이동 질량을 포함하는 능동형 공압제진대에 대한 시간지연제어기법의 적용 검토

Examination on Active Pneumatic Vibration Isolation Table with Moving Masses on It by Time Delay Control

신 윤 호† · 문 석 준* · 정 정 훈* · 김 병 현*

Yun-ho Shin, Seok-jun Moon, Jung-hoon Chung and Byung-hyun Kim

(2011년 6월 30일 접수 ; 2011년 7월 25일 심사완료)

Key Words : Active Pneumatic Vibration Isolation Table(능동형 공압제진대), Time Delay Control(시간지연제어), Moving Mass(이동질량), XY-stage(XY-스테이지), Settling Time(정착시간)

ABSTRACT

As applying an active control technique to a pneumatic vibration isolation system, the settling time for the payload excitation could be remarkably reduced as well as the improvement of isolation performance for the ground vibration. Some previous researches were dealt with the settling time through the simulation or experiment but, the discussion on the simulation or experimental results including moving parts, such as a XY-stage, on the isolation table rarely exists. As considering the moving part, the dynamic model could be time varying system and in such a case the force imposed on pneumatic vibration isolation table could be described by inertial forces of moving parts according to Newton's 3rd law, the action and reaction law. In this paper, the simulation procedure of the 3-DOF active pneumatic vibration isolation system including moving parts by TDC(time delay control) technique is proposed and the effectiveness through simulation results are also shown.

W, D, H : 공압제진대 상부 판의 너비/길이/높이

기 호 설 명

A_p : 공기스프링 피스톤의 유효면적

$c_{v,h}$: 수직(z)/수평(x,y) 방향 공기 스프링 점성감쇠

$k_{v,h}$: 수직(z)/수평(x,y) 방향 공기 스프링 강성계수

M : 공압제진대 상부 판과 이송장비의 고정부
질량의 합

$m_{1,2}$: 이동부 질량

p_{ci}, F_{ly} : 제어 압력, 제어 힘

$q_{1,2}$: 이동 질량의 궤적 상태 정보

1. 서 론

반도체 산업의 발전과 함께 나노·멤스 공정용 장비의 설치 환경에 요구되는 진동 환경 조건이 엄격해지고 있다^(1,2). 정밀 장비의 환경 진동 수준을 만족시키기 위한 방편으로 공압제진대가 빈번하게 사용되고 있으며, 이중챔버, 오일 등을 활용한 수동형 공압제진대의 성능 개선책에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다^(3,4). 그러나 수동형 공압제진대는 고유진동수 부근을 기준으로 그 이하의 주파수영역에 대한 성능개선을 기대하기 어렵고, 상부 가진에 대한 정착시간 증가의 문제를 야기한다.

수동형 공압제진대의 한계를 극복하고자 압전형

† 교신저자; 정회원, 한국기계연구원 시스템다이내믹스실
E-mail : shinyh77@kimm.re.kr

Tel : (042)868-7211, Fax : (042)868-7418

* 정회원, 한국기계연구원 시스템다이내믹스실

구동부⁽⁵⁾, 공압 구동부⁽⁶⁾, 전자기식 구동부⁽⁷⁾ 등의 추가 구동력을 활용하여 능동제어이론을 적용한 공압제진대 개발·적용에 대한 연구가 진행되고 있으며, 비선형 제어기법에 대한 적용 방법에 대해서도 연구되고 있다^(8,9). 그러나 이와 관련하여 검사용 스테이지 등과 같은 실제 정밀 장비가 설치된 상태에서의 성능 검토에 대한 연구가 미미한 실정이다. 이 연구에서는 XY-스테이지와 같은 이동하는 질량을 포함하는 공압제진대 계에 대한 능동제어이론 적용의 효과를 검토하기 위한 절차를 제안하고자 하며, 이를 이용하여 비선형 강인성제어기법 중 하나인 시간지연제어기법의 적용 효과를 검토하고자 한다.

2. 이동 질량을 포함하는 공압제진대

2.1 수학적 모형화의 단순화를 위한 가정

이 연구에서는 검사용 스테이지와 같은 이동 장비를 단순화하여 표현한 이동 질량 및 제어 입력을 포함하는 공압제진대 계를 대상으로 하며, 이에 대한 세부적인 구성은 Fig. 1과 같다.

공압제진대 계의 무게 중심에서의 6-자유도 강체 거동에 대한 수학적 모형을 유도하고자 실험을 통해 산출한 수평 및 수직 방향 강성 및 감쇠 정보를 활용하였으며, 2개의 이동 질량 및 공압제진대의 유효하중은 강체로 가정하였다. 능동제어이론은 비선형 강인성 제어기(non-linear robust controller)로 알려진 시간지연제어기법(time delay control)⁽¹⁰⁾을 적용하였으며, 3-자유도(z-병진, x&y-회전) 제어를 수행하고 이에 대해 검토하였다.

