

공기스프링 방진대의 능동제어

Active Control of air-spring vibration isolator

송진호* 김규용** 박영필***
Jin-Ho Song Kyu-Yong Kim Young-Pil Park

1. 서 론

각종 정밀측정기와 생산기기 등에 있어서 불가피하게 발생하는 진동문제는 장비나 설비들의 정상적인 가동을 어렵게 하며, 기계효율의 저하에 의하여 결국 생산성의 저하, 생산품의 품질저하 등을 초래한다. 또한 갈수록 고정밀도를 필요로 하는 산업이 늘어나고 그 요구 기준도 대단히 엄격해지는 최근의 현실에 비추어 볼 때 진동 문제는 고정밀도를 요구하는 반도체의 제조공정이나 신섬유의 개발공정 등에 있어서 결정적인 영향을 주는 인자로서 대두되고 있으며 그 해결방안에 대한 시급한 필요성이 요구되고 있다.

이와같은 진동문제를 해결하기 위하여 고무, 금속 등과 같은 재료를 진동절연요소로 사용하였다. 그러나 이러한 요소들은 고유진동수가 비교적 높아서 저주파영역의 진동에 효과적인 대처를 못하는 한계를 지니고 있으며, 제한된 에너지 저장능력을 가지고 있어서 많은 내부에너지가 요구되는 진동절연시에는 부피가 매우 커져야하는 단점이 있다. 근래에 들어서 기존의 절연요소들의 단점을 극복하고자 공기스프링을 사용한 제진 및 방진에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

일반적으로 공기스프링을 이용한 방진대에서는 고유진동수를 낮게 설정할 수 있고, 고유진동수 이상의 주파수영역에서 진동전달율을 대폭 저감시키는 등, 뛰어난 제진효과를 얻을 수 있다. 그러나 공기스프링 방진대 상단에서 외란이 작용하게 되면 상대적으로 작은 강성에 의하여 반력을 받게되어 쉽게 요동되므로, 저주파 외란에 대해 취약점을 가지고 있으며, 안정상태에 도달하는데 비교적 긴 시간이 걸리게 된다. 수동제진상태의한계를극복하고자, 岩田義明^{[13],[14],[15],[16]}

은 작동기요소로 비례제어밸브와 공기스프링을 사용하여 상태기환제어를 행하였고, Takagami^[12]는 공압실린더를 작동기로 사용하여 1자유도 능동형 방진시스템을 구성하였고, 鎌田 徹^[17]은 보이스코일모타(VCM)로 전자기력을 발생시켜서 공기스프링 방진대의 상태기환제어를 행하였으며, Makoto Ohshio^[18]는 공기스프링 방진대에 서보 밸브(servo valve)를 부착하여 능동 방진대를 개발하였다.

본 연구에서는 공기스프링을 능동요소로 사용한 방진대를 1자유도 및 2자유도로 모델링하여 이론해석을 수행하였고, 이에 따른 컴퓨터시뮬레이션과 실험을 통하여 이론의 타당성을 검증하였다. 다음으로 공기스프링 방진대의 방진성능 향상을 위하여 비례제어밸브, 컴퓨터, 측정센서 등을 이용하여 공기스프링내의 공기압력을 능동적으로 조절할 수 있는 제어기를 구성한 후, 최적제어 및 퍼지제어 알고리즘을 적용하여 상태기환 제어를 실시하였다.

2. 공기스프링 방진시스템

공기스프링 방진대는 공기스프링 4개와 각각의 공기스프링내의 공기압력을 조절하는 4개의 비례제어밸브, 그리고 이들로 지지되는 질량으로 구성된다. 이를 도시하면 Fig.1과 같다. 비례제어밸브에 인가되는 전압에 따라 공기스프링내에 일정한 압력이 공급되며, 상단의 테이블은 공기스프링 4개로 병렬 지지된다. 공기스프링은 강성성분과 감쇠성분 그리고 작동기성분의 복합체로서 사용되어진다.

3. 공기스프링 방진대의 모델링

3.1 1자유도 진동 모델링

4개의 공기스프링을 동기화시켜 공기스프링 방진대를 1자유도 진동계로 모델링하였다. 비례제어밸브에 일정한 전압을 인가하여 공기스프링내 일정 압력을 준 경우 병렬연결된 공기스프링이 갖는 강성상수를 K, 감쇠상수를 C로 하고 비례제어밸브 입력전압 변화량에 따른 공기스프링 압력변화에 의하여 발생하는 외력을 F_a 로 한 경우 운동방정식은 식(1)과 같이 주어진다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F_a \quad (1)$$

작동기는 공기스프링과 비례제어밸브로 구성되어 있으며, 비례제어밸브에 주어지는 전압에 해당하는 압력을 공기스프링이 가지게 함으로써 작동기로서 작용한다. 이때, 공기스프링과 밸브가 강한 비선형특성을 가지고 있으므로 비례제어밸브에 인가되는 입력전압과 공기스프링내에 압력간의 관계를 2차식으로 단순화하여 아래의 관계식으로 모델링한다.

$$F_a = K_{pv} A_s \Delta V \\ = K_{pv} A_s (\Delta P + c_1 \Delta P + c_2 \Delta P) \quad (2)$$

K_{pv} : 공기스프링내의 압력-비례제어밸브

입력전압간의 정적이득

A_s : 공기스프링의 수압면적

ΔV : 제어시 비례제어밸브 입력전압과 기준상태에서 입력전압의 차이값

ΔP : 제어시 공기스프링내 압력과 기준상태에서 압력의 차이값

c_1, c_2 : 전달함수 측정에 의한 실험계수

1자유도 공기스프링계의 운동방정식(1)과 작동기방정식(2)를 상태공간 방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \\ \dot{X}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{c_2 K}{M} & -\frac{c_1 C + c_1 K}{M} & -\frac{K + c_2 M + c_1 C}{M} & -\frac{c_1 M + C}{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_{pv} A_s}{M} \end{bmatrix} \Delta V \quad (3)$$

