

〈論 文〉

공기스프링 방진대의 능동제어

송진호* · 김규용** · 박영필***

(1993년 9월 8일 접수)

Active Control of Air-Spring Vibration Isolator

Jin-ho Song, Kyu-Yong Kim and Young-Pil Park

Key Words : Air-Spring(공기스프링), Vibration Isolator(방진대), Active Vibration Isolation(능동방진), Optimal Control(최적제어), Fuzzy Control(퍼지제어)

Abstract

Air-spring is widely used in vibration isolation to reduce the table vibration. When a disturbance is applied to a table, however, it starts vibrating with a low frequency, but has a large displacement due to the reacting force of air-spring. In this study, to solve the table vibration problem, an active vibration control device based on state feedback control using air-spring and proportional control valves was designed. This device can suppress the displacement of the isolation table within allowable range, even any kind of disturbances are applied to the table. Firstly, theoretical analysis of an air-spring isolator was done. Secondly, characteristics of the isolator was investigated via computer simulation and experiment. Finally, active control of air-spring isolator was tested using optimal(LQG) and fuzzy control algorithms was performed to show the effectiveness of the control schemes.

기 호 설 명

A_s : 공기스프링 단면적
 \underline{A} : 플랜트행렬
 \underline{B} : 입력행렬
 \underline{C} : 출력행렬
 C, C^* : 공기스프링의 감쇠계수
 c_1, c_2 : 실험상수
 F_a : 외력
 D : 감쇠에너지
 $e(k)$: 상태 관측오차 벡터
 I : 방진대의 회전관성 모멘트
 \underline{I} : 단위행렬
 J : 제어 성능지수

J_{obs} : 관측기 성능지수
 K, K^* : 공기스프링의 강성계수
 K_{pv} : 비례제어밸브의 이득
 \underline{K}_e : 관측기 이득행렬
 M : 방진대의 질량
 N_{ss} : 계의 잡음
 \underline{Q} : 상태벡터의 가중행렬
 \underline{R} : 입력벡터의 가중행렬
 X : 계의 상태벡터
 \hat{X} : 관측 상태벡터
 x : 방진대의 변위
 x_1, x_2 : 방진대 양단의 변위
 T : 운동에너지
 V : 위치에너지
 U : 제어입력 벡터
 y : 출력

* (주)기아자동차

** 정회원, 연세대학교 대학원

*** 정회원, 연세대학교 기계공학과

- ρ : 가중계수
- ΔV : 비례제어밸브의 전압변화
- ΔP : 공기스프링의 압력변화
- 0 : 영행렬

1. 서 론

각종 정밀측정기기와 생산기기 등에 있어서 불가피하게 발생하는 진동문제는 장비나 설비들의 정상적인 가동을 어렵게 하며, 기계효율 저하에 따른 생산성 저하, 생산품 품질저하 등을 초래한다. 또한 갈수록 고정밀도를 필요로 하는 산업이 늘어나고 그 요구 기준도 대단히 엄격해지는 최근의 현실에 비추어 볼 때, 진동문제는 고정밀도를 요구하는 반도체의 제조공정이나 신산업의 개발공정 등에 있어서 결정적인 영향을 주는 요인으로 대두되고 있으며 그 해결방안이 시급히 요구된다.

보통은 진동문제를 해결하기 위하여 고무, 금속 등과 같은 재료를 진동절연요소로 사용하였다. 그러나 이러한 요소들은 고유진동수가 비교적 높아서 저주파영역의 진동에 효과적으로 대처하지 못하는 한계를 지니고 있으며, 에너지 저장능력이 제한적이므로 많은 내부에너지가 요구되는 진동절연시에는 그 크기가 매우 커져야 하는 단점이 있다. 근래에 들어서 기존 절연요소들의 단점을 극복하고자 공기스프링을 사용한 제진 및 방진에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 공기스프링은 압축공기를 탄성물질로 사용하여 낮은 강성을 유지하면서 하중 지지에 필요한 압력까지 압축될 수 있기 때문에 큰 정적변위가 요구되지 않는다. 또한 공기는 금속이나 고무 등의 재료에 비하여 단위질량당 에너지 저장능력이 뛰어나기 때문에 진동흡수에 유리한 장점을 지니고 있다.

최근 공기스프링을 진동절연요소로 이용, 방진대를 구성하여 정밀기기에 외부진동전달을 방진하는 수단으로서 많이 사용하고 있으며 이에 대한 많은 연구가 수행되고 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, 공기스프링 자체가 갖는 낮은 감쇠비로 인하여 안정상태에 도달하는데 비교적 긴 시간이 걸리게 된다.

이러한 수동제진상태의 한계를 극복하고자, 岩田 義明^(13~16)은 작동기요소로 비례제어밸브와 공기스프링을 사용하여 상태귀환제어를 행하였고, Takagami⁽¹²⁾는 공압실린더를 작동기로 사용하여 1자유도 능동형 방진시스템을 구성하였고, 鎌田 徹⁽¹⁷⁾은 보이스코일모터(VCM)로 전자기력을 발생시켜서 공기스프링 방진대의 상태귀환제어를 행하였으며, Makoto Ohshio⁽¹⁸⁾는 공기스프링 방진대에 서보밸브(servo valve)를 부착하여 능동방진대를 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 제어계를 구성한 후, 최적제어 및 퍼지제어 알고리즘을 적용하여 능동제어를 하였다.

