

시간지연 제어기법을 이용한 공압 제진대의 저주파 영역에서의 진동 절연 성능 향상

Performance Enhancement of Pneumatic Vibration Isolator in Low Frequency by Time Delay Control

오 기 용* · 신 윤 호* · 이 정 훈* · 김 광 준†

Ki-Yong Oh, Yun-Ho Shin, Jeung-Hoon Lee and Kwang-Joon Kim

(2006년 6월 2일 접수 ; 2006년 10월 16일 심사완료)

Key Words : Pneumatic Isolator(공압 제진대), Transmissibility(전달률), Robust Control(강인 제어), Time Delay Control(시간지연 제어 법칙)

ABSTRACT

As environmental vibration requirements on precision equipment become more stringent, use of pneumatic isolators has become more popular and their performance is subsequently required to be further improved. Performance of passive pneumatic isolators is related to various design parameters in a complicated manner and, hence, is very limited especially in low frequency range by chamber volume. In this study, transmissibility behavior of the pneumatic isolators depending on frequency and dynamic amplitude are presented. Then, an active control technique, time delay control, which is adequate for a low frequency nonlinear system, is applied. A procedure of applying the time delay control law to a pneumatic isolator is presented and its effectiveness in the transmissibility performance is shown. Comparison between passive and active pneumatic isolators is made based on simulation.

1. 서 론

최근 반도체 제조용 스테퍼, 전자현미경, 정밀측정기 등과 같은 초정밀 장비들의 지속적인 기술 발달과 더불어 장비 성능 최대화를 위하여 장비가 설치되는 환경에 대한 관심도 상승하고 있다. 특히, 장비의 운전 중 주변 혹은 장비 자체에서 발생하는 진동은 장비 성능 저하의 원인이 되므로 이에 대한 적절한 조치가 필요하다.

장비 성능 저하의 원인이 되는 진동원은 크게 두 가지로서, 지반 진동(ground vibration)과 장비 구

동 중 발생하는 진동(vibration on working) 등이 있다. 지반 진동 절연을 목적으로 사용되는 공압 제진대는 지반으로부터 전달되는 진동 절연과 더불어, 장비 구동 중 발생하는 진동이 다른 장비 구동시 성능 저하 요인으로 작용되는 것을 방지하기 위한 수단으로 이용된다. 두 개의 챔버와 모세관, 다이어프램으로 구성되는 공압 제진대는 설계 변경을 통한 제진 성능 향상에 한계가 있다. 능동 제어 기법의 적용은, 설계 변경을 통한 공압 제진대 절연 성능 향상의 한계를 극복하기 위한 하나의 방법으로 차량 능동 마운트 등 절연 장치 개발에 널리 사용되고 있다.

이중 챔버형 공기 스프링은 Fig. 1과 같이 두 개의 챔버(chamber)와 그 사이의 모세관(capillary tube), 상단 챔버 위에 하중을 지지하는 피스톤(piston), 피스톤과 챔버를 연결하여 공압을 유지시

† 책임저자; 정회원, 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : kjkim@kaist.ac.kr

Tel : (042)869-3024, Fax : (042)869-8220

* 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

키는 다이어프램(diaphragm)으로 구성되어 있다. 상·하단 챔버 내의 공기는 압축성을 이용하여 강성 요소의 역할을 하고, 중앙의 모세관은 공기와 벽면과의 마찰을 이용하여 감쇠 요소의 역할을 하며 공기 누설을 방지하기 위해 사용되는 다이어프램은 고무 재질로서 추가의 강성 요소의 역할을 한다⁽¹⁾.

기존의 공기 스프링 모형에서는 피스톤의 진폭이 매우 작다는 가정하에서 모세관 유동과 챔버 내 공기 유동을 선형화 시켰으나, 정확한 다이어프램의 복소 강성에 대한 모형화에는 관심을 기울이지 않고 있다. 더불어 공압 제진대 능동 제어 이론 적용에 관한 연구에서도 이러한 공압 제진대의 비선형적인 요소 혹은 다이어프램의 강성에 대한 고려 없이 제어 이론을 적용하고 있으므로, 개선된 절연 성능 향상에 한계점을 보이고 있다⁽²⁾.

이 연구는 수동형 공압 제진대에서 한계점으로 부각되는 고유 진동수 부근 혹은 이하의 진동 절연 성능 향상을 목적으로, 고유 진동수를 낮추고 감쇠비를 증가시키는 방향으로 능동 제어 이론을 적용하고자 한다. 이 때, 공압 제진대 거동에 있어서 진폭의 존성과 모형화에 고려하지 않은 다이어프램의 강성 등을 고려할 수 있는 능동 제어 이론인 시간 지연 제어 기법을 도입하고자 한다.