대상 계의 운동방정식을 유도하고, 이를 단순화하기 위한 가정은 다음과 같다.

- 공압제진대는 4곳의 모서리에서 공기스프링을 이용하여 유효하중을 지지하는 구조로 이루어지며, 이송 장비는 각각 x-, y-방향만으로 움직이는 2개의 강체로 가정함(Fig. 1 참조).

- 공압제진대의 유효하중은 이송장비의 고정부와 이를 고정하는 직육면체 판의 합으로 정의하며, 이를 하나의 등가 강체로 가정함.

- 이동 질량의 궤적은 미리 정해진 변위, 속도, 가속도 정보를 이용하여 생성되며, 공압제진대 상부 유효하중과 이동 질량 사이의 작용력에 의해 가진력이 결정됨.

Fig. 1 Schematic description of whole system

Fig. 2 Inertia frame A and frame B fixed on isolation table

- 회전 거동은 크지 않으며($< 3^\circ$), 선형화가 가능함: $\cos\theta \sim 1$, $\sin\theta \sim \theta$.

- 공기 스프링의 회전 강성은 무시하며, 각 병진 방향 강성간의 간섭은 없음.

- 제어력은 하나의 병진, 두개의 회전 방향 제어를 위해 각 공기 스프링의 설치 지점에서 z방향으로 작용함(Fig. 1 참조),

이동 질량의 거동을 모사하기 위한 제진대의 유효하중과 함께 움직이는 좌표계와 고정 좌표계 사이의 변환 행렬은 식 (1)과 같다(Fig. 2 참조).

$$\begin{Bmatrix} i' \\ j' \\ k' \end{Bmatrix} = C \begin{Bmatrix} i \\ j \\ k \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \theta_z & -\theta_y \\ -\theta_z & 1 & \theta_x \\ \theta_y & -\theta_x & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} i \\ j \\ k \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서 i' , j' , k' 은 이동하는 좌표 계의 단위 방향 벡터를 의미한다.

2.2 이동 질량 및 제어 입력항을 포함하는 공압제진대 계에 대한 수학적 모형화

Fig. 3에 나타낸 바와 같이 이동하는 질량 항을

Fig. 3 Definition of parameters and vectors for derivation of EOM, (a) schematic description of whole system, (b) distance from mass center to each air-spring in x, y-direction, (c) displacement vectors, (d) distance from mass center to each air-spring in z-direction and to each moving mass

포함하는 공압제진대 계의 수학적 모형 유도를 위해 각 이동 질량 항의 위치 벡터를 고정 좌표계를 이용하여 식 (2)와 같이 나타내고, 각각에 대한 속도 항과 가속도 항을 유도하면, 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_1(t) &= \mathbf{G}(t) + \mathbf{d}_1(t) \\ &= \{X(t)\mathbf{i} + Y(t)\mathbf{j} + Z(t)\mathbf{k}\} + \{q_1(t)\mathbf{i}' + b_1\mathbf{j}' + h_1\mathbf{k}'\} \\ \mathbf{r}_2(t) &= \mathbf{G}(t) + \mathbf{d}_2(t) = \{X(t)\mathbf{i} + Y(t)\mathbf{j} + Z(t)\mathbf{k}\} \\ &\quad + \{q_1(t)\mathbf{i}' + (b_1 + q_2(t))\mathbf{j}' + (h_1 + h_2)\mathbf{k}'\} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{r}}_1 &= \frac{{}^A d \mathbf{r}_1}{dt} = \frac{{}^A d \mathbf{G}}{dt} + \frac{{}^B d \mathbf{d}_1}{dt} + {}^A \boldsymbol{\omega}^B \times \mathbf{d}_1 \\ \dot{\mathbf{r}}_2 &= \frac{{}^A d \mathbf{r}_2}{dt} = \frac{{}^A d \mathbf{G}}{dt} + \frac{{}^B d \mathbf{d}_2}{dt} + {}^A \boldsymbol{\omega}^B \times \mathbf{d}_2 \\ \ddot{\mathbf{r}}_1 &= \frac{{}^A d^2 \mathbf{r}_1}{dt^2} = \frac{{}^A d^2 \mathbf{G}}{dt^2} + \frac{{}^B d^2 \mathbf{d}_1}{dt^2} + 2 \cdot {}^A \boldsymbol{\omega}^B \times \frac{{}^B d \mathbf{d}_1}{dt} \\ &\quad + {}^A \boldsymbol{\alpha}^B \times \mathbf{d}_1 + {}^A \boldsymbol{\omega}^B \times ({}^A \boldsymbol{\omega}^B \times \mathbf{d}_1) \\ \ddot{\mathbf{r}}_2 &= \frac{{}^A d^2 \mathbf{r}_2}{dt^2} = \frac{{}^A d^2 \mathbf{G}}{dt^2} + \frac{{}^B d^2 \mathbf{d}_2}{dt^2} + 2 \cdot {}^A \boldsymbol{\omega}^B \times \frac{{}^B d \mathbf{d}_2}{dt} \\ &\quad + {}^A \boldsymbol{\alpha}^B \times \mathbf{d}_2 + {}^A \boldsymbol{\omega}^B \times ({}^A \boldsymbol{\omega}^B \times \mathbf{d}_2) \end{aligned} \quad (3)$$