2. 공기스프링 방진시스템

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

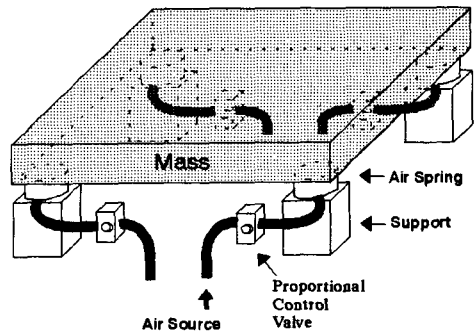


Fig. 1 Schematic diagram of air-spring isolation table

과 감쇠성분 그리고 작동기성분의 복합체로서 사용되고 있다.

3. 공기스프링 방진대의 모델링

3.1 1자유도 진동 모델링

4개의 비례제어밸브에 같은 입력전압을 주어 4개의 공기스프링을 동기화시켜 공기스프링 방진대를 1자유도 진동계로 모델링하였다.

비례제어밸브에 일정한 전압을 인가하여 공기스프링내 일정 압력을 준 경우 병렬연결된 공기스프링이 갖는 강성상수를 K , 감쇠상수를 C 로 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 비선형특성을 가지고 있으므로 비례제어밸브에 인가되는 입력전압과 공기스프링내에 압력간의 관계를 2차 미분방정식으로 단순화하여 아래의 관계식으로 모델링한다.

$$F_a = A_s \Delta P$$

$$\Delta P = \frac{1}{K_{pv}} (\Delta \ddot{P} + c_1 \Delta \dot{P} + c_2 \Delta P) \quad (2)$$

여기서,

K_{pv} : 공기스프링내의 압력 — 비례제어밸브 입력 전압간의 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 다음의 식(3)과 같다.

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

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 상태공간 방정식을 표현할 수 있다.

$$\dot{X} = \underline{A}X + \underline{B}U$$

$$y = \underline{C}X \quad (4)$$

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

$$U = -\underline{K}X \quad (5)$$

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 같은 식(3)으로 주어진다. 대상계의 운동방정식과 작동기방정식을 이용하여 상태공간 방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{X} = \underline{A}X + \underline{B}U$$

$$y = \underline{C}X \quad (6)$$

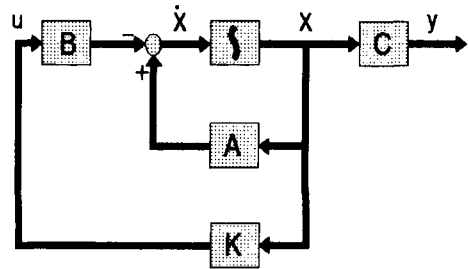


Fig. 2 Block diagram of state space feedback control

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

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ B_{71} & B_{72} \\ B_{81} & B_{82} \end{bmatrix}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

$$A_{78} = \frac{\beta \cdot C}{\alpha^2 - \beta^2}$$

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

$$A_{84} = A_{73}, \quad A_{85} = A_{76}, \quad A_{86} = A_{75}$$

$$A_{87} = A_{78}, \quad A_{88} = A_{77}$$

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

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

위의 상태공간 모델에 제어이론을 이용하여 구현 귀환이득행렬 K 를 구하여 입력을 결정한다. 상태 귀환 제어제의 블록선도는 Fig. 2와 같다.

3.3 디지털제어를 위한 계의 이산화

앞절에서 다룬 제어시스템을 연속시간 제어시스템

(continuous-time control system)이다. 따라서, 컴퓨터를 이용하여 디지털제어를 수행하려면 연속 시간계에서의 상태공간 방정식을 이산시간계의 상태방정식으로 바꾸어야 한다. 샘플링시간은 T 로 하고 영차홀더(zero-order holder)를 사용하면 다음과 같이 표현되는 이산화된 상태방정식을 얻는다.

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

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

$$\underline{A}_d = e^{AT}, \quad \underline{B}_d = \int_0^T e^{A^t} \underline{B} dt \quad (7)$$

3.4 관측기의 설계

상태변수를 이용한 제어에서는 모든 상태변수를 측정, 제어이득을 곱하여 이를 귀환시켜야 하나, 실제적으로 측정이 불가능하거나, 노이즈 등 제약이 따르는 경우에는 계의 출력과 입력을 이용하여 미지의 상태변수를 추정(estimate)하는 관측기를 사용한다. 실제로 식(3)과(6)의 상태공간 방정식에서 상태변수들을 모두 측정하는 것은 불가능하므로 측정하지 못하는 상태량만을 추정하는 관측기를 설계한다. 관측기는 모델링 오차와 추정하는 상태변수가 실제의 상태변수를 수렴하는데 필요한 시간 때문에 발생하는 제어의 비효율성을 줄이기 위해 측정가능한 상태변수를 제외한 상태변수만을 추정하는 최소차 관측기를 사용한다.