대다수의 능동 제어 기법들은 제어 이론 적용에 있어 대상 계에 대한 정확한 모형을 필요로 하는 반면, 시간 지연 제어 기법은 대상 계에 대한 모형의 비선형성, 불확실성 등을 반영한 능동 제어 이론의 적용이 가능하다. 그러나 시간 지연 제어 기법은 계

의 상태 정보를 요구하며, 시간 지연을 이용하므로 빠른 응답을 요구하거나, 대상 계의 입력이 허용 시간 지연 구간 외로 벗어나면 제어 이론 적용이 불가능하다.

제어 이론 중 많이 사용되는 PID 제어 기법과 시간 지연 제어 기법을 비교하면, PID 제어 기법은 원하는 성능을 구현하도록 제어 계인을 동시에 설계해야 하는 어려움이 있으나, 시간 지연 제어 기법은 기존 모형을 먼저 정의하고 입력 행렬을 이용하여 모형의 오차를 줄여가는 순차적인 방법을 사용하므로 제어기의 설계가 용이하다.

공압 제진대의 설계 변경을 통한 진동 절연 성능 향상은 한계가 있고, 공압 제진대 모형은 진폭 의존성 및 다이어프램 강성을 고려하지 않고 있어, 일반적인 제어 기법을 적용 할 경우 목적하는 제어 성능 발현이 어렵다. 시간 지연 제어 기법은 대상 계에 대한 정보가 상대적으로 적은 계에 대해서도 적용이 가능하며, 상대적으로 우수한 제어 성능을 보인다. 그러므로 이 연구에서는 시간 지연 제어 기법을 공압 제진대에 적용하여, 공압 제진대의 진동 절연 성능을 개선하고자 한다.

2. 공압 제진대(Pneumatic Isolator)

공압 제진대의 수학적 모형⁽¹⁾을 유도하기 위해서는 피스톤의 운동을 설명하기 위한 강제 동역학, 상·하 챔버 내부의 공기의 압축·팽창을 기술하기 위한 열역학, 모세관 내의 공기 유동과 관련하여 유체 역학이 적용되며, 이러한 역학 관계를 조합하면 다이어프램을 고려하지 않은 공압 제진대의 복소 강성 계수(complex stiffness)가 식 (1)과 같이 유도 된다⁽³⁾.

$$k^*(x_p, s) = k_s \frac{s + s_0(x_p, s)}{s + s_0(x_p, s)(N + 1)} \quad (1)$$

여기서 $k_s \equiv \frac{\kappa P_0 A_p^2}{V_{10}}$, $s_0(x_p, s) = \frac{\kappa R T_0}{V_{b0} C(x_p, s)}$, $N \equiv \frac{V_{b0}}{V_{10}}$,

$C(x_p, s) = \left(\frac{L_c}{D_c} f(x_p, s) + K \right) \frac{4u_{\max}(x_p, s)}{3\pi A_c}$ 이다.

k_s 는 단일 챔버형 공압 제진대 강성 계수, $C(x_p, s)$ 는 모세관내 공기 유동에 의한 감쇠를 나타내는 항, N 은 상·하단 챔버 부피비, A_c , L_c , D_c 는 모세관의 넓이, 길이 지름을 나타낸다.

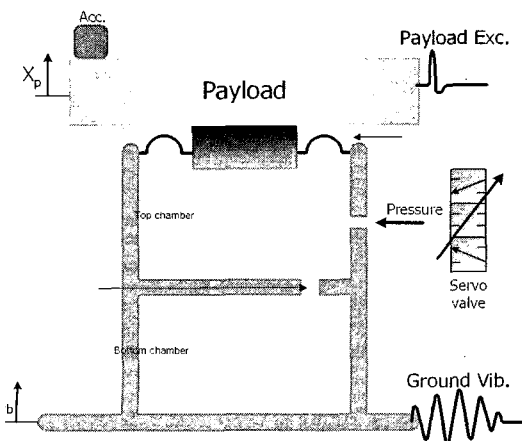


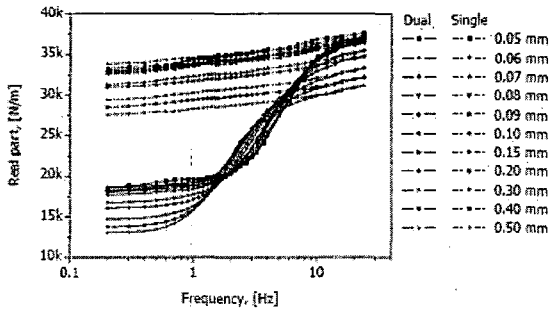
Fig. 1 Dual chamber pneumatic spring

Table 1에 기호 및 실제 실험에 쓰인 값을 도시하였다.