각 이동 질량의 가속도 항과 관성 정보를 활용하여 6-방향에 대한 공압제진대 계의 운동방정식을 유도하면, 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} M\ddot{x} &= \sum F_x = -\sum_{i=1}^4 c_{ix} \Delta \dot{s}_{ix} - \sum_{i=1}^4 k_{ix} \Delta s_{ix} - m_1 \ddot{r}_{1x} - m_2 \ddot{r}_{2x} \\ M\ddot{y} &= \sum F_y = -\sum_{i=1}^4 c_{iy} \Delta \dot{s}_{iy} - \sum_{i=1}^4 k_{iy} \Delta s_{iy} - m_1 \ddot{r}_{1y} - m_2 \ddot{r}_{2y} \\ M\ddot{z} &= \sum F_z = -\sum_{i=1}^4 c_{iz} \Delta \dot{s}_{iz} - \sum_{i=1}^4 k_{iz} \Delta s_{iz} \\ &\quad - m_1 (\ddot{r}_{1z}) - m_2 (\ddot{r}_{2z}) + F_c \\ I_x \ddot{\theta}_x &= \sum M_x = -\sum_{i=1}^4 c_{iz} u_{iy} \Delta \dot{s}_{iz} + \sum_{i=1}^4 c_{iy} u_{iz} \Delta \dot{s}_{iy} \\ &\quad - \sum_{i=1}^4 k_{iz} u_{iy} \Delta s_{iz} + \sum_{i=1}^4 k_{iy} u_{iz} \Delta s_{iy} \\ &\quad - m_1 d_{1y} (\ddot{r}_{1z}) - m_2 d_{2y} (\ddot{r}_{2z}) + m_1 d_{1z} \ddot{r}_{1y} \\ &\quad + m_2 d_{2z} \ddot{r}_{2y} - I_{1x} \ddot{\theta}_x - I_{2x} \ddot{\theta}_x + M_{cx} \\ I_y \ddot{\theta}_y &= \sum M_y = \sum_{i=1}^4 c_{iz} u_{ix} \Delta \dot{s}_{iz} - \sum_{i=1}^4 c_{ix} u_{iz} \Delta \dot{s}_{ix} \\ &\quad + \sum_{i=1}^4 k_{iz} u_{ix} \Delta s_{iz} - \sum_{i=1}^4 k_{ix} u_{iz} \Delta s_{ix} \\ &\quad + m_1 d_{1x} (\ddot{r}_{1z}) + m_2 d_{2x} (\ddot{r}_{2z}) - m_1 d_{1z} \ddot{r}_{1x} \\ &\quad - m_2 d_{2z} \ddot{r}_{2x} - I_{1y} \ddot{\theta}_y - I_{2y} \ddot{\theta}_y + M_{cy} \\ I_z \ddot{\theta}_z &= \sum M_z = \sum_{i=1}^4 c_{ix} u_{iy} \Delta \dot{s}_{ix} - \sum_{i=1}^4 c_{iy} u_{ix} \Delta \dot{s}_{iy} \\ &\quad + \sum_{i=1}^4 k_{ix} u_{iy} \Delta s_{ix} - \sum_{i=1}^4 k_{iy} u_{ix} \Delta s_{iy} \\ &\quad + m_1 d_{1y} \ddot{r}_{1x} + m_2 d_{2y} \ddot{r}_{2x} - m_1 d_{1x} \ddot{r}_{1y} \\ &\quad - m_2 d_{2x} \ddot{r}_{2y} - I_{1z} \ddot{\theta}_z - I_{2z} \ddot{\theta}_z \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 미소 변형 항들 사이의 고차항을 무시하고