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

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

$$y(k) = \begin{bmatrix} I & O \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X_1(k) \\ X_2(k) \end{pmatrix} \quad (8)$$

최소차수 관측기는 다음식과 같이 나타난다.

$$X_2(k+1) = [A_{22} - K_e A_{12}] X_2(k) + A_{21} \cdot X_1(k) + B_2 u(k) + K_e [X_1(k+1) - \underline{A}_{11} X_1(k) - \underline{B}_1 u(k)]$$

여기서,

$$K_e : \text{관측기 이득행렬} \quad (9)$$

예측형태 관측기를 구성하기 위해서, 새로운 상태변수 $Z(k) = X(k) - K_e y(k)$ 을 이용하여 식(9)를 다시쓰면 다음과 같은 예측형태의 최소차수 관측기

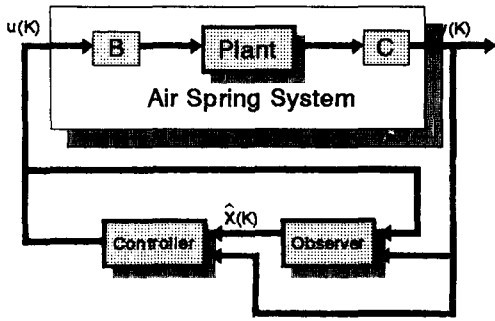


Fig. 3 Observed-state feedback control with minimum order observer

식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 Z(k+1) &= \underline{A}_{obs}Z(k) + \underline{B}_{obs}u(k) + \underline{C}_{obs}y(k) \\
 \underline{A}_{obs} &= \underline{A}_{22} - \underline{K}_e \underline{A}_{12} \\
 \underline{B}_{obs} &= \underline{B}_2 - \underline{K}_e \underline{B}_1 \\
 \underline{C}_{obs} &= \underline{A}_{22} \underline{K}_e - \underline{K}_e \underline{A}_{12} \underline{K}_e + \underline{A}_{21} - \underline{K}_e \underline{A}_{11}
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

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

4. 제어이론

방진대 모델링에 대하여 최적제어(optimal control)와 퍼지제어 알고리즘을 적용하였다. 공기스프링 방진대의 상태공간 방정식을 구축조건으로 하고 주어진 성능지수함수를 최소화하는 LQG (linear quadratic gaussian) 제어방법을 사용하여 최적추정 및 최적제어를 수행하였다.⁽⁸⁾ 한편, 최적제어이론은 제어이득의 계산이나 가중치의 선정과정에 있어서 여러번의 시행착오법을 거쳐야 하고, 계의 파라미터변화에는 잘 대처하지 못하는 단점을 보완하기 위하여 대상계와 작동기의 동적 거동을 언어적으로 표현하고 추론하여 제어에 적용하는 퍼지제어방법을 사용한다.

4.1 최적제어

4.1.1 성능지수의 선정

상태방정식에서의 상태변수의 제곱과 제어입력의 제곱에 각각 가중치를 곱하여 합을 시간에 대해 적분한 함수를 성능지수(performance index)로 취하고 이를 최소화하는 최적 귀환이득행렬을 구한다.

성능지수는 공기스프링 방진테이블 양단의 변위, 속도, 가속도, 저크항 그리고 제어입력의 합으로 선정하였다.

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

여기서,

\underline{Q} : 상태벡터에 대한 가중행렬 (11)

\underline{R} : 제어입력에 대한 가중행렬

$$\underline{Q} = \begin{bmatrix} \rho_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \rho_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \rho_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \rho_5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \rho_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \rho_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \rho_8 \end{bmatrix}$$

$$\underline{R} = \begin{pmatrix} \rho_9 & 0 \\ 0 & \rho_{10} \end{pmatrix}$$

정상상태 제어대수 리카티(CARE) 식은 다음과 같이 주어진다.

$$\underline{A}_d^T \underline{P} \underline{A}_d + \underline{Q} - \underline{A}_d^T \underline{P} \underline{B}_d + [\underline{B}_d^T \underline{P} \underline{B}_d + \underline{R}]^{-1} \underline{B}_d^T \underline{P} \underline{B}_d = 0
 \tag{12}$$

식(12)에서 구한 \underline{P} 를 이용하여 귀환이득행렬 \underline{K} 를 구한다.

$$\underline{K} = -[\underline{R} + \underline{B}_d^T \underline{P} \underline{B}_d]^{-1} [\underline{B}_d^T \underline{P} \underline{A}_d]
 \tag{13}$$

따라서 정상상태 최적 제어력 $u(k)$ 는

$$u(k) = -\underline{K}x(k)
 \tag{14}$$

로 결정한다.

4.1.2 최적 최소차 관측기의 설계

본 연구에서는 측정하지 않는 상태변수들의 최적 추정을 하는데 있어 신호처리시 포함되는 노이즈(noise) 및 생략되거나 또는 고려하지 않는 계의 효과가 고려되도록 관측오차를 최소로 하는 조건에 의해 \underline{K}_e 를 구하는 예측형태의 칼만부쉬필터(Kalman Bucy filter)를 사용하였다.

4.2 퍼지제어

4.2.1 퍼지추론

퍼지추론(fuzzy interface)은 규칙과 기존의 사실

로부터 새로운 사실을 얻어내는 과정을 말한다. 제어에서의 퍼지추론은 제어대상계에서 일어나는 현상에 대한 판단기준을 정하여 주는 것으로 컴퓨터에 의한 제어를 수행하는 경우 제어설계자가 대상계의 상태에 대한 가중치와 판단기준을 정해주기 때문에 설계자의 판단과 비슷한 추론을 할 수 있게 되어 애매한 기준을 갖는 경우에 대해 그 계의 영향을 알고 있고 어느정도 판단기준만 정할 수 있으면 퍼지추론은 가능해진다. 퍼지추론은 전문가의 지식과 경험이 많이 포함되는 부분으로 대부분의 경우 룰형(rule type) 퍼지추론을 사용한다

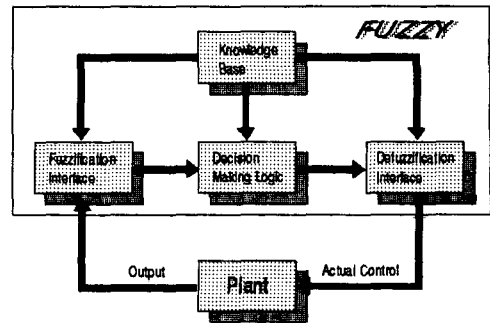


Fig. 4 Fuzzy logic controller

4.2.2 퍼지논리제어

퍼지논리 제어기(fuzzy logic controller)의 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.