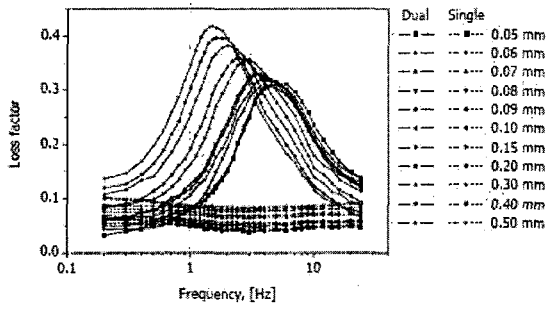
Fig. 2⁽³⁾는 공압 제진대의 복소 강성을 실험을 통하여 측정한 것이다. (a)는 주파수 영역에서 측정된 복소 강성 계수의 실수값(real part)을 도시하였으며, (b)는 주파수 영역에서 측정된 복소 강성 계수의 손실계수(loss factor)를 도시하였다. 식 (1) 및

Table 1 Design specifications of employed pneumatic spring for simulations

Symbol	Name	Value
ρ	Density	5.97 [kg/m ³]
μ	Dynamic viscosity	1.79×10 ⁻⁵ [Ns/m ²]
R	Gas constant	286.9 [J/(kgK)]
κ	Specific heat ratio	1.4
T_0	Temperature	288.1 [K]
P	Supplied pressure	3.51×10 ⁵ [Pa]
V_{t0}	Top chamber volume	2.978×10 ⁻⁴ [m ³]
V_{b0}	Bottom chamber volume	
A_p	Effective piston area	2.518×10 ⁻³ [m ²]



(a) Real part



(b) Loss factor

Fig. 2 Measured complex stiffness of pneumatic isolator

Fig. 2의 관찰을 통하여 공압 제진대의 복소 강성이 주파수 의존성 및 진폭 의존성을 나타냄을 관찰할 수 있다. 그러나 피스톤의 진폭이 매우 작다는 가정 하에서 공압 제진대 모형⁽¹⁾이 식 (2)와 같이 선형화된다.

$$k^*(s) = k_s \frac{s + s_0}{s + s_0(N+1)} \quad (2)$$

여기서 $C_v = \frac{128\mu L_c}{\pi \rho D_c^4}$, $s_0 = \frac{\kappa RT_0}{V_0 C_v}$ 이다.

이 연구에서는 다른 제어 기법에 비해 대상 계의 정보를 적게 필요로 하는 시간 지연 제어 기법을 공압 제진대에 적용하므로, 공압 제진대의 복소 강성 모형으로 선형화된 식 (2)를 사용한다.

3. 시간지연 제어법칙

식 (2)에서 언급한 공압 제진대의 복소 강성은 진폭 의존성 및 다이어프램의 복소 강성을 고려하지 않은 모형이며, 지반 진동은 대부분 50 Hz 이하 주파수 성분을 가지고 있고 공압 제진대의 고유 진동수도 1~10 Hz의 저주파수 영역에 위치하므로 관심 주파수 구간은 저주파수 구간이 된다. 그러므로 계의 정보를 적게 필요로 하며 저주파수 영역에서 적용 가능한 능동 제어 기법을 공압 제진대에 적용해야 할 것이다.

시간 지연 제어 기법은 계에 대한 적은 정보만으로도 제어 이론의 적용이 가능하며, 비선형성을 가지는 계 및 느린 응답을 요구하는 계에 대해서 탁월한 제어 성능을 보이므로, 시간 지연 제어 기법을 지반 진동의 절연을 위하여 공압 제진대에 적용하는 것은 적절하다.

시간 지연 제어 법칙⁽⁴⁾을 요약하면 다음과 같다. 모든 상태 변수와 상태 변수의 미분치가 측정 가능하다고 가정하고 식 (3)의 비선형 동역학 모형을 고려한다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, t) + B(x, t)u + d(t) \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (3)$$

여기에서 x 는 $(n \times 1)$ 상태 벡터, u 는 $(r \times 1)$ 입력 벡터, y 는 $(m \times 1)$ 출력 벡터, $f(x, t)$ 는 $(n \times 1)$ 비

