

< 논 문 >

정밀기기가 탑재된 방진대의 주파수성형 슬라이딩모드 제어 Frequency-shaped Sliding Mode Control of Isolation Table Equipped with Precision Devices

김 효 준[†] · 박 영 필*

Hyo-Jun Kim and Young-Pil Park

(2001년 9월 24일 접수 : 2001년 12월 22일 심사완료)

Key Words : Frequency-shaped(주파수성형), Sliding Mode Control(슬라이딩모드 제어), Vibration Isolation Table(방진테이블), Optimal Sliding Surface(최적슬라이딩면)

ABSTRACT

This paper presents the design of an active vibration suppression controller for an air-spring type vibration isolation table. Firstly, isolation system model is constructed considering the isolation table, attached equipment and voice-coil actuator. An active control system is designed based on frequency-shaped sliding mode control theory regarding high frequency uncertainties with respect to attached equipments on the isolation table. Finally, the performance of the active isolation system is evaluated by simulation under some disturbance conditions which are transmitted from base structure of the isolation system.

기호설명

- Ae, Be : 부가 시스템행렬
 Qe, Ne, Re : 부가시스템 가중행렬
 $R(w)$: 주파수성형 가중함수
 Va : 제어전압
 f : 일반화된 플랜트
 k : 제어기게인
 $s(\)$: 최적 슬라이딩면
 $sgn(\)$: 싸인(signum) 함수
 $sat(\)$: 포화함수
 z : $R(s)$ 의 상태벡터
 ϕ : 경계층 두께

1. 서 론

현대 산업의 급속한 발전과 더불어 고집적, 초정밀 기술의 적용이 활발히 이루어지고 있다. 대표적인 고집적 제조 공정인 반도체 생산이나 초정밀 측정 등의 분야에서는 상시 진동이 존재하는 환경하에서도 계속 정밀도 및 생산 품질을 확보하기 위하여 저진동화 기술의 적용이 필수적이다. 따라서 지지 구조물로부터 전달되는 외란에 대해 진동의 크기를 감소시키고 궁극적으로 부진동에 가까운 방진 시스템의 적용이 요구된다.

일반적인 공기 스프링 방진대는 허용중량이 크고 고유진동수를 낮게 설정할 수 있어 활용예가 많으나 감쇠비가 0.1~0.3 정도로 외란에 의한 영향이 사라지는데 많은 시간이 소요되며, 지지 강성이 작아 충격과 같은 외란에 대해 쉽게 진동하는 단점을 가지게 된다.

[†] 책임저자, 정회원, 국립삼척대학교 기계공학과
E-mail : hjkim@samchok.ac.kr
Tel : (033) 570-6322, Fax : (033) 574-2993

^{*} 정회원, 연세대학교 기계·전자공학부

따라서 이러한 단점을 보완하기 위하여 능동 방진 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔는데, Takagami, T.⁽¹¹⁾는 서보 밸브를 이용하여 공기압 조절 방식으로 능동제어에 대한 연구를, Tabata, F.⁽¹²⁾ 등은 보이스 코일 모터(voice coil motor)를 사용하여 공기 스프링 방진대의 최적 제어를 이용한 능동 제어 결과를 발표하였으며, Misuhashi, K.⁽⁹⁾는 가진력의 추정 알고리즘을 이용한 연구를 수행하였고, Cui, W.⁽¹⁰⁾는 공기압 조절 밸브와 전자식 작동기를 이용한 방진대의 부상위치 및 진동제어를 동시에 수행한 결과를, 박영필⁽¹¹⁾은 비례제어밸브를 이용한 최적제어, 버지제어를 적용한 결과를 발표하는 등 능동 방진대에 대한 다수의 연구결과가 발표되었다.

능동 방진 시스템에 있어 방진대 자체의 제진뿐 아니라 이에 탑재된 초정밀 기기에 대한 영향을 고려하여, 모델링되지 않은 고주파 모드(unmodelled high frequency dynamics)의 불확실성이 상존하는 시스템의 제어환경 하에서 동상적인 능동제어의 경우 발생할 수 있는 제어입력의 고과모드에 대한 영향 혹은 피아의 경우 발생할 수 있는 스프리우버(spillover) 불안정화 현상에 효과적으로 대응할 수 있는 제어 시스템의 개발이 요구된다.