1차 항들만을 이용하여 정리하면, 식 (5)와 같다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{F} + \mathbf{HP}_c \quad (5)$$

$$\mathbf{x} = [\theta_x \quad \theta_y \quad \theta_z \quad x \quad y \quad z]^T$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{15} & M_{16} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} & M_{25} & M_{26} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} & M_{35} & M_{36} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} & M_{45} & M_{46} \\ M_{51} & M_{52} & M_{53} & M_{54} & M_{55} & M_{56} \\ M_{61} & M_{62} & M_{63} & M_{64} & M_{65} & M_{66} \end{bmatrix}$$

$$M_{11} = I_x + I_{1x} + I_{2x} + m_1 h_1^2 + m_2 [q_2^2 + (h_1 + h_2)^2]$$

$$M_{12} = -m_2 q_1 q_2, \quad M_{13} = -q_1 \{m_1 h_1 + m_2 (h_1 + h_2)\}$$

$$M_{14} = 0, \quad M_{15} = -m_1 h_1 - m_2 (h_1 + h_2)$$

$$M_{16} = m_2 q_2, \quad M_{21} = -m_2 q_1 q_2$$

$$M_{22} = I_y + I_{1y} + I_{2y} + m_1 (q_1^2 + h_1^2) + m_2 [q_1^2 + (h_1 + h_2)^2]$$

$$M_{23} = -m_2 (h_1 + h_2) q_2, \quad M_{24} = m_1 h_1 + m_2 (h_1 + h_2)$$

$$M_{25} = 0, \quad M_{26} = -q_1 (m_1 + m_2),$$

$$M_{31} = -q_1 \{m_1 h_1 + m_2 (h_1 + h_2)\}$$

$$M_{32} = -m_2 (h_1 + h_2) q_2,$$

$$M_{33} = I_z + I_{1z} + I_{2z} + m_1 q_1^2 + m_2 [q_1^2 + q_2^2]$$

$$M_{34} = -m_2 q_2, \quad M_{35} = q_1 (m_1 + m_2), \quad M_{36} = 0$$

$$M_{41} = 0, \quad M_{42} = m_1 h_1 + m_2 (h_1 + h_2),$$

$$M_{43} = -m_2 q_2$$

$$M_{44} = M + m_1 + m_2, \quad M_{45} = 0, \quad M_{46} = 0$$

$$M_{51} = -m_1 h_1 - m_2 (h_1 + h_2), \quad M_{52} = 0$$

$$M_{53} = q_1 (m_1 + m_2), \quad M_{54} = 0,$$

$$M_{55} = M + m_1 + m_2$$

$$M_{56} = 0, \quad M_{61} = m_2 q_2,$$

$$M_{62} = -q_1 (m_1 + m_2)$$

$$M_{63} = 0, \quad M_{64} = 0, \quad M_{65} = 0$$

$$M_{66} = M + m_1 + m_2$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix}$$

$$C_{11} = 4W^2 c_v + 4h_s^2 c_h + 2m_2 q_2 \dot{q}_2,$$

$$C_{12} = -2m_2 q_2 \dot{q}_1,$$

$$C_{13} = -2\dot{q}_1 [m_1 h_1 + m_2 (h_1 + h_2)], \quad C_{14} = 0,$$

$$C_{15} = 4h_s c_h, \quad C_{16} = 0, \quad C_{21} = -2m_2 q_1 \dot{q}_2,$$

$$C_{22} = 4L^2 c_v + 4h_s^2 c_h + 2q_1 \dot{q}_1 (m_1 + m_2),$$

$$C_{23} = -2m_2 (h_1 + h_2) \dot{q}_2, \quad C_{24} = -4h_s c_h$$

$$C_{25} = 0, \quad C_{26} = 0, \quad C_{31} = 0, \quad C_{32} = 0$$

$$C_{33} = 4c_h (W^2 + L^2) + 2m_2 q_2 \dot{q}_2$$

$$+ 2m_1 \dot{q}_1 + 2m_2 q_1 \dot{q}_1$$

$$C_{34} = 0, \quad C_{35} = 0, \quad C_{36} = 0, \quad C_{41} = 0$$

$$C_{42} = -4h_s c_h, \quad C_{43} = -2m_2 \dot{q}_2, \quad C_{44} = 4c_h$$

$$C_{45} = 0, \quad C_{46} = 0, \quad C_{51} = 4h_s c_h$$

$$C_{52} = 0, \quad C_{53} = 2\dot{q}_1 (m_1 + m_2), \quad C_{54} = 0$$

$$C_{55} = 4c_h, \quad C_{56} = 0, \quad C_{61} = 2m_2 \dot{q}_2$$

$$C_{62} = -2\dot{q}_1 (m_1 + m_2), \quad C_{63} = 0$$

$$C_{64} = 0, \quad C_{65} = 0, \quad C_{66} = 4c_v$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} & K_{15} & K_{16} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} & K_{25} & K_{26} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} & K_{35} & K_{36} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} & K_{45} & K_{46} \\ K_{51} & K_{52} & K_{53} & K_{54} & K_{55} & K_{56} \\ K_{61} & K_{62} & K_{63} & K_{64} & K_{65} & K_{66} \end{bmatrix}$$

