t) = \left( \frac{d}{dt} + \lambda \right) \tilde{x} = \dot{x}_p + \lambda x_p \quad (12)$$

가 된다. 여기서  $\lambda$ 는 임의의 양수이고, 슬라이딩 제어 입력을 구하기 위해 식(8)에서  $\frac{d}{dt} \cdot \tilde{x} + \frac{k_3}{m} \cdot x$ 를  $u$ 로 두면 식(12)의  $\hat{u}$ 와  $k$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\hat{u} = \frac{\hat{c}}{m} (\dot{x}_p - \dot{x}_B) + \frac{k_3}{m} (x_B - x_p) - \lambda \tilde{x} \quad (13)$$

$$k = \left| \frac{\hat{c} - c}{m} (\dot{x}_B - \dot{x}_p) \right| + \eta \quad (14)$$

여기서  $\hat{c}$ 는 점성 마찰 계수( $c$ )의 근사치이다. 그러면 슬라이딩 모드 제어 입력은 식(9)에 의해서 식(16)로 구해진다.

$$u = \frac{\hat{c}}{m} (\dot{x}_p - \dot{x}_B) + \frac{k_3}{m} (x_B - x_p) - \lambda \tilde{x} - \left( \left| \frac{\hat{c} - c}{m} (\dot{x}_B - \dot{x}_p) \right| + \eta \right) \cdot \text{sgn}(s) \quad (15)$$

일반적으로 슬라이딩 모드 제어 입력은 식(12)과 식(16)에서 보는 바와 같이 부호 함수항을 포함하는 불연속 함수로 표현된다. 이 불연속 함수에 의해 슬라이딩 표면  $s(x) = 0$ 에 도달하기 위한 상태 궤적은 심한 진동을 하게 된다. 이러한 불연속적인 입력으로 인하여 모델링 과정에서 무시된 고주파 성분을 포함하게 되고

슬라이딩 현상의 파괴로 인한 오버슈트가 발생하는 경우가 있다. 이런 채터링 현상에서 발생하는 고주파 성분은 진동 절연 제어기의 성능에 큰 영향을 미칠수 있다. 이 문제는 슬라이딩 평면과 나란한 경계층(boundary layer)을 설정하여 이 경계층 안에서는 불연속 제어 입력을 연속 입력으로 바꾸는 방법으로 해결할 수 있다. 그러나 이 방법은 경계층이 나란히 설정되어 정상 상태에서는 오차가 생기게 한다. 따라서 본 논문에서는 시스템의 상태가 정상 상태에 도달하면 경계층의 영역이 '0'으로 수렴하도록 경계층의 영역을 식(16)와 같이 설정한다.

$$\dot{\Phi} = -\lambda\Phi + \left( \frac{\hat{c}-c}{m}(\dot{x}_B - \dot{x}_p) \right) + \eta \quad (16)$$

이 경계층의 함수를 고려하여 최종적인 슬라이딩 모드 제어기의 제어 입력을 식(18)과 같이 구할 수 있다.

$$u = \frac{\hat{c}}{m}(x_p - x_B) + \frac{k_3}{m}(x_B - x_p) - \lambda\tilde{x} - \left( \frac{\hat{c}-c}{m}(\dot{x}_B - \dot{x}_p) \right) + \eta - \dot{\Phi} \cdot \text{sat}\left(\frac{\dot{x} + \lambda\tilde{x}}{\Phi}\right) \quad (17)$$

### 5. 실험 및 결과

진동 절연 시스템의 베이스는 가진기로 가진되고, 베이스와 플랫폼의 위치는 정전형 센서에 의해 측정된다. 측정된 각각의 위치 신호는 아날로그 미분기와 저역 통과 필터를 통해서 각각의 속도 신호로도 변환된다. 해론사의 DSP보드로 구성된 제어기는 베이스와 플랫폼 각각의 위치, 속도 신호들을 입력으로 하여 제어 입력을 결정하고, 이 제어 입력은 컨버터를 통해 자기 변형 재료의 변위에 해당하는 전압 신호로 전환된다. 이 전압 신호는 진류 증폭기를 통해 솔레노이드가 자계를 발생시켜 자기 변형 재료를 구동시킨다(Fig.5 참조).