본 연구에서는 공기 스프링으로 지지되며, 보이스 코일 모터로 구동되는 능동 방진대와 이에 탑재된 기기들을 포함한 방진 시스템 모델을 기반으로, 탑재 기기들로 인한 고주파 영역의 불확실성을 고려하여 고주파 영역에서의 제어에 페널티를 주므로써 이 영역에서의 제어 영향을 억제하고, 스프리우버 현상을 억제할 수 있는 제어기법인 주파수 형성 슬라이딩 모드 제어(frequency shaped sliding mode control) 이론을 적용한 제어기를 설계하고, 방진 시스템 모델에 적용한 시뮬레이션을 통해 제어 특성을 고찰하였다.

2. 방진 시스템의 모델링

구조물위에 공기 스프링으로 지지된 테이블과 방진 테이블에 탑재된 기기를 포함한 방진 시스템을 지지 구조물로부터의 외란과 테이블 및 탑재 기기들의 수직 운동을 고려하여 Fig. 1과 같이 모델링하였다.

방진대를 지지하는 공기 스프링은 내부 압력과 변위 간의 관계식이 유량방정식에 의해 비선형항으로 표현되지만, 본 논문에서는 이를 선형화한 강성과 감쇠

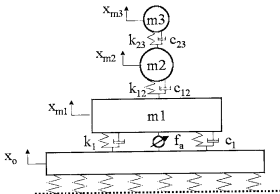


Fig. 1 Isolation system model

를 갖는 것으로 적용하였고, 대형 구조물 갖는 방진대의 증상에 탑재 기기들이 위치하며 동기화된(synchronized) 운동을 한다고 가정하여 수직 진동 모드만을 고려하였다.

Fig. 1의 시스템에서 수직 진동 모드에 대한 힙작 작동기 사용하는 보이스 코일 모터는 영구 자석에 의해 형성된 자속밀도, 권선의 길이, 권선에 흐르는 전류에 의해 발생 시킬 수 있는 작용력의 크기가 결정되며, 작동기의 동특성을 고려하지 않는 경우, 제어 전압 V_a 와 작동기의 출력 f_a 는 다음의 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$f_a(t) = B_\phi l_a k_\phi V_a(t) = K_\phi V_a(t) \quad (1)$$

여기서 B_ϕ 는 영구자석의 자속밀도이며 l_a 는 코일의 길이, k_ϕ 는 작동기 증폭기의 이득(gain), $V_a(t)$ 는 작동기용 증폭기에 인가된 제어 전압을 나타낸다.

타당 지지된 구조물위에 설치된 방진 시스템에서 구조물 바닥면으로부터 입력되는 변위 x_0 를 외란력으로 하면, 감쇠가 작은 방진 테이블 및 탑재 기기에 대한 지배 방정식은 다음의 식 (2)~(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$m_1 \ddot{x}_{m1} + c_1 \dot{x}_{m1} + c_{12}(\dot{x}_{m1} - \dot{x}_{m2}) + k_1 x_{m1} + k_{12}(x_{m1} - x_{m2}) = K_\phi V_a + k_1 x_0 \quad (2)$$

$$m_2 \ddot{x}_{m2} - c_{12}(\dot{x}_{m1} - \dot{x}_{m2}) + c_{23}(\dot{x}_{m2} - \dot{x}_{m3}) - k_{12}(x_{m1} - x_{m2}) + k_{23}(x_{m2} - x_{m3}) = 0 \quad (3)$$

$$m_3 \ddot{x}_{m3} - c_{23}(\dot{x}_{m2} - \dot{x}_{m3}) - k_{23}(x_{m2} - x_{m3}) = 0 \quad (4)$$

식 (2)~(4)로부터 각 질량에서의 변위와 속도로 상태 벡터를 $x=[x_{m1} \ x_{m2} \ x_{m3} \ \dot{x}_{m1} \ \dot{x}_{m2} \ \dot{x}_{m3}]^T$ 로 정의하면 Fig. 1의 방진 시스템에 대한 상태 방정식을 식 (5)와 같이 나타낼 수 있고, 식 (5)의 각각의 행렬은 다음과 같이 정의된다.