$$K_{11} = 4W^2 k_v + 4h_s^2 k_h + m_2 q_2 \ddot{q}_2,$$

$$K_{12} = -m_2 q_2 \ddot{q}_2,$$

$$K_{13} = -\dot{q}_1 [m_1 h_1 + m_2 (h_1 + h_2)],$$

$$K_{14} = 0, \quad K_{15} = 4h_s k_h,$$

$$K_{16} = 0, \quad K_{21} = -m_2 q_1 \ddot{q}_2,$$

$$K_{22} = 4L^2 k_v + 4h_s^2 k_h + q_1 \dot{q}_1 (m_1 + m_2)$$

$$K_{23} = -m_2 \ddot{q}_2 (h_1 + h_2), \quad K_{24} = -4h_s k_h,$$

$$K_{25} = 0, \quad K_{26} = 0, \quad K_{31} = 0, \quad K_{32} = 0,$$

$$K_{33} = 4k_h (W^2 + L^2) + m_2 q_2 \ddot{q}_2$$

$$+ q_1 \dot{q}_1 (m_1 + m_2),$$

$$K_{34} = 0, \quad K_{35} = 0, \quad K_{36} = 0, \quad K_{41} = 0,$$

$$K_{42} = -4h_s k_h, \quad K_{43} = -m_2 \ddot{q}_2, \quad K_{44} = 4k_h,$$

$$K_{45} = 0, \quad K_{46} = 0, \quad K_{51} = 4h_s k_h, \quad K_{52} = 0,$$

$$K_{53} = \dot{q}_1 (m_1 + m_2), \quad K_{54} = 0, \quad K_{55} = 4k_h,$$

$$K_{56} = 0, \quad K_{61} = m_2 \ddot{q}_2,$$

$$K_{62} = -\dot{q}_1 (m_1 + m_2),$$

$$K_{63} = 0, \quad K_{64} = 0,$$

$$K_{65} = 0, \quad K_{66} = 4k_v$$

식 (5)는 공압제진대의 6-자유도 거동을 나타내며, 대상 이동 질량의 궤적 정보에 따라 각 관성, 감쇠, 강성 향이 변하는 선형 시변 계(linear time varying system)로 정리된다. 여기서 F 는 공압제진대의 거동과 연성되지 않은 이동질량에 거동에 의해서 발

생되는 작용력을 외력으로 간주하여 정의한 것이며, 이는 식 (6)과 같다. 유도된 수동형 제진대 계에 대한 운동방정식의 검토는 선행 연구⁽¹¹⁾를 통해 이루어졌으므로 이 연구에서는 생략한다.

$$F = \begin{Bmatrix} m_2(h_1+h_2)\ddot{q}_2 \\ -\ddot{q}_1[m_1h_1+m_2(h_1+h_2)] \\ m_2(q_2-q_1)\ddot{q}_2 \\ -\ddot{q}_1(m_1+m_2) \\ -m_2\ddot{q}_2 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

이 연구에서 검토한 제어 방식은 서보 밸브를 이용한 공압 제어 방식으로, P_c 벡터는 서보 밸브를 이용한 공기스프링 내의 동적 압력을 의미하며, H 는 공압제진대 각 방향 입력 힘의 향으로 나타내기 위한 변환행렬이다. 식 (7)은 수직 방향 입력 압력과 변환 행렬을 나타낸다.

$$P_c = [p_{c1} \ p_{c2} \ p_{c3} \ p_{c4}]^T$$

$$H = \begin{bmatrix} -W \cdot A_p & W \cdot A_p & W \cdot A_p & -W \cdot A_p \\ -L \cdot A_p & -L \cdot A_p & L \cdot A_p & L \cdot A_p \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_p & A_p & A_p & A_p \end{bmatrix} \quad (7)$$

입력 압력을 산출하기 위한 제어이론인 시간지연 제어기법^(9,10)의 적용방법은 3.1절에서 논의한다.