여기서, 상태변수 X_1, X_2, X_3, X_4 는 각각 공기스프링 방진대 상단의 변위, 속도, 가속도, 저크항으로 선정하였다. 상태변수벡터를 X , 출력을 y , 제어시 비례제어밸브의 입력전압과 기준상태에서의 입력전압의 차이값 ΔV 를 입력 U , 출력행렬을 C 로 하면 식 (4)로 상태공간방정식을 표현할 수 있다.

$$\dot{X} = AX + BU \\ y = CX \quad (4)$$

위의 상태공간 모델에 제어이론으로 구한 귀환이득행렬 K 를 구하여 다음과 같이 입력을 결정한다.

$$u = -KX \quad (5)$$

* : (주) 기아자동차
** : 연세대학교 기계공학과 대학원, 정희원
*** : 연세대학교 기계공학과, 정희원

3.2 2자유도 모델링

공기스프링을 2개씩 동기화시켜 2개의 공기스프링이 병렬로 연결된 것으로 모델링하였다. 1자유도 모델링과 마찬가지로 공기스프링은 강성성분, 감쇠성분, 작동기성분으로 나누어서 모델링하였고, 비례제어밸브의 동특성을 고려하여 작동기성분에 포함시켰다. 작동기방정식은 1자유도 모델링에서와 동일한 식(3)으로 주어진다. 대상계의 운동방정식과 작동기방정식을 이용하여 상태공간 방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{X} = AX + BU \quad (6)$$

$$y = CX$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ A_{71} & A_{72} & A_{73} & A_{74} & A_{75} & A_{76} & A_{77} & A_{78} \\ A_{81} & A_{82} & A_{83} & A_{84} & A_{85} & A_{86} & A_{87} & A_{88} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ B_{71} & B_{72} \\ B_{81} & B_{82} \end{bmatrix}$$

$$\alpha = \frac{1}{4} \left(M + \frac{I}{l^2} \right), \quad \beta = \frac{1}{4} \left(M - \frac{I}{l^2} \right),$$

$$A_{71} = \frac{\alpha \cdot K \cdot r_2}{-\alpha^2 + \beta^2}, \quad A_{72} = \frac{\beta \cdot K \cdot r_2}{\alpha^2 - \beta^2},$$

$$A_{73} = \frac{\alpha \cdot (K \cdot r_1 - C \cdot r_2)}{\alpha^2 - \beta^2}, \quad A_{74} = \frac{\beta \cdot (-K \cdot r_1 + C \cdot r_2)}{\alpha^2 - \beta^2},$$

$$A_{75} = \frac{\alpha \cdot K - \alpha \cdot C \cdot r_1 + \alpha^2 \cdot r_2 - \beta^2 \cdot r_2}{-\alpha^2 + \beta^2},$$

$$A_{76} = \frac{\beta \cdot (K - C \cdot r_1)}{\alpha^2 - \beta^2},$$

$$A_{77} = \frac{\alpha \cdot C - \alpha^2 \cdot r_1 + \beta^2 \cdot r_1}{-\alpha^2 + \beta^2}, \quad A_{78} = \frac{\beta \cdot C}{\alpha^2 - \beta^2},$$

$$A_{81} = A_{72}, \quad A_{82} = A_{71}, \quad A_{83} = A_{74}, \quad A_{84} = A_{73},$$

$$A_{85} = A_{76}, \quad A_{86} = A_{75}, \quad A_{87} = A_{78}, \quad A_{88} = A_{77}$$

$$B_{71} = \frac{\alpha \cdot K_{pv} \cdot A_e}{\alpha^2 - \beta^2}, \quad B_{72} = \frac{-\beta \cdot K_{pv} \cdot A_e}{\alpha^2 - \beta^2},$$

$$B_{81} = B_{72}, \quad B_{82} = B_{71}$$

위의 상태공간 모델에 제어이론을 이용하여 구한 귀환이득행렬 K 를 구하여 입력을 결정한다. 상태귀환 제어계의 블록선도는 Fig. 2와 같다.

3.3 디지털 제어를 위한 계의 이산화

앞절에서 다룬 제어시스템은 연속시간 제어시스템이다. 따라서, 컴퓨터를 이용하여 디지털제어를 수행하려면 연속시간 계에서의 상태공간방정식을 이산시간계의 상태방정식으로 바꾸어야 한다. 샘플링시간은 T 로 하고 영차홀더(zero-order holder)를 사용하면 다음과 같이 표현되는 이산화된 상태방정식을 얻는다.

$$x(k+1) = \underline{A}_d x(k) + \underline{B}_d u(k) \quad (7)$$

$$y(k) = \underline{C}_d x(k)$$

$$\underline{A}_d = e^{AT}, \quad \underline{B}_d = \int_0^T e^{A' t} B dt$$

3.4 관측기의 설계(Observer Design)

상태변수를 이용한 제어에서는 모든 상태변수를 측정, 제어이득을 곱하여 이를 귀환시켜야 하나, 실제로 측정 불가능, 노이즈 등 제약이 따르는 경우 계의 출력과 입력을 이

용하여 미지의 상태변수를 추정(estimate)하는 관측기를 사용한다. 실제로 식(3)과 (6)의 상태공간방정식에서 상태변수들을 모두 측정하는 것은 불가능하므로 측정하지 못하는 상태량만을 추정하는 관측기를 설계한다. 관측기는 모델링 오차와 추정하는 상태변수가 실제의 상태변수에 수렴하기에 필요한 시간 때문에 발생하는 제어의 비효율성을 줄이기 위해 측정가능한 상태변수를 제외한 상태변수만을 추정하는 최소차관측기를 사용한다.