선형성을 보이는 계의 동역학적 거동, $d(t)$ 는 $(n \times 1)$ 외란(disturbance), $B(x,t)$ 는 대략적인 범위를 알고 있는 $(n \times r)$ 제어 영향 행렬, C 는 알려진(known) $(m \times n)$ 출력 영향 행렬이다. 식 (3)은 일반적인 비선형 계를 표현할 수 있는 식이다. 이 식에서 불확실성을 지닌 항들을 모으고, 정확한 정보를 알고 있는 항들과 분리해서 표현하면 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \hat{f}(x,t) + \hat{B}u \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 \hat{B} 는 정확한 정보를 알고 있는 $(n \times n)$ 상수 항이고, $\hat{f}(x,t)$ 는 불확실성을 나타내는 항들을 모은 $(n \times 1)$ 비선형 시변(time variant) 벡터로, 식 (3)을 이용하여 표현하면 식 (5)와 같다.

$$\hat{f}(x,t) = f(x,t) + (B(x,t) - \hat{B})u + d(t) \quad (5)$$

시간 지연 제어 법칙을 공압 제진대에 적용 할 때 계의 정보를 상대적으로 적게 필요로 하는 이유는, 기준 모형을 선정하고 계가 기준 모형의 동역학을 추종하도록 제어하기 때문이다. 그러므로 원하는 제어 성능을 갖는 기준 모형은 식 (6)의 선형 시불변 모형으로 정의 할 수 있다.

$$\dot{x}_m = A_m x_m + B_m r \quad (6)$$

여기서 x_m 은 $(n \times 1)$ 행렬의 기준 모형 상태 벡터, A_m 은 $(n \times n)$ 안정한 상수 시스템 행렬, B_m 은 $(n \times r)$ 상수 명령 분포 행렬, r 은 $(r \times 1)$ 제어 명령 행렬이다. 능동 제어를 통해 식 (4)의 계가 식 (6)의 기준 모형을 추종해야 하므로, 계의 기준 모형 추종성을 관찰하기 위해 기준 모형과 계 상태 벡터와의 차를 오차 $e = x_m - x$ 로 정의하면 식 (7)의 오차 동역학을 유도 할 수 있다.

$$\dot{e} = A_m e + [-\hat{f}(x,t) + A_m x + B_m r - \hat{B}u] \quad (7)$$

만약 제어 입력 u 를 식 (8)을 만족하도록 정하면 오차 동역학은 식 (9)와 같다

$$-\hat{f}(x,t) + A_m x + B_m r - \hat{B}u = Ke \quad (8)$$

$$\dot{e} = (A_m + K)e \quad (9)$$

여기서 K 는 피드백 상수(feedback constant)로서 계의 기준 모형 추종 성능을 결정한다. 식 (8)을 u 에 대해 정리하면 식 (10)과 같이 유도된다.

$$u = \hat{B}^* [-\hat{f}(x,t) + A_m x + B_m r - Ke] \quad (10)$$

여기서 \hat{B}^* 는 \hat{B} 의 의사 역행렬(pseudo inverse)이다. 식 (10)의 제어 입력을 보면 불확실성을 나타내고 있는 항인 $\hat{f}(x,t)$ 를 제외하고는 이미 알고 있거나 정의할 수 있는 항이다. 그러므로 $\hat{f}(x,t)$ 을 알 수 있다면 제어 입력 u 를 결정 할 수 있다. $\hat{f}(x,t)$ 가 연속 함수라는 것에 착안하면 시간 지연 L 이 작은 경우 $\hat{f}(x,t)$ 와 $\hat{f}(x,t-L)$ 은 유사한 값을 갖는다. 그러므로 $\hat{f}(x,t)$ 를 식 (11)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{f}(x,t) &= \dot{x} - \hat{B}u \\ &\cong \dot{x}(t-L) - \hat{B}u(t-L) \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 시간 지연 L 은 이산 제어 구현 시 샘플링 주기(sampling time)에 해당한다. 식 (11)을 식 (10)에 대입하면 시간 지연을 이용한 최종적인 제어 법칙이 식 (12)와 같이 만들어진다.

$$u = \hat{B}^* [-\dot{x}(t-L) + \hat{B}u(t-L) + A_m x + B_m r - Ke] \quad (12)$$

식 (12)와 같이 제어입력 u 는 상태 변수 x 와 상태 변수의 미분값 \dot{x} 을 알아야 한다. 그러므로 앞에서 언급하였듯이 시간 지연 제어 법칙을 적용하기 위해서는 각 상태 변수 정보와 각 상태 변수의 미분 정보를 알아야 한다.