3. 시간지연제어기법의 적용 및 유효성 검증

이 장에서는 시간지연제어기법을 공압제진대에 적용하는 절차를 기술한다. 시간지연제어기법의 선정 이유는 공기의 압축성 등으로 인해 비선형적 거동 특성을 보이는 공압제진대 계에 대해 다른 비선형 제어기법과 비교하여 상대적으로 적용 및 설계 절차가 단순하면서 비선형 강인성 제어기로 알려져 있기에 때문이다.

3.1 시간지연제어기의 설계 및 적용 절차

Fig. 4는 시간지연제어기를 포함하는 전체 계에

대한 블록선도를 나타내며, 이때 적용된 시간지연 제어이론을 이용하여 산출한 입력 압력 벡터는 식 (8)과 같다.

$$u(t) = P_c(t)^T = [p_{c1} \ p_{c2} \ p_{c3} \ p_{c4}]^T$$

$$= P_c(t-L) + B_c^+ [-\dot{X}(t-L) + A_m X(t)] \quad (8)$$

시간지연제어기법의 입력 구성은 크게 두 가지로 나뉘며, 이는 시간지연 항을 이용하여 대상 계의 비선형성 혹은 불확실성을 제거하는 부분(part 1)과 원하는 동역학적 거동과 제어 궤적을 생성하는 부분(part 2)으로 구성된다. 이 연구에서 관심을 가지는 궤적은 대상 계가 임의의 외란에 대해 움직임이 없기를 원하는 것이므로 궤적 관련 항($r(t)=0$)은 제거되며, 시간지연(L)은 제어기 구현 하드웨어의 샘플링 주기인 0.001초로 한다.

제어 이득 행렬(B_c^+)의 안정 구간은 대상 계에 대해 알려진 매개변수들에 의해 식 (9)와 같이 결정되며^(9,10), 모사실험의 수행은 안정한 구간 내에서 최대값을 이용하여 수행하였다. 이때, 안정 구간의 산출은 이동 질량과 관련된 항이 상대적으로 작으므로 무시하고 결정하였다.

$$0_{4 \times 3} < B_{cl,th}^+ < 2 \times \begin{bmatrix} -4.76 \times 10^3 & -3.53 \times 10^3 & 2.12 \times 10^4 \\ 4.76 \times 10^3 & -3.53 \times 10^3 & 2.12 \times 10^4 \\ 4.76 \times 10^3 & 3.53 \times 10^3 & 2.12 \times 10^4 \\ -4.76 \times 10^3 & 3.53 \times 10^3 & 2.12 \times 10^4 \end{bmatrix}$$

$$b_{cl,\theta_x}^+ \quad b_{cl,\theta_y}^+ \quad b_{cl,z}^+ \quad (9)$$

여기서 $B_{cl,th}^+$ 은 12×4 행렬로 구성된 제어이득행렬 B_c 에서 의사역행렬(pseudo-inverse)을 수행한 다음, 제어하지 않는 방향과 관련된 항들을 제외한 행렬

Fig. 4 Block diagram of time delay controller

(4×3)을 의미한다.

3.2 시간지연제어기법 적용성에 대한 실험적 검증

설계된 3-자유도 능동형 공압제진대의 구현을 위한 실험 장치의 구성은 각 공기스프링 지지부에 4개의 서보 밸브와 3축 강체 거동을 산출하기 위한 3개의 가속도계(PCB, 10 mV/g)로 구성되며, 제어하지 않는 방향에 대한 거동 특성 파악을 위해 Fig. 5(a)와 같이 각 수평 방향으로 가속도계 2개를 추가로 설치한 구조이다. 대상 공압제진대 계에 대해 수학적 모형을 근간으로 한 모사실험을 위해 추출한 매개변수들을 정리하면 Tables 1, 2와 같다.

여기서 공기 스프링의 강성 및 감쇠를 상수로 가정

Fig. 5 Experimental set-up to measure acceleration for horizontal direction, (a) experimental set-up to measure acceleration for horizontal direction, (b) excitation along X-axis, (c) excitation along Y-axis

하였는데, 이동질량의 거동에 따른 시간지연제어기법 적용 효과를 살펴보기 위한 목적으로 비선형성을 가지는 공기스프링을 단순화하여 나타내었다. 대상 공압제진대에 대해 Fig. 5(b), (c)와 같은 방식으로 충격을 가한 후, 제어 및 수평 방향(X, Y)을 포함한 각 4지점에 대한 충격 실험 가속도 결과를 정리하면 Figs. 6, 7과 같다. 수동형 공압제진대에 대해 큰 설계 변경 없이 능동제어기법 적용이 용이한 3-자유도 제어(Z, θ_x, θ_y)를 수행하였으며, 제어하지 않는 방향(X, Y)으로는 계의 구조적 연성으로 인해 일정 효과가 있을 것으로 판단하여 함께 측정하였다.