계의 상태벡터를 측정하는 상태벡터 X_1 과 추정하는 상태벡터 X_2 로 분리하여 상태공간 방정식을 다시 쓰면 식(8)과 같다.

$$\begin{pmatrix} X_1(k+1) \\ X_2(k+1) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X_1(k) \\ X_2(k) \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} u(k) \quad (8)$$

$$y(k) = [I \quad 0] \begin{pmatrix} X_1(k) \\ X_2(k) \end{pmatrix}$$

최소차수 관측기는 다음식과 같이 나타난다.

$$X_2(k+1) = [A_{22} - K_e A_{12}] X_2(k) + A_{21} X_1(k) + B_{2u} u(k) + K_e [X_e(k+1) - A_{11} X_1(k) - B_{1u} u(k)] \quad (9)$$

K_e : 관측기 이득행렬(observer gain matrix)

예측형태관측기를 구성하기 위해서, 새로운 상태변수 $Z(k) = X(k) - K_e y(k)$ 을 이용하여 식(9)를 다시쓰면 다음과 같은 예측형태의 최소차수관측기 식을 얻을 수 있다.

$$Z(k+1) = \underline{A}_{obs} Z(k) + \underline{B}_{obs} u(k) + \underline{C}_{obs} y(k) \quad (10)$$

$$\underline{A}_{obs} = A_{22} - K_e A_{12}, \quad \underline{B}_{obs} = B_2 - K_e B_1,$$

$$\underline{C}_{obs} = A_{22} K_e - K_e A_{12} K_e + A_{21} - K_e A_{11}$$

최소차 관측기를 이용한 제어의 블록선도는 Fig. 3과 같이 표현할 수 있다.

4. 제어 이론

방진대 모델링에 대하여 최적제어와 퍼지제어 알고리즘을 적용하였다. 공기스프링 방진대의 상태공간방정식을 연속조건으로 하고 주어진 성능지수함수를 최소화하는 LQG제어 방법을 사용하여 최적추정 및 최적제어를 수행한다. 한편, 최적제어 이론은 제어이득의 계산이나 가중치의 선정과정에 있어서 여러번의 시행착오법을 거쳐야 하고, 계의 파라미터변화는 잘 대처하지 못하는 단점을 보완하기 위하여 대상계와 작동기의 동적인 거동을 언어적으로 표현하고 추론하여 제어에 적용하는 퍼지제어방법을 사용한다.

4.1 최적제어(optimal control)

4.1.1 성능지수(performance index)의 선정

상태방정식에서의 상태변수의 제곱과 제어입력의 제곱의 합을 시간에 대해 적분한 함수를 성능지수로 취하고 이를 최소화하는 최적귀환 이득행렬을 구한다. 성능지수는 공기스프링 방진대이들 양단의 변위, 속도, 가속도, 저크 항 그리고 제어입력을 최소화시키도록 선정한다.

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} [X^T(K) Q X(K) + U^T(K) R U(K)] \quad (11)$$

Q : 상태벡터에 대한 대각가중행렬

R : 제어입력에 대한 대각가중행렬

정상상태 제어대수리카티(CARE) 식은 다음과 같이 주어진다.

$$P = A_d P A_d + Q - A_d^T P B_d + [B_d^T P B_d + R]^{-1} B_d^T P B_d = 0 \quad (12)$$

식 (12)에서 구한 P 를 이용하여 귀환이득행렬 K 를 구한다.

$$K = -[R + B_d^T P B_d]^{-1} [B_d^T P A_d] \quad (13)$$

따라서 정상상태 최적제어력 $u(k)$ 는

$$u(k) = -Kx(k) \quad (14)$$

로 결정한다.

4.1.2 최적 최소차 관측기의 설계

본 연구에서는 측정하지 않는 상태변수들의 최적추정을 수행하고자 계의 제어에 관계된 신호처리시 포함되는 노이즈(noise) 및 생략되거나 고려하지 않은 계의 효과를 고려하기 위하여, 계의 노이즈를 고려하고 이에 의한 관측오차를 최소로 하는 조건에 의해 K_f 를 구하는 예측형태의 칼만부치필터(kalman bucy filter)를 사용한다.

4.2 퍼지 제어

4.2.1 퍼지추론(fuzzy inference)

퍼지추론은 규칙과 기존의 사실로부터 새로운 사실을 얻어 내는 과정을 말한다. 제어에서의 퍼지추론은 제어대상계에서의 일어나는 현상에 대한 판단기준을 정하여 주는 것으로 컴퓨터에 의한 제어를 수행하는 경우 제어설계자가 대상계의 상태에 대한 기준치와 판단기준을 정해 주기 때문에 설계자의 판단과 비슷한 추론을 할 수 있게 되어 애매한 기준을 갖는 경우에 대해 그 계의 성향을 알고 있고 어느정도 판단기준만 정할 수 있으면 퍼지추론은 가능해진다. 퍼지추론은 전문가의 지식과 경험이 많이 포함되는 부분으로 대부분의 경우 룰형(rule type) 퍼지추론을 사용한다.

4.2.2 퍼지논리제어(fuzzy logic control)

퍼지논리 제어기의 구조는 Fig.4과 같다. 제어대상계의 출력값을 퍼지화하여 퍼지화된 데이터를 의사결정논리를 이용하여 역퍼지화(defuzzification)해 제어입력을 결정한다. 즉, 대상 플랜트는 애매하지 않은 계로 구성되어 있으며 퍼지논리 제어기는 모든집합이 퍼지집합의 연산으로 구성되게 된다. 그러므로 두가지의 서로 다른 시스템을 연결시켜 주는 장치가 필요하게 되며 퍼지화, 역퍼지화가 그 역할을 담당한다.

4.2.3 퍼지화 (fuzzification)

퍼지화는 측정된 신호를 퍼지추론을 행할 수 있는 퍼지집합(fuzzy set)으로 변환시키는 기능을 한다. 퍼지화는 제어계의 제어량을 -1에서 1까지의 값으로 정규화(normalize)하고 이를 이용하여 퍼지집합을 구성한다. 본 연구에서는 NB(negative big), NM(negative middle), NS(negative small), ZE(zero equal), PS(positive small), PM(positive middle), PB(positive big) 7등분으로 구성된 퍼지집합을 구성하였다. 또한, 퍼지집합의 원소가 갖는 멤버십(membership) 함수의 모양은 정규분포와 유사한 모양으로 계산이 간단하고 노이즈에 강한 잇점을 지닌 삼각형(triangular)형을 채택하였다. Fig.5는 퍼지집합을 나타낸다.