4. 제어 입력을 포함한 공압 제진대의 상태 방정식 및 모사 실험 결과

4.1 제어 입력을 포함한 공압 제진대의 상태 방정식

공압 제진대 복소 강성의 주파수 의존성 및 진폭 의존성과 같은 비선형성을 고려하여, 계가 비선형성 및 불확실성을 갖고 있는 경우에는 강인한 제어 성능을 보이는 시간 지연 제어 기법을 공압 제진대에 적용한다. 비선형 제어 기법인 시간 지연 제어 기법

의 적용을 통해 공압 제진대 복소 강성의 비선형성은 무시할 수 있으므로, 선형화된 복소 강성 모형인 식 (2)를 사용한다.

Fig. 1은 공압 제진대의 동적 거동을 나타내며, 이를 바탕으로 뉴턴의 제 2법칙을 적용하면 식 (13)을 유도 할 수 있다.

$$m\ddot{x} + k'(x_p, \omega) \otimes (x - x_b) = A_p P_c + F \quad (13)$$

여기서 \otimes 는 합성곱(convolution integral)을 의미하고 $k'(x_p, \omega)$ 는 다이어프램의 복소 강성을 제외한 공압 제진대의 복소 강성을 의미하며, 이는 주파수와 진폭 의존성을 보인다. P_c 는 서보 밸브를 사용하여 제어되는 압력이며, F 는 장비 구동 중 피스톤 위에서 발생하는 진동이다. 공압 제진대 복소 강성을 나타내는 식 (2)를 식 (13)에 적용한 후 라플라스역에서 나타내면 식 (14)와 같다.

$$[ms^3 + ms_0(N+1)s^2 + k_p s + k_s s_0]X(s) = k_s(s + s_0)X_b(s) + [s + s_0(N+1)]A_p P_c + [s + s_0(N+1)]F \quad (14)$$

식 (14)에서 우변의 첫째 항은 지반 가진, 두 번째 항은 제어입력(control input)이며, 세 번째 항은 장비 구동 중 피스톤 위에 발생하는 진동이다. 식 (14)를 상태방정식으로 변환하면 식 (15)가 유도된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_p s_0}{m} & -\frac{k_s}{m} & -s_0(N+1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{A_p}{m} \end{bmatrix} [s_0(N+1)P_c + \dot{P}_c] + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{k_s}{m} \end{bmatrix} [s_0 x_b + \dot{x}_b] + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} [s_0(N+1)F + \dot{F}] \quad (15)$$

앞에서 언급한 바와 같이 오른쪽의 두 번째 항은 제어 입력, 세 번째 항은 지반에서 전달되는 진동, 네 번째 항은 장비 구동 중 피스톤 위에서 발생하는

진동이며 능동 제어 시 지반에서 전달되는 진동과 피스톤 위에서 발생하는 진동은 외란으로 간주한다. 식 (15)와 식 (3)을 비교하면, 제어 입력과 지반 진동 및 장비 구동 중 발생하는 진동은 식 (16), (17), (18)과 같이 유도된다.

$$u(t) = s_0(N+1)P_c(t) + \dot{P}_c(t) \quad (16)$$

$$d_b(t) = s_0 x_b(t) + \dot{x}_b(t) \quad (17)$$

$$d_p(t) = s_0(N+1)F(t) + \dot{F}(t) \quad (18)$$

식 (16)에서 제어 입력으로 들어가는 압력을 계산하기 위해 라플라스 변환을 수행하면 식 (19)가 유도 되고, 식 (19)를 라플라스 역변환하면 시간 영역에서의 압력 변화 식이 유도 된다.

$$P_c(s) = \frac{U(s)}{s + s_0(N+1)} \quad (19)$$

$$P_c(t) = L^{-1} \left[\frac{U(s)}{s + s_0(N+1)} \right] \quad (20)$$

4.2 모사 실험

Fig. 3은 제어 입력이 포함된 상태 방정식 (15)를 이용하여, 샘플링 주기는 0.01초로 두고, $\hat{f}(x, t)$ 값을 구하기 위하여 시간 지연(L)을 바꿔가며 피스톤 위의 진동을 도시한 것이며, Fig. 4는 이때의 전달률을 도시한 것이다. 실제 지반 진동을 구현하기 위하여 지반 진동으로 RMS값을 기준으로 20 μ m, 0~50 Hz 주파수 영역의 랜덤 신호를 사용하였으며, 기준 모형은 전달률을 낮추기 위하여 0.5 Hz의 고유 진동수와 임계 감쇠를 갖는 모형으로 선정하였다. 고유 진동수를 낮출수록 진동 절연 성능은 향상되나, 추후 실험에 사용할 가속도계가 0.5 Hz 이하의 주파수 영역은 측정이 불가능하여 실험과의 비교·분석을 위하여 기준 모형의 고유 진동수를 0.5 Hz로 선정하였다. 피스톤 위의 진동은 RMS값을 기준으로 시간 지연(L)이 0.1일 때는 4.34 μ m, 0.05일 때는 2.78 μ m, 0.01일 때는 0.8 μ m였다. 시간 지연이 작을수록 피스톤 위의 진동이 적어짐을 관찰 할 수 있었다. 그러나 시간 지연이 0.1일 때도 수동형 공압 제진대에 비교하면 피스톤의 진동이 줄어들음을 관찰 할 수 있었다. 전달률도 Fig. 4와 같이 시간 지연