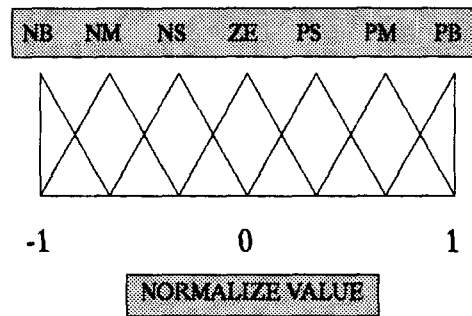


Fig. 5 Fuzzy set

4.2.3 퍼지화

퍼지화(fuzzification)는 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 멤버쉽(membership)함수의 모양은 정규분포와 유사한 모양으로 계산이 간단하고 노이즈에 강한 이점을 지닌 삼각형(triangular)을 채택하였다. Fig. 5는 퍼지집합을 나타낸다.

4.2.4 결정논리

결정된 퍼지집합을 이용하여 설계자가 알고있는 지식을 바탕으로 퍼지추론을 행하여 결정논리(decision making logic)를 정한다. 제어에 대하여 설계자가 생각할 수 있는 기본적인 논리를 확장하여 7개의 원소로 구성된 퍼지집합에 대하여 퍼지규

	PB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	ZE
μ_B	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

칙(fuzzy rule)을 구성하면 Fig. 6과 같다.

4.2.5 역퍼지화

역퍼지화(defuzzification)는 애매한 출력값을 애매하지 않은 제어값으로 대응시키는 것을 말한다. 그러므로, 추론된 퍼지제어값으로부터 가장 높은 가능성 분포를 갖는 애매하지 않은 제어값을 만들어내는 것을 목표로 한다. 퍼지집합 원소가 정규화된 값의 범위에 대하여 멤버쉽함수가 구성되어 있으므로 임의의 시점에서의 제어량인 변위와 속도는 각각 2가지의 퍼지집합원소(fuzzy set member)에

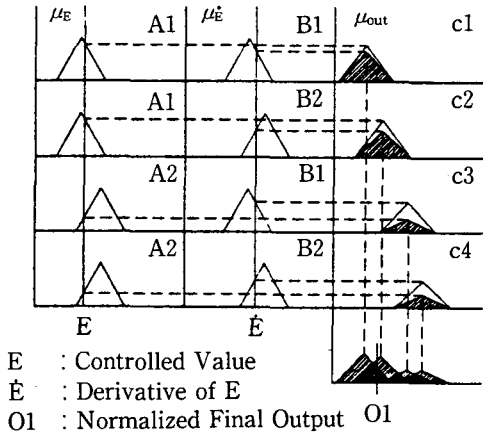


Fig. 7 Max-product method

속하게 된다. 출력값을 산출하는 방법으로는 Fig. 7에 도시한 최대 내적방법(max product method)을 사용하였다. 최대 내적방법에 의해 산출된 값은 식(15)를 사용, 역정규화하여 제어입력을 결정한다.

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

여기서,

- u_{out} : 역퍼지화한 제어입력
- α : 출력 가중계수
- X : 퍼지한 출력

5. 실험장치 및 방법

공기스프링 방진대의 1자유도 및 2자유도 모델에 대한 능동제어실험은 방진테이블 상단에 충격가진과 모터에 의한 주기적 가진의 두가지 외란이 주어지는 경우에 대하여 실시하였다. 실험에 사용한 공기스프링 방진대의 제원은 Table 1과 같다.

실험장치의 구성은 Fig. 8, 9와 같다. 레이저변위계로 측정된 방진대 상단의 변위신호는 앰프를 통과하여 증폭된 후 저주파 대역통과필터를 거쳐 고

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 kgf/cm ²

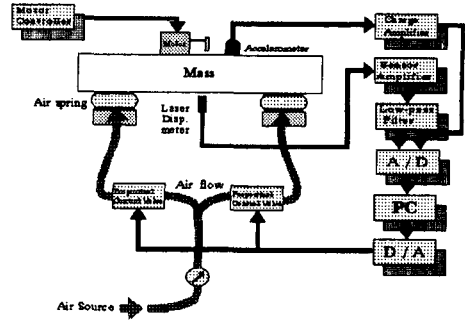


Fig. 8 Schematic diagram of 1 dof experimental set-up

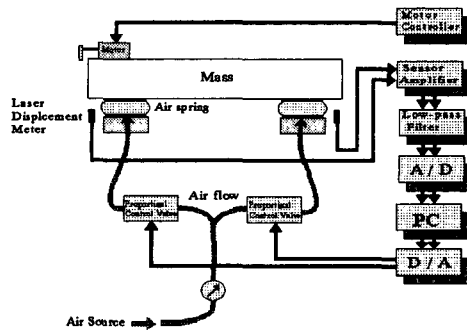


Fig. 9 Schematic diagram of 2 dof experimental set-up

주파성분의 잡음을 제거한다. 또한 방진대 상단에 설치한 가속도센서로부터 신호를 얻는다. 이 두신호는 12 bit 해상도를 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 작동하도록 동기화시켜 제어하였다.