4.2.4 결정논리(decision making logic)

결정된 퍼지집합을 이용하여 설계자가 알고있는 지식을 바탕으로 퍼지추론을 행하여 결정논리를 정한다. 제어에 대하여 설계자가 생각할 수 있는 기본적인 논리를 확장하여 7개의 원소로 구성된 퍼지집합에 대하여 퍼지규칙(fuzzy rule)을 구성하면 Fig.6과 같다.

4.2.5 역퍼지화 (defuzzification)

역퍼지화는 애매한 출력값을 애매하지 않은 제어값으로 대응시키는 것을 말한다. 그러므로, 추론된 퍼지제어값으로부터 가장 높은 가능성 분포를 갖는 애매하지 않은 제어값을 만들어내는 것을 목표로 한다. 퍼지집합원소가 정규화된 값의 범의에 대하여 멤버십함수가 구성되어 있으므로 임의의

시점에서의 제어량인 변위와 속도는 각각 2가지의 퍼지집합 원소(fuzzy set member)에 속하게된다. 출력값을 산출하는 방법으로는 Fig.7에 도시한 최대내적방법(max product method)을 사용하였다. 최대내적방법에 의해 산출된 값은식 (15)를 사용, 역정규화하여 제어입력을 결정한다.

$$u_{ow} = \alpha X \quad (15)$$

u_{ow} : 역퍼지화한 제어입력

α : 출력 가중계수

X : 퍼지한 출력

5. 실험장치 및 방법

공기스프링 방진대의 1자유도 및 2자유도 모델에 대한 능동 방진실험은 방진테이블 상단에 충격가진과 모터에 의한 주기적 가진 두가지 외란이 주어지는 경우에 대하여 실시하였다. 실험에 사용한 공기스프링 방진대의 제원은 다음과 같다

Table 1 Air-spring isolation table specification

Table Weight	210 kg
Table Dimension	1500 * 1000 mm
Table Thickness	200 mm
Air-spring Type	Diaphragm type
Air Supply Pressure	5 Kg/CM ²

실험장치의 구성은 다음의 Fig.8,9와 같다. 레이저변위센서로 측정된 방진대 상단의 변위신호는 앰프를 통과하여 증폭된 후 저주파대역통과필터를 거쳐 고주파성분의 노이즈를 제거한다. 또한 방진대상단에 설치한 가속도센서로부터 신호를 얻는다. 이 두신호는 12bit해상도를 갖는 A/D변환기를 이용하여 PC에 입력한다. PC에서는 제어알고리즘에 따라 계산된 제어신호를 D/A변환기를 통하여 비례제어밸브에 출력하여 능동방진을 수행한다. 이때 2쌍의 비례제어밸브-공기스프링계는 동시에 같은 제어신호에 따라 작동하도록하여 능동방진을 구현한다.

6. 결과 및 고찰

6.1 제진성능실험

바닥에서 들어오는 외란에 대한 방진대의 진동절연성능을 측정하는 실험을하여 공기스프링 방진대의 제진성능을 평가하였다. 실험은 공기스프링의 공기압력인원 콤프레사를 작동시켜 바닥가진요소로 사용하였다. 진동가속도를 방진대의 바닥면과 상단에서 측정하여 시간영역에서 비교하면 바닥면이 0.4 m/sec²(40gal)정도의 진폭을 갖는 반면, 방진테이블 상단에서는 0.02 m/sec²(2gal)정도의 진폭을 가졌다. 제어를 실시한 경우의 방진테이블 상단의 진동가속도는 수동의 경우와 유사하게 나타났다.

바닥진동에 대한 방진테이블의 진동절연성능을 파악하기 위한 방법으로 주파수영역에서 진동신호의 파워스펙트럼을 측정하였다. 공기스프링의 기준압력이 1.5 kgf/cm²인 경우에서 방진대의 고유진동수가 4.876Hz에서 존재하며, 실험결과를 보면 공진주파수 이상의 주파수영역에서는 제진성능이 뛰어난 것을 알 수 있다. 전체적으로 볼때, 공기스프링 방진대는 바닥에서 전달되는 진동에 대해 수동과 능동제진상태에서 뛰어난 제진성능이 있음을 확인하였다.

6.2 1자유도 모델 주기적 가진 실험

6.2.1 최적 제어(LQG control)

공기스프링 방진대의 중앙에 설치한 편심질량모터의 회전에 의하여 상하방향으로 가진한 경우에 대하여 방진대 중앙에서 변위와 가속도를 측정하고 속도, 저크항은 최소차 관측기를 사용하여 능동제어실험을 하였다. 최적 귀환이득은 작동기의 안정영역내에서 제진성능을 만족시키는 적절한 값을 선정하였다. 공기스프링내의 기준압력이 1.5 kgf/cm^2 인 경우 제어대상계의 공진주파수가 4.876Hz이므로 편심질량모터의 가진주파수는 4 - 6Hz범위에서 변화시키면서 단일주파수 가진실험을 실시하였다.

Fig. 16과 Fig. 17은 편심질량모터로 4.75Hz의 외란을 지속적으로 가하는 조건하에서 제어 전후 방진대 중앙에서의 변위와 가속도의 변화를 나타낸다. 제어가 시작되면서 약 2초 동안 관측기의 초기값에 따른 오차와 제어프로그램내의 추정 속도에 따른 과도응답이 나타나고, 이후 변위와 가속도가 현저하게 감소하는 제어성능을 얻었다.

6.2.2 퍼지 제어(fuzzy control)

실험에서 공기스프링방진대 상단의 가속도는 가속도센서를 이용하여 측정하였고, 측정된 가속도를 수치적으로 미분하여 가속도의 변화율로 사용한다. 가속도와 가속도의 변화율에 대한 정규가속도합수를 다음과 같이 정의하였다.

$$\mu_a = \frac{A}{A_{\max}}, \quad \mu_j = \frac{J}{J_{\max}}$$

A : 공기스프링 방진테이블의 가속도

A_{\max} : 공기스프링 방진테이블의 최대가속도

μ_a : 공기스프링 방진테이블의 정규화된 가속도

J : 공기스프링 방진테이블의 가속도의 변화율

J_{\max} : 공기스프링 방진테이블의 가속도 최대변화율

μ_j : 공기스프링 방진테이블의 정규화된 가속도 변화율

역퍼지화는 1차합수를 사용하였고, 제어입력의 크기를 결정하는 출력가중계수를 변화시키면서 제어성능을 검토하였다. 출력가중계수가 커질수록 방진효과는 우수해지지만 많은 제어입력을 필요로 하며 어느정도이상 커지면 제어대상계가 불안정하였다. 출력가중계수는 2.5로 하였다. 샘플링주파수는 200Hz로 하였다. Fig. 18, 19는 4.5Hz의 외란을 지속적으로 가하는 조건하에서 제어 전후 방진대상단 중앙에서의 변위와 가속도의 변화를 나타낸다. 제어가 시작되면서 정상 상태에 도달하는데에 약 1초가 필요하였다.