압력을 제어하는 4곳의 지지 방향의 정착 시간 감소 효과는 수동형과 비교하여 5배 정도 감소하며, 추가의 2-방향에 대한 측정 결과도 어느 정도의 효과가 있음을 관찰할 수 있다. 제어를 위한 측정 지점에서의 정착시간 및 추가 2-방향에 대한 정착시간 감소 효과를 정리하면 Tables 3, 4와 같다. 이로부터 설계 및 적용한 시간지연제어기법이 효과가 있음을 확인할 수 있으며, 시간지연제어기법의 특성상 이동 질량부를 포함할 경우도 이를 제거시키는 입력 구성 항이 존재하므로 적용 효과가 있을 것을 예상할 수 있다.

Table 1 Properties of pneumatic spring

Symbol	Name	Value
A_p	Effective piston area	$2.518 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
c_v	Equivalent viscous damping of diaphragm for vertical direction	$2.87 \times 10^2 \text{ Ns/m}$
k_v	Real part of complex stiffness of diaphragm for vertical direction	$1.12 \times 10^4 \text{ N/m}$
c_h	Equivalent viscous damping of diaphragm for horizontal direction	$0.72 \times 10^2 \text{ Ns/m}$
k_h	Real part of complex stiffness of diaphragm for horizontal direction	$0.28 \times 10^4 \text{ N/m}$

Table 2 Descriptions for payload

Symbol	Name	Value
M	Payload	288 kg
W	Width of granite	1.2 m
L	Length of granite	0.8 m
H	Height of granite	0.1 m

Fig. 6 Time response of actively controlled and passive isolation table for payload excitation along X-axis

Fig. 7 Time response of actively controlled and passive isolation table for payload excitation along Y-axis

Table 3 Settling time(5 %) for payload excitation at each measured location

Axis	Passive	Active	Ratio(P/A)
Z ₁	2.12 sec	0.37 sec	5.9
Z ₂	2.23 sec	0.48 sec	4.8
Z ₃	1.68 sec	0.33 sec	5.3

Table 4 Settling time(5 %) for payload excitation in horizontal direction

Axis	Passive	Active	Ratio(P/A)
X	2.86 sec	0.97 sec	2.9
Y	1.86 sec	1.13 sec	1.6

4. 이동 질량을 포함하는 능동형 공압제진대 계에 대한 모사실험

2장에서 유도한 이동 질량항을 포함하는 공압제진대 계의 운동방정식에 대해 3장에서 설계한 시간지연제어기법을 적용하고 그 효과를 모사실험을

Table 5 Operational conditions of XY-stage on isolation table

	X-stage	Y-stage
Mass	10 kg	10 kg
Mass center	0.30	0.35
Stroke	0.5 m	0.5 m
Velocity	1.0 m/s	1.0 m/s
Acceleration	4.9 m/s ²	4.9 m/s ²

Fig. 8 Operating profile of XY-stage on isolation table

Fig. 9 Time response of actively controlled and passive isolation table as operating XY-stage (turn on controller at 4 sec)

통해 살펴보고자 한다. 이는 고가의 스테이지 장비의 설계 및 설치에 앞서, 환경 진동에 대한 시간지연제어기법을 적용한 공압제진대 계의 유효성을 확인하고, 이동 질량부를 포함하는 계의 모사실험을 통해 제어기 이득 변경 및 수정을 용이하게 한다. 모사실험을 위해 사용된 공압제진대의 매개변수들은 Tables 1, 2에서 기술한 값을 사용하며, 이동 질량의 궤적 등에 대해서는 실제 스테이지의 무게, 궤적 등을 고려하여 Table 5와 같이 가정하였다.

각 방향의 이동 질량에 대해 Table 5의 정보를 바탕으로 생성된 궤적 정보는 Fig. 8과 같으며, 이를 이용한 모사실험 결과는 Fig. 9와 같다.

모사실험의 수행 시 이동 질량의 정지 상태 중에 제어기를 작동(4초)시켰으며, 제어기의 작동 전후의 모사실험 결과를 비교하면, 능동제어이론을 적용한 경우에 대한 3-자유도 방향의 정착 시간이 감소함을 확인 할 수 있다. 비선형 강인성제어기법인 시간지연제어기법의 적용을 통해 스테이지 등의 이동 질량을 포함하는 계에 대한 능동 시스템의 정착 시간 감소 효과가 탁월함을 확인할 수 있었으며, 정착 시간 감소 효과의 정량화는 제어이론을 적용한 경우 정착 시간 감소효과가 현저하게 차이가 나고 계산이 모호하여 별도로 정리하지는 않았다. 그리고 모사실험을 통해 제어 방향(z-병진, x, y-회전) 이외의 방향(x, y-병진, z-회전)에 대해서도 정착 시간을 감소시키는 긍정적인 효과가 있음을 관찰할 수 있었으며, 이는 이동질량을 제외하고 수행한 3.2절의 실험을 통해서도 확인하였다.