이 작을수록 감소하는 것을 관찰 할 수 있다. 식 (11)에서 $\hat{f}(x,t)$ 가 연속함수이기 때문에 한 샘플링 주기 이전의 값인 $\hat{f}(x,t-L)$ 을 이용하여 $\hat{f}(x,t)$ 를 유추한다. 시간 지연이 가능한 작을 때 $\hat{f}(x,t)$ 와 $\hat{f}(x,t-L)$

의 오차가 감소하게 되므로 정확한 제어 입력이 들어가고 제어 성능은 향상된다. 모사 실험에서 시간 지연의 조정은 능동 제어 계의 구성 시 구성 요소들의 응답 속도 조정과 같은 의미로 해석 할 수 있다. 제어 입력을 구현하는 서보 밸브의 성능과 관련시켜 논하면 시간 지연의 감소는 생산 단가의 증가로 해석 가능하며 적절한 지연 시간의 선정이 필요하다. 이 연구에서 관심을 가지는 지반 진동은 0~50 Hz의 저주파수 영역이며 나노미터급 장비에 대한 진동 허용수준⁽⁸⁾에 근거하여 시간 지연을 0.01초로 선정함이 적절하며, 이 때 상대적으로 작은 전달률을 보임을 Fig. 4를 통해 관찰 할 수 있다.

Fig. 5는 능동형 공압 제진대의 피스톤 위에서 발생하는, 즉 장비의 구동 중 발생하는 진동에 대한 제어 성능을 관찰하기 위하여, 피스톤 위에서 임펄스 충격이 발생하였을 때 그에 대한 응답을 관찰한 것이다. 수동형 공압 제진대는 감쇠비가 0.1정도이기

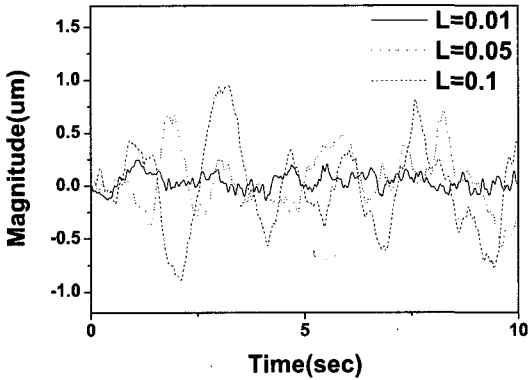


Fig. 3 Vibration on the piston

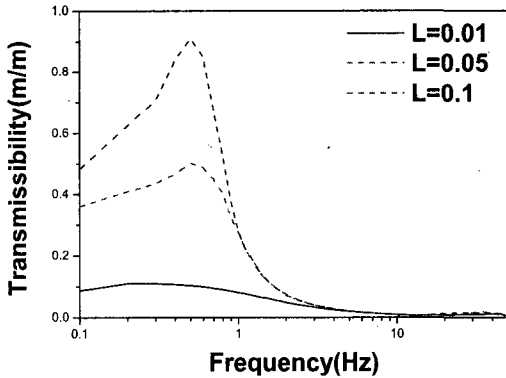


Fig. 4 Transmissibility of pneumatic isolator (variation : L)