6.3 2자유도 모델 주기적 가진 실험

6.3.1 최적 제어

공기스프링 방진대 상단의 한쪽단에 설치한 편심질량모터를 공진봉 근방 주파수에서 작동하여 상하방향 가진력을 발생시켜서 이를 외란으로 준 경우, 가진한 쪽과 그 반대쪽의 변위들을 측정하고 양단의 속도, 가속도, 저크항은 최소차 관측기를 이용하여 관측하여 능동방진실험을 실시하였다. 관측기이득은 관측기가중행렬을 변화시키면서 적절한 값을 구하였다.

공기스프링내의 기준압력이 1.3 kgf/cm^2 인 경우 제어대상계의 1차와 2차 공진주파수는 3.68Hz와 4.37Hz로 측정되었고, 편심질량모터를 3.875Hz로 가진실험을 실시한 경우, 제어 전후의 방진대 상단 양쪽끝에서의 변위가 Fig. 20이다. 편심질량모터가 달린 쪽의 변위는 초기 1.5초간은 과도응답현상이 다소 나타나나 반대쪽의 변위는 바로 안정한 상태에 도달하며 진동진폭도 반 이상 줄어들음을 알 수 있다.

공기스프링내의 기준압력이 1.5 kgf/cm^2 인 경우 제어대상계의 1차와 2차 공진주파수는 4.876Hz와 5.87Hz이고, 편심질량모터의 가진주파수를 5Hz로 가진실험을 실시한 경우, 제어

전후의 방진대 양단에서의 변위를 나타낸 것이 Fig. 21이다. 가진점과 반대쪽의 변위 모두 제어 후 0.5초가 지나면 정상 상태에 도달하였다.

6.3.2 퍼지 제어

방진대 양단의 변위를 레이저변위센서로 측정, 변위를 수치적으로 미분하여 변위와 변위변화율로 사용한다. 공기스프링내의 기준압력이 1.3 kgf/cm^2 인 경우 편심질량모터를 3.875 Hz로 작동시켜 가진실험을 실시한 경우, 제어 전후의 방진테이블 양쪽끝에서의 변위가 Fig. 22이다. 기준압력이 1.5 kgf/cm^2 인 경우 편심질량모터를 5.25 Hz로 가진실험을 실시한 경우, 제어 전후의 방진대 상단 양쪽끝에서의 변위가 Fig. 23이다. 편심질량모터가 달린 쪽과 반대쪽의 변위 모두 제어 후 0.5초 이내에 정상상태에 도달하였다.

6.4 충격 가진 실험

외부로부터 충격이 가해지는 경우에 공기스프링 방진대의 방진성능을 측정하고자 충격 가진 실험을 실시하였다. 1자유도 모델에 대하여 최적제어와 퍼지제어를 적용하였다. Fig. 24는 공기스프링내의 기준압력이 1.3 kgf/cm^2 인 상태에서 최적제어결과이고, Fig. 25는 기준압력이 1.5 kgf/cm^2 인 상태에서 퍼지제어 결과로서 진동가속도를 시간영역에서 나타내었다.

6.5 전달함수 측정 실험

6.5.1 1자유도 진동계의 전달함수

충격망치(impact hammer)가진에 대한 방진대의 가속도응답으로 구하였다. Fig. 26은 제어하지않는 경우, 최적제어, 퍼지제어에 대한 계의 전달함수를 비교하였다.

6.5.2 2자유도 진동계의 전달함수

6.5.1의 실험과정과 유사하게 2자유도 진동계에 대해서 전달함수를 측정하였다. 구동점에 대한 전달함수(case I)와 구동점 반대점의 전달함수(case II) 2개를 측정하였다. (Fig. 27, Fig. 28)

7. 결론

공기스프링 방진대를 1,2자유도로 모델링하여 최적제어, 퍼지제어 알고리즘 및 칼만부쉬필터를 이용한 최적최소차관측기 설계이론을 적용하여 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 공기스프링을 사용한 방진대는 바닥에서 들어오는 진동에 대하여 뛰어난 제진성능을 갖고 있다.
- (2) 공기스프링으로 지지된 방진대를 1자유도 및 2자유도도 모델링, 운동방정식을 구성하여 모의실험과 실험을 비교한결과, 잘 일치하고 있다. 따라서, 공기스프링 방진대의 모델링은 적절하였다.
- (3) 공기스프링 방진대는 가진을 받는 경우, 능동제어에 의해 효과적인 방진성능을 얻었다.
- (4) 공기스프링내의 압력과 공급되는 공기유량이 변동되는 진동계에서는 모델링오차가 불가피하게 발생하게 되므로 계의 지배방정식에 따라 제어입력을 계산하는 최적제어 알고리즘보다는 불확실성과 대략적인 사실에 따라 제어를 수행하는 퍼지제어가 계의 안정성 및 진동제어 성능면에서 다소 우수하였다.