5. 결 론

이 연구에서는 이동 질량 및 제어 입력 항을 포함하는 공압제진대 계의 운동방정식을 유도하였으며, 이에 대해 비선형 강인성제어기법 중 하나인 시간지연제어기법을 적용하는 절차를 제안하고, 제진대 상부에서 움직이는 이동 질량이 존재하는 공압제진대 계에 대한 제어이론 적용 결과, 제어하고자 하는 3-자유도 방향에 대한 정착시간 감소 효과를 모사실험을 통해 확인하였다.

이동 질량을 제외한 상태에서 시간지연제어기법을 이용하여 설계한 능동형 공압제진대의 유효성을 확인하기 위해 실험 장비를 구축하였으며, 이에 대

한 충격 실험을 수행하고 제어 지점에서의 가속도 신호를 기준으로 약 5배의 정착 시간 감소 효과를 관찰하였다. 해당 매개변수와 이동질량을 포함하여 유도한 공압제진대 계의 운동방정식을 활용하여 이동 질량으로 근사화되어 표현된 스테이지를 포함하는 공압제진대 계에 대한 정착 시간 감소 효과를 모사실험을 통해 관찰하였으며, 이는 향후 스테이지 등의 이동하는 질량을 포함하는 공압제진대 계에 대한 능동제어기법의 설계 및 적용 타당성 검토에 활용 가능하다.

후 기

이 연구는 한국기계연구원 주요사업으로 수행한 창의형 연구 과제 중 일부이며, 지식경제부 산업기술연구회의 지원에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Gordon, C. G., 1991, San Jose, CA., Generic Criteria for Vibration Sensitive Equipment, Proceedings of SPIE.
- (2) Amick, H., 1997, On Generic Vibration Criteria for Advanced Technology Facilities, Journal of the Institute of Environmental Sciences, Vol. 5, pp. 35-44.
- (3) Lee, J.-H. and Kim, K.-J., 2007, Modeling of Nonlinear Complex Stiffness of Dual-chamber Pneumatic Spring for Precision Vibration Isolations, Journal of Sound and Vibration, Vol. 301, pp. 909-926.
- (4) Lee, J.-H., 2007, Modeling of Dual-chamber Pneumatic Spring and Application to Transmissibility Design of Vibration Isolation Table, PhD Dissertation, KAIST, Dept. of Mechanical Engineering.
- (5) Moon, S. J., Jung, H. J., Shin, Y. H., Jang, D. D., Jeong, J. A. and Moon, Y. J., 2011, Development of a Hybrid Mount System Combined Airspring with Piezostack Actuator for Micro-vibration, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No. 1, pp.

56~65.

(6) Song, J. h., Kim, K. Y. and Park, Y. P., 1994, Active Control of Air-spring Vibration Isolator, Transactions of the KSME, Vol. 19, No. 7, pp. 1605~1617.

(7) Moon, S. J., Park, S. H., Jeong, J. A., Huh, Y. C., Kim, C. H. and Choi, S. M., 2011, A Study on the Development of a Hybrid Electromagnetic Actuator Against Microvibration, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No. 5, pp. 475~483.

(8) Shin, Y. H. and Kim, K. J., 2009, Performance Enhancement of Pneumatic Vibration Isolation Tables in Low Frequency Range by Time Delay Control, Journal of Sound and Vibration, Vol. 321, No. 3-5, pp. 537~553.

(9) Shin, Y. H., Kim, K. J., Chang, P. H. and Han, D. K., 2010, Three Degrees of Freedom Active Control of Pneumatic Vibration Isolation Table by Pneumatic and Time Delay Control Technique, Transactions of the ASME(Journal of Vibration and Acoustics), Vol. 132, pp. 051013-1~12

(10) Youcef-Toumi, K. and Ito, O., 1990, A Time Delay Controller for Systems with Unknown Dynamics, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control(ASME), Vol. 112, No. 1, pp. 133~142.

(11) Sun, J. O., Shin, Y. H. and Kim, K. J., 2007, A Study on Response Analysis of 6-DOF Pneumatic Vibration Isolation Table Loaded by Transient Movements of Carriage on It, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 17, No. 6, pp. 515~523.