6. 결과 및 고찰

6.1 제진성능실험

바닥에서 들어오는 외란에 대한 방진대의 진동절연성능을 측정하는 실험을 하여 공기스프링 방진대의 제진성능을 평가하였다. 실험은 공기스프링의 공기압력원인 콤프레서(compressor)를 방진대와 인접한 위치에서 작동시켜 공기압축기의 진동원이 바닥을 통하여 방진대로 전달될 수 있도록 한후 방진대의 바닥과 방진대 위에서의 가속도를 측정, 비

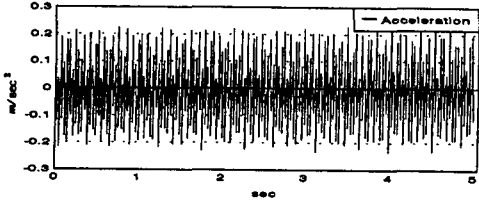


Fig. 10 Floor acceleration due to compressor excitation

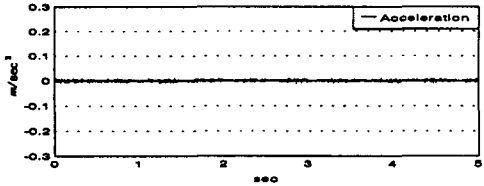


Fig. 11 Acceleration of uncontrolled isolation table

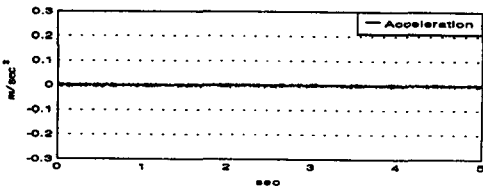


Fig. 12 Acceleration of controlled isolation table

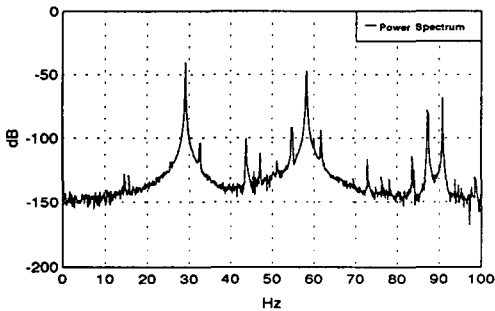


Fig. 13 Acceleration power spectrum at the floor

교하였다. (Fig. 10~12) 측정결과를 시간영역에서 비교하면 바닥면이 0.4 m/sec^2 (40 gal) 정도의 진폭을 갖는 반면 (Fig. 10), 방진테이블 상단에서는 0.02 m/sec^2 (2 gal) 정도의 진폭을 가졌다. (Fig. 11) 제어를 실시한 경우의 방진테이블 상단의 진동가속도는 수동의 경우와 유사하게 나타났다. (Fig. 12) 바닥진동에 대한 방진테이블의 진동절연성능을 파악하기 위한 방법으로 주파수영역에서 진동신호의 파워스펙트럼을 측정하였다. (Fig. 13~15) 공기

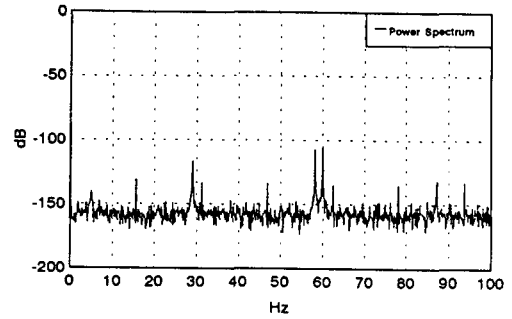


Fig. 14 Acceleration power spectrum of uncontrolled isolation table

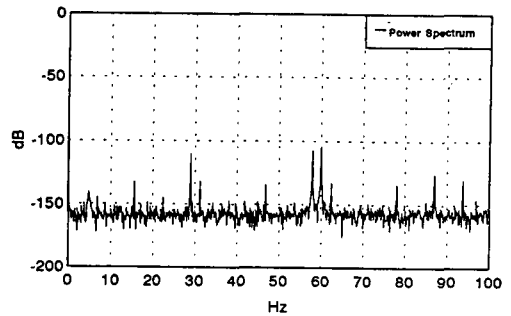


Fig. 15 Acceleration power spectrum of controlled isolation table

스프링의 기준압력이 1.5 kgf/cm^2 인 경우에는 방진대의 고유진동수가 4.876 Hz에서 존재하며, 실험 결과를 보면 공진주파수 이상의 영역에서는 제진성능이 뛰어난 것을 알 수 있다. (Fig. 14, 15) 전체적으로 볼 때, 공기스프링 방진대는 바닥에서 전달되는 진동에 대해 수동과 능동제진 상태에서 뛰어난 제진성능이 있음을 확인하였다.