참고 문헌

- [1] Ogata Katsuhiko, 1987, Discrete-Time Control System, Prentice-Hall Inc..
- [2] Franklin Gene F. and Powell J. David and Abbas Emami-Naeini, 1990, Digital Control of Dynamic System, Addison-Wiley Publishing company.
- [3] Harris Cyrill M., 1990, Shock Vibration Handbook, McGraw-Hill Book co..
- [4] 古田 勝久, 川路 茂保, 美多 勉, 原 辰次, 1984, 메카니칼 시스템 제어, 오-ム社, pp64-78.
- [5] Ogata Katsuhiko, 1984, Modern Control Engineering, Prentice-Hall Inc..
- [6] Chen Chi-Tsong, 1984, Linear System Theory and Design, Holt-Saunders International Edition.
- [7] Souza D. and Grag K., 1988, Advanced Dynamics, Prentice-Hall, Inc..
- [8] 김종식, 1988, 선형제어시스템공학, 청문각.
- [9] 하영균, 1991, 유연한 로봇팔 진동의 능동제어, 연세대학교 기계공학과 박사학위논문.
- [10] 손태규, 1992, 전자기력을 이용한 능동제진장치의 제어 알고리즘, 연세대학교 기계공학과 석사학위논문.
- [11] 김재원, 1992, 퍼지로직에 의한 유연한 단일링크 로봇트의 진동제어, 연세대학교 기계공학과 석사학위논문.
- [12] Takagami Teruo, Jimbo Yasuo, 1985, "Study of an Active Vibration Isolation System", Journal of Low Frequency Noise and Vibration, Vol.4, No.3.
- [13] 岩田義明, 大鹽 眞, 鈴木 登, 内田公夫, 唐澤好一, 1991, "精密制振装置の アクティブコントロール", 日本機械學會論文集 57卷 534號.
- [14] 岩田義明, 富成 襄, 1973, "最適フィードバック制御理論による吸振器の設計と實驗", 日本機械學會論文集39卷327號.
- [15] 岩田義明, 富成 襄, 1972, "空氣ばねを有する吸振器の最適設計", 日本機械學會 講演論文集.
- [16] 岩田義明, 岡田養二, 1984, "4点支持 絶縁装置 最適振動制御", 日本機械學會論文集 50卷 458號.
- [17] 鎌田 徹, 田畑文夫, 關口英紀, 阪田裕司, 1992, "能動制振機構を備えた除振台の開発", 日本精密工學會誌 58卷 7號.
- [18] Ohshio Makoto, Iwata Yoshiaki, Suzuki Noboru, Uchida Kimio and Yamazoe Hidetoshi, 1992, "Active Control for Precision Vibration Isolation System", the 1st International Conf. on Motion and Vibration Control.

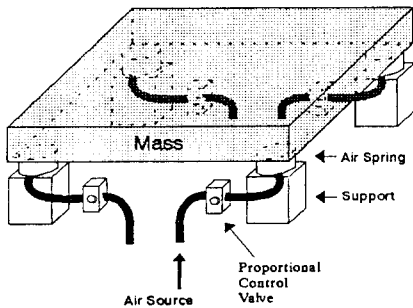


Fig.1 Schematic diagram of air-spring isolation table

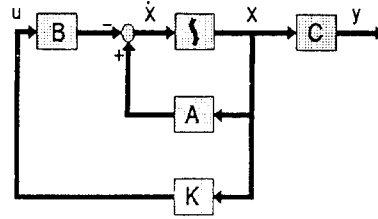


Fig.2 Block diagram of state space feedback control

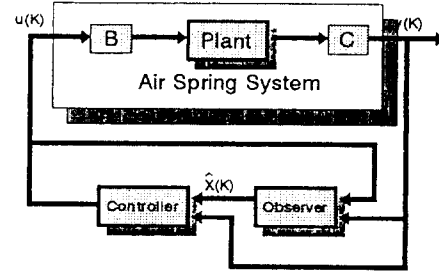


Fig.3 Observed-state feedback control with minimum order observer

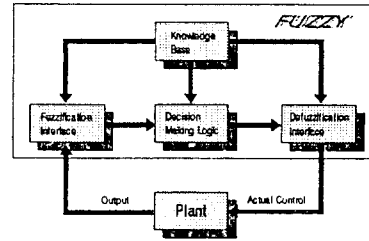


Fig.4 Fuzzy logic controller

PB	PB	PB	PM	PS	PS	ZE	ZE
PM	PB	PM	PM	PS	PS	ZE	NS
PS	PM	PM	PS	PS	ZE	NS	NS
ZE	PM	PS	PS	ZE	NS	NS	NS
NS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM	NM
NM	PS	ZE	NS	NS	NM	NM	NB
NB	ZE	NS	NS	NM	NM	NB	NB
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB

Fig.6 Fuzzy rule

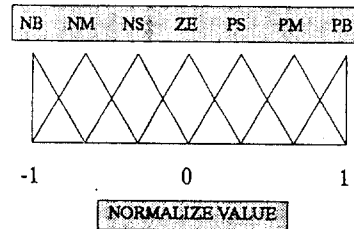


Fig.5 Fuzzy set

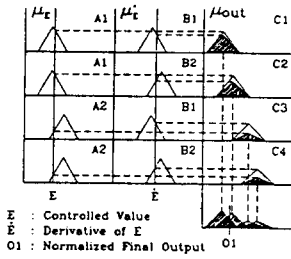


Fig. 7 Max-product method

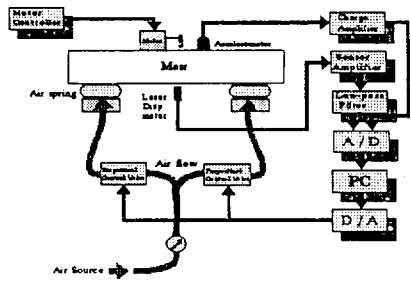


Fig. 8 Schematic diagram of 1 dof experimental set-up

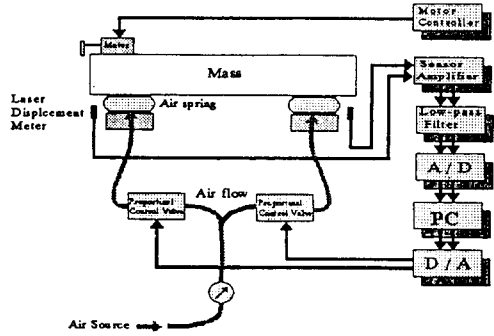


Fig. 9 Schematic diagram of 2 dof experimental set-up

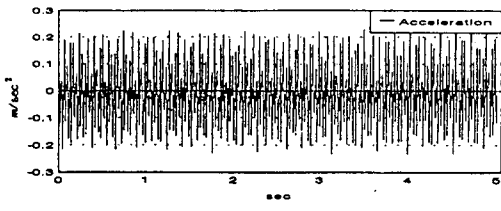


Fig. 10 Acceleration of floor with compressor excitation

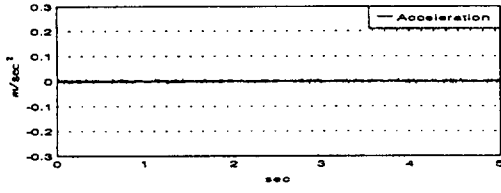


Fig. 11 Acceleration of isolation table (uncontrolled)