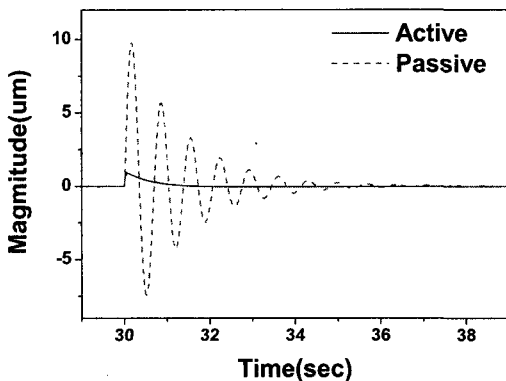
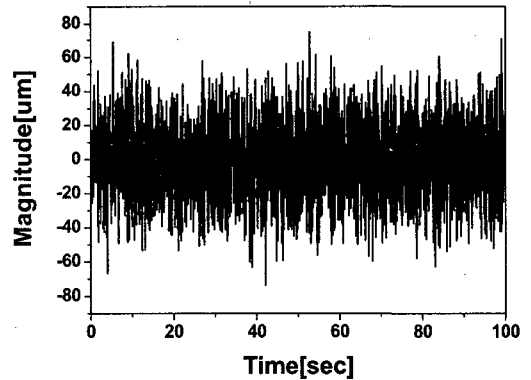
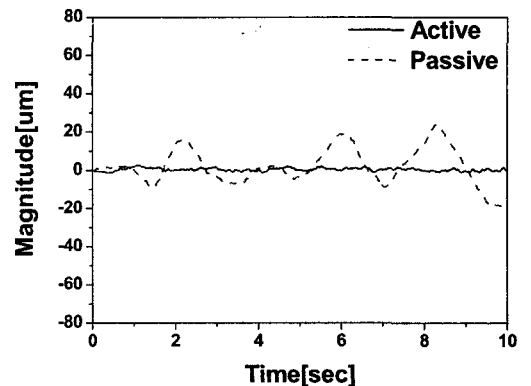


Fig. 5 Impulse response of pneumatic isolator



(a) Vibration on the ground



(b) Vibration on the piston

Fig. 6 Vibration of pneumatic isolator

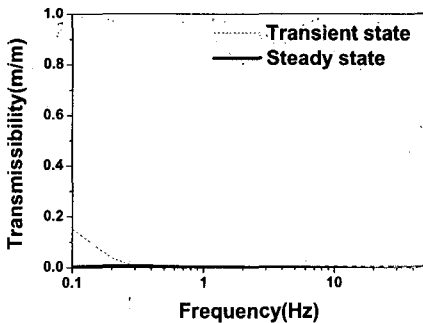
때문에 큰 진동이 피스톤 위에 발생하고 안정화 되는 시간도 길다. 그러나 능동형 공압 제진대는 기준 모형을 임계 감쇠를 갖는 모형으로 잡았기 때문에 진동이 상대적으로 적게 발생하고 안정화되는 시간도 짧은 것을 관찰 할 수 있다. 그러므로 계가 임계 감쇠를 갖는 기준 모형을 잘 추종함을 관찰 할 수 있으며 시간 지연 제어 기법을 공압 제진대에 적용 하였을 때, 지반 진동을 절연 할 수 있을 뿐만 아니라 장비의 구동 중 발생하는 피스톤 위의 진동도 줄이는 것이 가능함을 유추 할 수 있다. 이는 제어 입력이 기준 모형을 추종하며 장비 구동 중 발생하는 진동을 외란으로 간주하고 진동을 없애주도록 구성 되기 때문이다.

Fig. 6은 지반 진동과 피스톤 위의 진동을 시간 영역에서 도시한 것이다. RMS값을 기준으로 지반 진동이 20 μm 일 때, 수동형 공압 제진대 피스톤 위의 진동은 11.2 μm 이고, 능동형 공압 제진대 피스톤 위의 진동은 0.8 μm 이다. 능동형 공압 제진대 피스톤 위의 진동은 수동형 공압 제진대 피스톤 위의 진동을 기준으로 93% 작아짐을 관찰 할 수 있다. 모사 실험에서는 기준 모형을 임계 감쇠에 0.5 Hz의

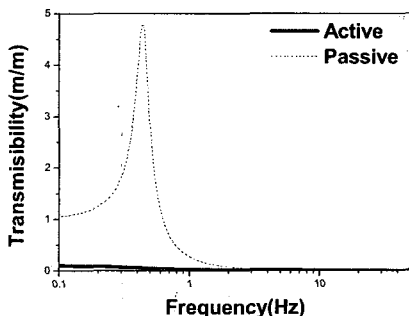
고유 진동수로 설정했기 때문에 정착 시간(settling time)이 약 10초 정도⁽⁹⁾이다. 기준 모형의 고유 진동수를 모사 실험에 사용한 0.5 Hz 보다 작게 잡는다면, 진동 절연 성능 향상은 기대 할 수 있지만 정착 시간은 증가한다. 이는 능동 제어 기법을 공압 제진대에 적용 할 때 단점이지만, 정착 시간 이전에도 피스톤 위의 진동은 수동형 공압 제진대 피스톤 위의 진동보다 작은 것을 관찰 할 수 있다. 일반적으로 과도한 오버슈트를 갖지 않고, 정착 시간도 길지 않도록 감쇠비를 0.4에서 0.8사이에서 선정하나⁽⁹⁾, 이 연구의 주 목적은 공압 제진대의 전달률을 낮추는 것이므로 기준 모형을 임계 감쇠를 갖는 모형으로 선정하였다.