6.2 |자유도 모델 주기적 가진실험

6.2.1 최적제어

공기스프링 방진대의 중앙에 설치한 편심질량로터의 회전에 의하여 상하방향으로 가진한 경우에 대하여 방진대 중앙에서 변위와 가속도를 측정하고 속도, 저크항은 최소차 관측기를 사용하여 능동방진실험을 하였다. 실제의 외란과 관측잡음은 일정한 주파수 특성을 갖는 도색잡음 (colored noise) 이나 이에 대한 정량적인 가중치를 고려하여 최적 관측기 이득을 구하는 것은 실제로 매우 어려운 작업이므로 외란과 관측잡음이 백색잡음 (white noise)

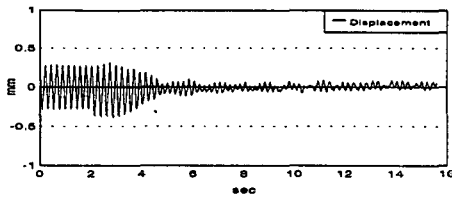


Fig. 16 Displacement of isolation table, before and after LQG control

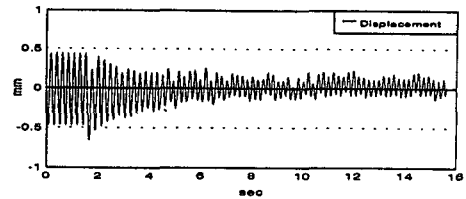


Fig. 18 Displacement of isolation table, before and after fuzzy control

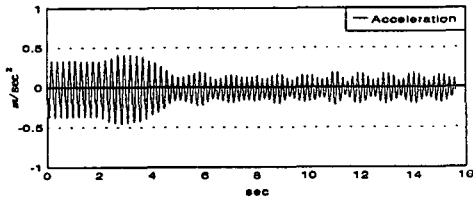


Fig. 17 Acceleration of isolation table, before and after LQG control

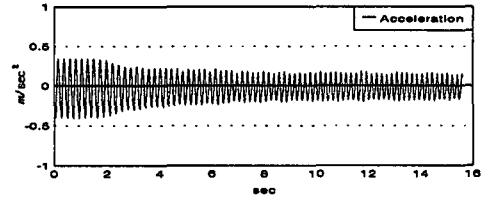


Fig. 19 Acceleration of isolation table, before and after fuzzy control

이라 가정하에서 칼만필터 개념을 이용하여 관측기 가중치행렬을 변화시켜가면서 관측기 이득을 구한 후 모의실험을 통하여 적절한 관측기 이득을 정하였다. 최적 귀환이득은 작동기의 안정영역내에서 제진성능을 만족시키는 적절한 값을 선정하였다. 성능지수는 상태변수에 관계된 $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4$ 는 고정시키고 제어입력에 관련된 ρ_5 를 변화시키면서 선정하였다.

공기스프링내의 기준압력이 1.5 kgf/cm²인 경우 제어대상계의 공진주파수가 4.876 Hz이므로 편심 질량모터의 가진주파수는 4~6 Hz범위에서 변화시키면서 단일주파수 가진실험을 실시하였다.

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

6.2.2 퍼지제어

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

$$u_a = \frac{A}{|A_{max}|}, u_j = \frac{J}{J_{max}}$$

여기서,

A : 공기스프링 방진테이블의 가속도

A_{max} : 공기스프링 방진테이블의 최대 가속도

u_a : 공기스프링 방진테이블의 정규화된 가속도

J : 공기스프링 방진테이블의 가속도의 변화율

J_{max} : 공기스프링 방진테이블의 가속도 최대 변화율

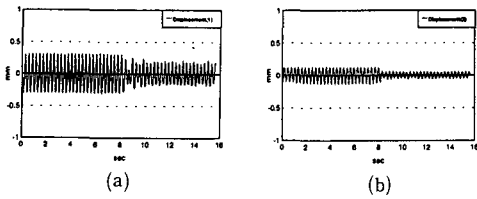
u_j : 공기스프링 방진테이블의 정규화된 가속도 변화율

역퍼지화는 1차 함수를 사용하였고, 제어입력의 크기를 결정하는 출력이 중계수를 변화시키면서 제어성능을 검토하였다. 출력 가중계수가 커질수록 방진효과는 우수해지지만 많은 제어입력을 필요로 하며 어느 정도이상 커지면 제어대상계가 불안정해질 수 있으므로 실험에서는 출력 가중계수는 2.5로 하였다. 샘플링주파수는 200 Hz로 하였다. Fig. 18, 19는 4.5 Hz의 외란을 지속적으로 가하는 조건하에서 제어전후 방진대 상단 중앙에서의 변위와 가속도의 변화를 나타내었다. 제어가 시작되면서 정상상태에 도달하는 데에 약 1초가 필요하였다.

6.3 2자유도 모델 주기적 가진실험

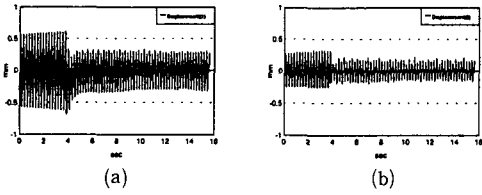
6.3.1 최적제어

공기스프링 방진대 상단의 한쪽단에 설치한 편심



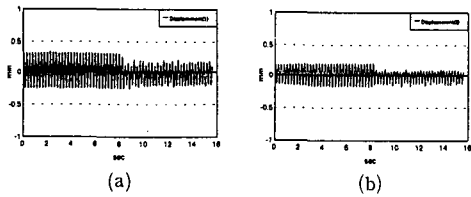
(a) Motor excitation point
(b) Opposite side of motor excitation point

Fig. 20 Displacement of isolation table when air pressure is 1.3 kgf/cm²(using LQG control)



(a) Motor excitation point
(b) Opposite side of motor excitation point

Fig. 21 Displacement of isolation table when air pressure is 1.5 kgf/cm²(using LQG control)