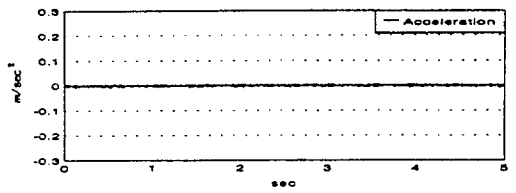


Fig. 12 Acceleration of isolation table (controlled)

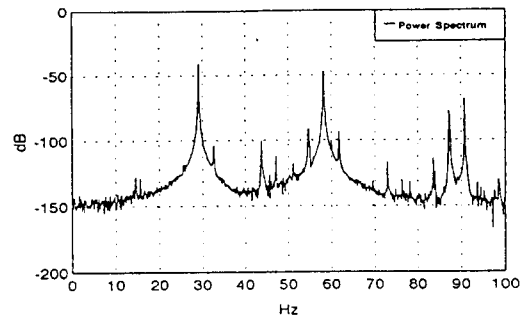


Fig. 13 Power spectrum of floor

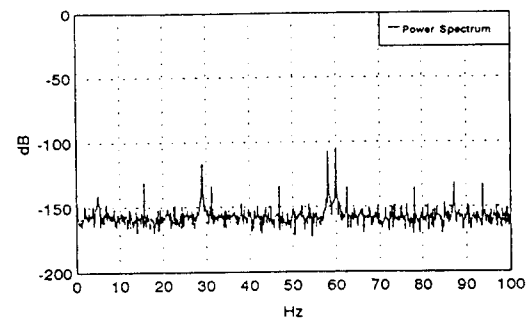


Fig. 14 Power spectrum of isolation table (uncontrolled)

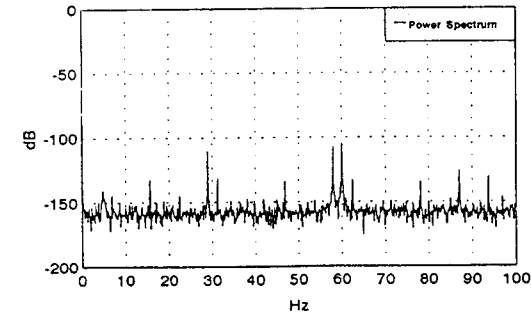


Fig. 15 Power spectrum of isolation table (controlled)

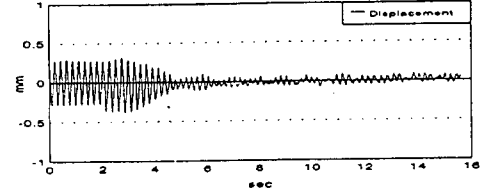


Fig. 16 Displacement of isolation table, before & after control (LQG)

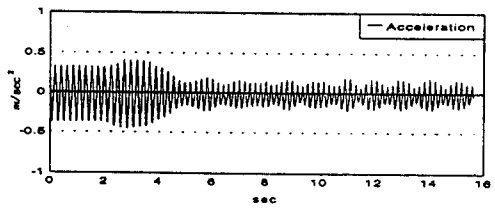


Fig. 17 Acceleration of isolation table, before & after control (LQG)

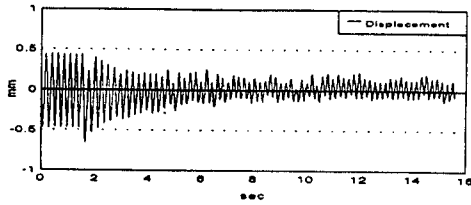


Fig. 18 Displacement of isolation table, before & after control (Fuzzy)

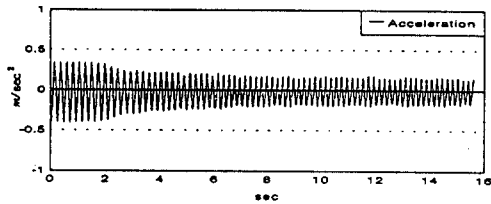
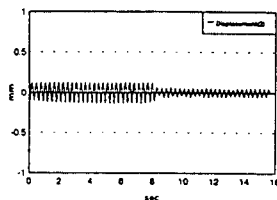
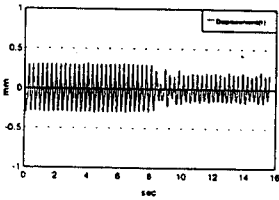
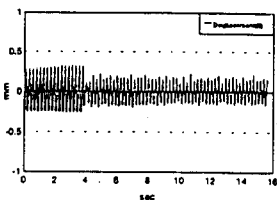
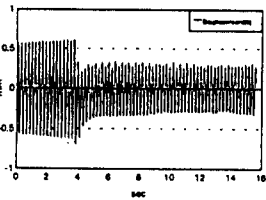


Fig. 19 Acceleration of isolation table, before & after control (Fuzzy)



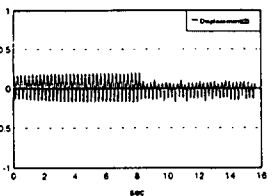
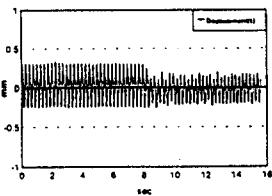
(a) Point of motor excitation (b) Opposite point of motor excitation

Fig. 20 Displacement of isolation table (1.3 kg/cm^2)