Fig. 7(a)는 과도 상태인 0초에서 10초 사이의 데이터 값을 이용하여 계산된 전달률과 정상 상태인 91초에서 100초 사이의 데이터를 이용하여 계산된 전달률을 비교한 것이다. 10초와 90초 사이의 데이터를 가지고 전달률을 구하여도 정상 상태의 데이터이므로 91초에서 100초 사이의 전달률 값과 같게 나온다. 정상 상태가 되면 과도 상태일 때에 비해 전달률이 작아지는 것을 관찰 할 수 있으며, 과도 상태일 때에도 기준 모형을 추종하여 임계 감쇠를 보임을 관찰 할 수 있다.

Fig. 7(b)는 능동형 공압 제진대와 수동형 공압 제진대의 전달률을 비교하였다. 모사 실험에서 샘플링 주기는 0.01초로 정하고, 총 모사 실험 시간은 100초로 하였으며, 실제 지반 진동을 구현하기 위하여 지반 진동으로 0~50 Hz까지 랜덤 신호를 사용하였다. 그리고 정상 상태 구간에서 지반 진동과 피스톤 위 진동간의 전달률을 계산하였다. 모사 실험 결과를 통해, 능동 제어 기법을 공압 제진대에 적용할 때 수동형 공압 제진대보다 진동 절연 성능이 향상되는 것을 관찰 할 수 있다. 이상적인 경우 능동형 공압 제진대는 수동형 공압 제진대와 달리 고유 진동수 근처와 그 이하 주파수 영역에서도 지반 진동이 절연 되는데, 이는 앞에서 언급하였듯이 제어 입력이 기준 모형을 추종하며 지반 진동을 외란으로 간주하고 진동을 없애주도록 구성되기 때문이다.



(a) Transient & steady state



(b) Passive & active type

Fig. 7 Transmissibility of pneumatic isolator

5. 결 론

이 연구에서는 공압 제진대에 능동 제어 기법을

적용하여 진동 절연 성능을 향상 시키는 방법을 논의 하였다. 그리고 비선형 제어 기법으로, 외란에 강인하고 적용이 쉬운 시간 지연 제어 기법을 공압 제진대에 적용하였다.

수동형 공압 제진대는 고유 진동수 이하에서는 진동 절연 요소로서 역할을 하지 못하며, 고유 진동수 근처에서는 오히려 지반 진동을 증폭시키나, 능동형 공압 제진대는 고유 주파수 근처 및 이하의 주파수 영역도 절연이 가능함을 모사 실험 결과를 통해 관찰 할 수 있었다. 그리고 수동형 공압 제진대로 절연하기 힘든 피스톤 위에서 발생하는 진동에 대해서도 진동 절연 성능이 우수함을 관찰 할 수 있었다. 향후 실험을 통하여 능동형 공압 제진대의 전달률을 측정하고 모사 실험 결과와 비교·분석하여 타당성을 검증하고자 한다.

후 기

이 연구는 한국과학재단의 기초과학연구사업 R01-2006-000-10872-0 및 한국기계연구원의 나노메카트로닉스 기술개발 사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

(1) Erin, C. and Wilson, B., 1998, "An Improved Model of a Pneumatic Vibration Isolator :

Theory and Experiment", Journal of Sound and Vibration, Vol. 218, pp. 81~101.

(2) Shih, M. C. and Wang, T. Y., 2002, "Design and Adaptive Control of a Pneumatic Vibration Isolator", JSME, pp. 111~116.

(3) Lee, J. H. and Kim, K. J. 2005, "Complex Stiffness of Diaphragm in Pneumatic Springs for Vibration Isolation Tables", APVC 1, pp. 281~286.

(4) Youcef-Toumi, K. and Ito, O., 1990, "A Time Delay Controller for Systems with Unknown Dynamics", Journal of Dynamic System, Measurement and Control, 112, pp. 133~142.

(5) Chang, P. H. and Lee, J. W., 1994, "An Observer Design for Time-delay Control and Its Application to DC Servo Motor", Control Eng. Practice, 2, pp. 263~270.

(6) Debra, D. B. 1984, "Design of Laminar Flow Restrictors for Damping Pneumatic Vibration Isolators", CIRP Annals, Vol. 33, No. 1, pp. 351~356.

(7) Harris, C. M., 1967, "The Analysis and Design of Pneumatic Systems", New York: Wiley.

(8) Amick, H. and Gordon, C. G., 2002, "Facility Vibration Issues for Nanotechnology Research", Proceedings of the Symposium on Nano Device Technology.

(9) Kim, J. S., 2003, "Linear Control System Engineering", CMK, pp. 114~116.