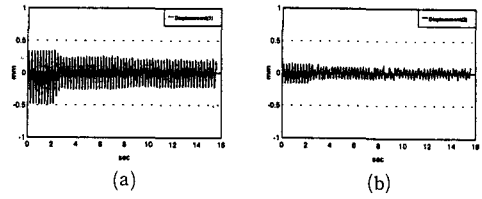


(a) Motor excitation point
(b) Opposite side of motor excitation point

Fig. 22 Displacement of isolation table when air pressure is 1.3 kgf/cm²(using fuzzy control)

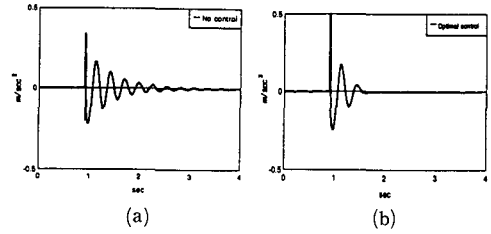
질량모터를 공진부근 주파수에서 작동하여 상하방향 가진력을 발생시켜서 이를 외란으로 준 경우, 가진한 쪽과 그 반대쪽의 변위들을 측정하고 양단의 속도, 가속도, 저크항은 최소차 관측기를 이용하여 관측하여 능동방진실험을 실시하였다.

공기스프링내의 기준압력이 1.3 kgf/cm²인 경우 제어대상계의 1차와 2차 공진주파수는 3.68Hz와 4.37 Hz로 측정되었고, 편심질량모터를 3.875Hz로 가진실험을 실시한 경우, 제어 전후의 방진대 상단 양쪽끝에서의 변위를 Fig. 20에 도시하였다. 편심질량모터가 달린 쪽의 변위는 초기 1.5초간은 과도응답현상이 다소 나타나나 반대쪽의 변위는 바로 안정한 상태에 도달하며 진폭도 반 이상 줄어들음을



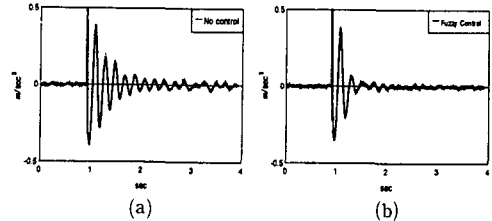
(a) Motor excitation point
(b) Opposite side of motor excitation point

Fig. 23 Displacement of isolation table when air pressure is 1.5 kgf/cm²(using fuzzy control)



(a) Uncontrolled
(b) Optimal control

Fig. 24 Impulse response of isolation table when air pressure is 1.3 kgf/cm²



(a) Uncontrolled
(b) Fuzzy control

Fig. 25 Impulse response of isolation table when air pressure is 1.5 kgf/cm²

알 수 있다.

공기스프링내의 기준압력이 1.5 kgf/cm²인 경우 제어대상계의 1차와 2차 공진주파수는 4.876 Hz와 5.87Hz이고, 편심질량모터의 가진주파수를 5Hz로 가진실험을 실시한 경우, 제어 전후의 방진대 양단에서의 변위를 Fig. 21에 표시하였다. 가진점과 반대쪽의 변위 모두 제어 시작후 0.5초가 지나면 정상상태에 도달하였다.

6.3.2 퍼지제어

방진대 양단의 변위를 레이저변위센서로 측정, 변위를 수치적으로 미분하여 변위와 변위변화율로 사용하였다. 공기스프링내의 기준압력이 1.3 kgf/

cm²인 경우 편심질량모터를 3.875 Hz로 작동시켜 실험한 경우, 제어 전후의 방진대 테이블 양쪽끝에서의 변위를 Fig. 22에 나타내었다. 또한 기준압력이 1.5 kgf/cm²인 경우 편심질량모터를 5.25 Hz로 가진한 경우, 제어전후의 방진대 상단 양쪽끝에서의 변위를 Fig. 23에 나타내었다. 편심질량모터가 달린쪽과 반대쪽의 변위 모두 제어 시작후 0.5초 이내에 정상상태에 도달함을 알 수 있었다.

6.4 충격 가진실험

외부로부터 충격이 가해지는 경우에 공기스프링 방진대의 방진성능을 측정하고자 충격 가진실험을 실시하였다. 1자유도 모델에 대하여 최적제어와 퍼지제어를 적용하였다. Fig. 24는 공기스프링내의 기준압력이 1.3 kgf/cm²인 상태에서 퍼지제어 결과로서 가속도를 시간영역에서 나타내었다. 1.3 kgf/cm²의 실험결과에 비하여 주기가 약간 빨라졌으며 제어의 영향은 최적제어의 결과와 유사하게 나타났다.

6.5 전달함수 실험

6.5.1 1자유도 진동계의 전달함수

충격망치(impact hammer) 가진에 의한 방진대

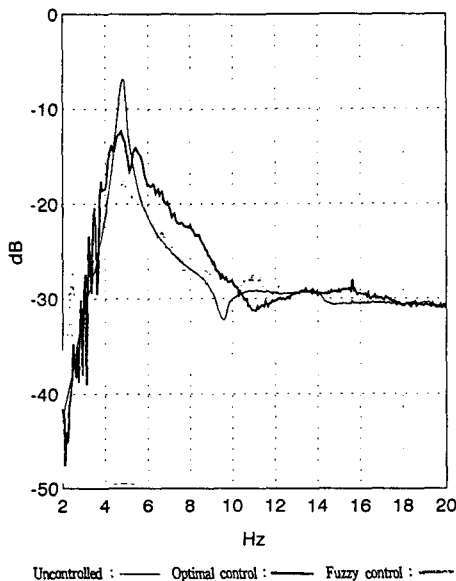


Fig. 26 Transfer function of a 1dof model of isolation system

의 가속도응답을 구하였다. 1자유도에 대한 실험방법은 충격망치로 방진대의 중앙점을 가진하고, 가속도계를 이용하여 측정하는 구동점 가속도(accelerance)를 구하였다. Fig. 26은 제어하지 않는 경우, 최적제어, 퍼지제어에 대한 계의 전달함수를 각각 보여주고 있다.