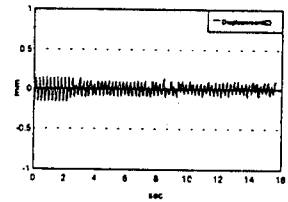
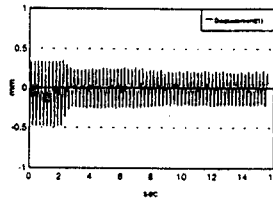
(a) Point of motor excitation (b) Opposite point of motor excitation

Fig. 21 Displacement of isolation table (1.5 kg/cm^2)



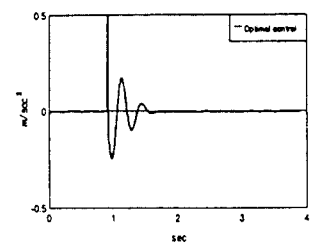
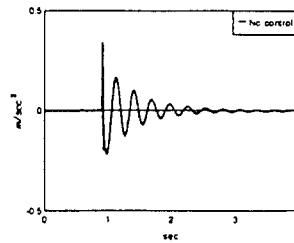
(a) Point of motor excitation (b) Opposite point of motor excitation

Fig. 22 Displacement of isolation table (1.3 kg/cm^2)



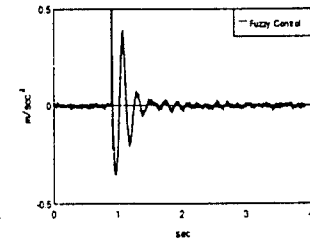
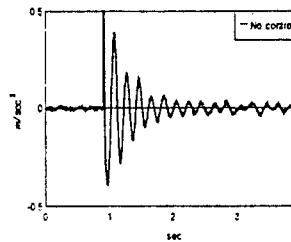
(a) Point of motor excitation (b) Opposite point of motor excitation

Fig. 23 Displacement of isolation table (1.5 kg/cm^2)



(a) Uncontrolled (b) Optimal control

Fig. 24 Impulse test of air-spring isolation table (1.3 kg/cm^2)



(a) Uncontrolled (b) Fuzzy control

Fig. 25 Impulse test of air-spring isolation table (1.5 kg/cm^2)

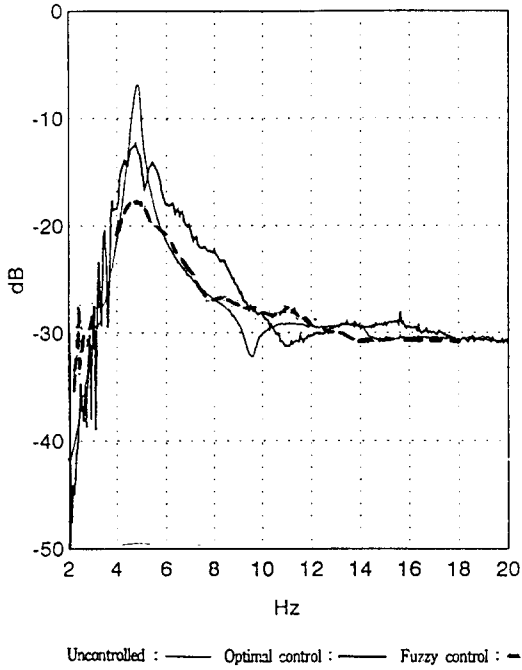


Fig.26 Transfer function of air-spring isolation system (1 dof)

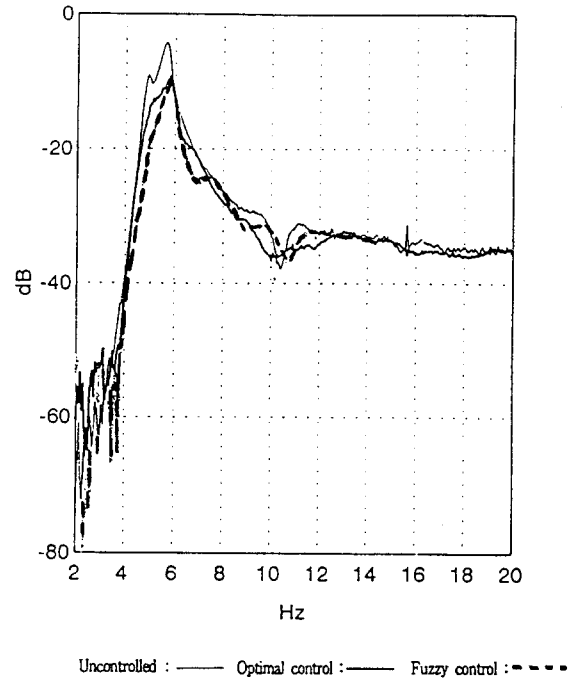


Fig.28 Transfer function of air-spring isolation system (2dof-case 11)

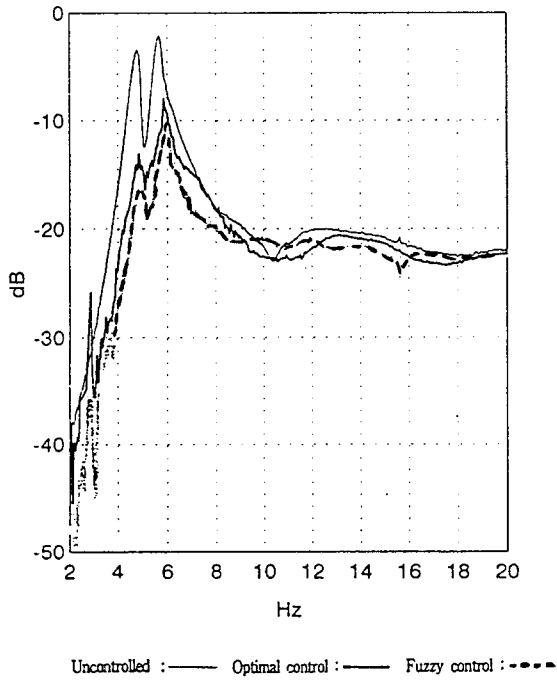


Fig.27 Transfer function of air-spring isolation system (2dof-case 1)