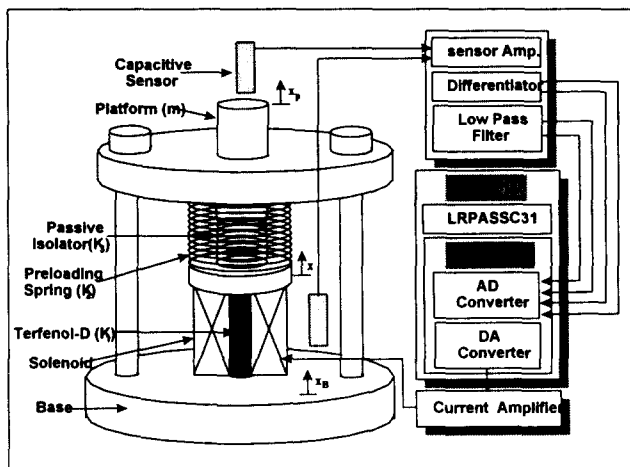


그림 5 자기 변형 작동기를 이용한 진동 절연 시스템  
Fig. 5 The vibration isolating system using the magnetostrictive actuator

실험은 수동 진동 절연 소자로 인해 생기는 고유진동수인 70 [Hz]에서 수행되었다. Fig.6의 (a)는 70 [Hz]에서 능동 진동 절연 시스템과 수동 진동 절연시스템의 시간 응답 특성을 보여준다.  $\pm 8[\mu\text{m}]$ 의 진동이 베이스에 가진될 때 수동 제어기만 동작할 경우는  $\pm 16[\mu\text{m}]$ 로 발산하지만, 자기 변형 재료의 능동 제어가 동작할 경우는  $\pm 4[\mu\text{m}]$ 로 감쇠됨을 볼 수 있다. Fig.6의 (b)는 수동 진동 절연기와 능동 절연기의 주파수 응답 특성을 보여준다. Fig.6의 (b)를 보면 자기 변형 재료로 구성된 진동 절연기는 수동 진동

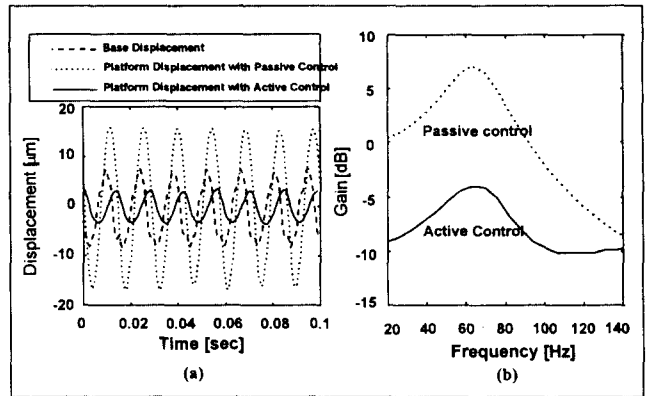


그림 6 시간 응답 특성과 주파수 응답 특성  
Fig. 6 Time & frequency response curves

절연기가 지나는 주파수 대역의 한계점을 극복하고, 또한 모든 주파수 대역에서 수동 진동 절연기에 비해 -10 [dB]이상의 진동 절연 성능을 나타냄을 볼 수 있다.

### 6. 결론

본 연구에서는 능동 진동 절연 소자로 자기 변형 재료를 사용하기 위해 자기 변형 재료를 모델링하고, 또한 실험을 통하여 그 특성을 구하였다. 그리고 자기 변형 액추에이터를 flow source로 해석되도록 구성하였다. 자기 변형 액추에이터와 수동 진동 절연 소자와의 성능을 비교할 수 있도록 각각에 대해 시간 응답 특성 실험과 주파수 응답 특성 실험이 행해졌다. 실험 결과는 자기 변형 액추에이터를 이용하면 종래의 수동 진동 절연 소자가 가지는 주파수 대역의 한계점을 개선할 수 있고, 또한 보다 좋은 진동 절연 성능을 가져올 수 있음을 보여준다. 그리고 본 논문의 결과를 바탕으로 몇 개의 자기 변형 재료를 적절히 조합하면 다축으로의 진동 절연시스템도 구현할 수 있을 것으로 기대된다.

### 참고문헌

- [1] J.L. Butler, *Application Manual for Design of Etrema Terfenol-D*, Edge Technologies Inc, Ames, Iowa, 1988.
- [2] D. Cho and J.K. Herick, "Pneumatic actuators for vehicle active suspension applications", *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 107, pp. 67-72, 1985.
- [3] J.J. Slotine, Weiping Li, *Applied Nonlinear Control*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1991.
- [4] H.S. Tzou, "Active vibration control of flexible structure via converse piezoelectricity", *Developments in Mechanics (Soedel and Hamilton editors)*, vol. 14-c, pp. 1201-1206, 1987.
- [5] H.S. Tzou and C.I. Tseng "Development of a thin piezoelectric finite element applied to distributed sensing and vibration controls", *ASME*, paper NO.88-WA/CIE-2, 1988.
- [6] 이승우, L.R. Koval, 김재명, "형상기억합금 액추에이터를 이용한 강건한 진동제어", *대한기계학회논문집*, 제 19 권, 제 1 호, pp. 263-270, 1995.