6.5.2 2자유도 진동계의 전달함수

6.5.1의 실험과정과 유사하게 2자유도 진동계에 대해서도 전달함수를 측정하였다. 구동점에 대한

Table 2 Dynamic characteristics of 1 d.o.f model

	Natural frequency	Magnitude	Damping coefficient
Uncontrolled	4.8125 Hz	-6.8032 dB	0.02
Optimal control	4.7500 Hz	-12.335 dB	0.17
Fuzzy control	4.5625 Hz	-17.851 dB	0.31

Table 3 Dynamic characteristics of 2 d.o.f model (case I)

	Natural frequency	Magnitude	Damping coefficient
Uncontrolled	4.8125 Hz	-3.4284 dB	0.02
	5.6875 Hz	-2.1017	
Optimal control	4.8750 Hz	-13.0984 dB	0.12
	5.8750 Hz	-7.8520 dB	
Fuzzy control	4.9375 Hz	-15.8712 dB	0.16
	6.0000 Hz	-10.1014 dB	

Table 4 Dynamic characteristics of 2 d.o.f model (case II)

	Natural Frequency	Magnitude	Damping Coefficient
Uncontrolled	4.9375 Hz	-8.9664 dB	0.02
	5.6875 Hz	-4.1860 dB	
Optimal control	5.8125 Hz	-9.3209 dB	0.12
Fuzzy control	5.8125 Hz	-8.7984 dB	0.16

전달함수(case I)와 구동점 반대편 점의 전달함수(case II) 2개를 측정하였으며 Fig. 27와 Fig. 28는 이의 결과를 보여주고 있다.

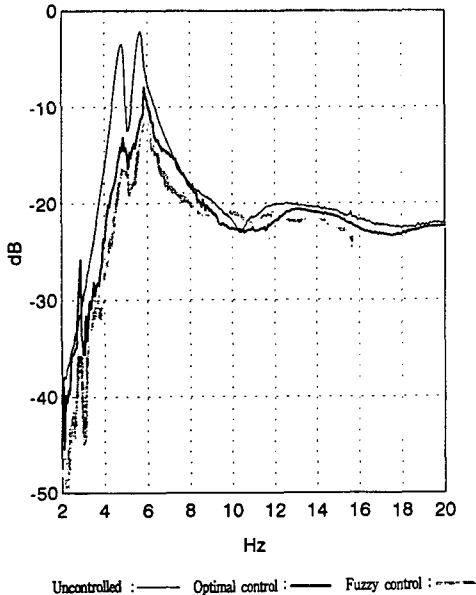


Fig. 27 Transfer function of a 2dof model of isolation system (case I)

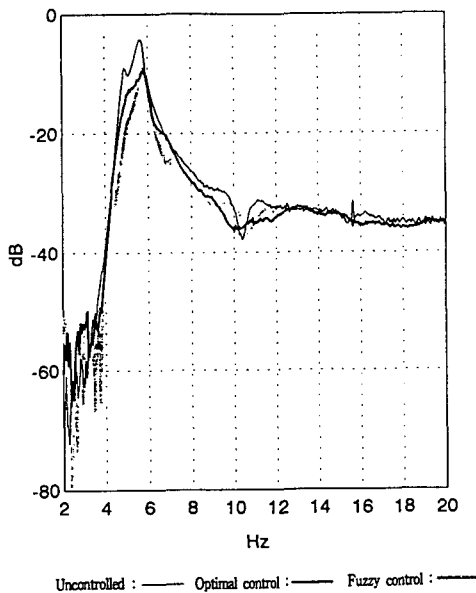


Fig. 28 Transfer function of a 2dof model of isolation system (case II)

7. 결 론

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

(1) 공기스프링을 사용한 방진대는 바닥에서 들어오는 진동에 대하여 뛰어난 제진성능을 갖고 있다.

(2) 공기스프링 방진대가 주기적인 가진 및 충격 가진을 받는 경우, 능동제어에 의해 효과적인 방진성능을 얻을 수 있었다.

(3) 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.

참고문헌

- (1) Ogata Katsuhiko, 1987, *Discrete-Time Control System*, Prentice-Hall Inc..
- (2) Franklin Gene F., Powell J. David and Addbs Emami-Naeini, 1990, *Digital Control of Dynamic System*, Addison-Wilely 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, *メカニカル システム 制御*, オ-ム社, pp. 64~78.
- (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 로봇트팔 진동의 능동 제어," 연세대학교 공과대학 기계공학과 박사학위논문.
- (10) 손태규, 1992, "전자기력을 이용한 능동제진

장치의 제어알고리즘,” 연세대학교 공과대학 기계공학과 석사학위논문.

- (11) 김재원, 1992, 퍼지로직에 의한 유연한 단일 링크 로봇의 진동제어, 연세대학교 공과대학 기계공학과 석사학위논문.
- (12) Takagami Teruo and 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 真, 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點支持 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 御, 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*.