$$\dot{x} = Ax + bV_a + Lx_0 \quad (5)$$

여기서,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K_0 & -M^{-1}C_0 \end{bmatrix}, \quad b = [0 \ M^{-1}F_a]^T,$$

$$L = [0 \ M^{-1}L_0]^T, \quad M = \text{diag}\{m_1, m_2, m_3\}$$

$$C_0 = \begin{bmatrix} (c_1 + c_{12}) & -c_{12} & 0 \\ -c_{12} & (c_{12} + c_{23}) & -c_{23} \\ 0 & -c_{23} & c_{23} \end{bmatrix},$$

$$K_0 = \begin{bmatrix} (k_1 + k_{12}) & -k_{12} & 0 \\ -k_{12} & (k_{12} + k_{23}) & -k_{23} \\ 0 & -k_{23} & k_{23} \end{bmatrix},$$

$$F_a = [K_a \ 0 \ 0]^T, \quad L_0 = [k_1 \ 0 \ 0]^T$$

3. 제어기의 설계

3.1 주파수성형 최적 슬라이딩면

방진 시스템에 대한 능동제어를 설계하는데 있어서는 탑재 기기들에 대한 영향을 함께 고려할 필요가 있다. 탑재된 기기들 및 모델링되지 않은 고주파영역에서의 불확실성을 고려하여 고주파영역에서의 제어에 페널티를 주는 제어기법의 적용이 요구되는데, 이러한 특성에 맞는 제어기를 설계하기 위하여 주파수성형 슬라이딩모드제어 이론을 적용하였으며, 이 결과 페루프 시스템은 고주파 모드의 자극을 최소화시킬 수 있도록 설계된다.

주파수 성형에 대한 기본적인 개념은 Gupta^[30]에 의해 제안되었는데, LQ 최적 레귤레이터의 가중함수를 주파수영역에 의존하여 설계하는 것으로 식 (6)의 상태방정식으로 표현되는 선형계에 대해 주파수의존 가중함수를 사용하여 성능지수를 나타내면 다음의 식 (7)과 같다.

$$\dot{x} = Ax + bu \quad (6)$$

$$J = \int_{-\infty}^{+\infty} [x^*(j\omega)Q(j\omega)x(j\omega) + u^*(j\omega)R(j\omega)u(j\omega)]d\omega \quad (7)$$

여기서 x^* , u^* 는 x 와 u 의 복소공액전치(complex

conjugate transpose)이며, 전 주파수영역에서 $Q(j\omega) \geq 0$, $R(j\omega) > 0$ 이다.

이때 특정주파수 영역에서 큰 값을 갖도록 식 (8)과 같은 전달함수를 갖는 주파수 의존 가중함수 $R(j\omega)$ 를 선정하면, 이 영역에서는 작은 제어입력을 갖게되므로, 이 주파수 영역에서는 페루프계의 개인을 감소시키는 역할을 하게되며, 식 (8)에 대한 상태방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$R(s) = D_2 + C_2(sI - A_2)^{-1}B_2$$

$$\dot{z}_2 = A_2z_2 + B_2u, \quad y_2 = C_2z_2 + D_2u \equiv \hat{u} \quad (8)$$

여기서, $\hat{u} = R(s)u$

따라서 가중행렬 Q 를 상수행렬로 하고, $R(s)$ 만을 주파수 특성을 갖도록 설계하면, 식 (6)과 식 (8)로 구성된 부가상태계(augmented state system)를 고려하여 식 (9)와 같은 등가의 상태 방정식 형태로 나타낼 수 있고, 성능지수는 식 (10)으로, 각각의 행렬은 다음과 같이 정의하여 나타낼 수 있다.

$$\dot{x}_c = A_c x_c + B_c u_c \quad (9)$$

$$J = \int_0^{\infty} [x_c^T Q_c x_c + 2x_c^T N_c u_c + u_c^T R_c u_c] dt \quad (10)$$

여기서,

$$x_c = \begin{bmatrix} z_2 \\ x \end{bmatrix}, \quad A_c = \text{diag}(A_2, A), \quad B_c = \begin{bmatrix} B_2 \\ b \end{bmatrix}$$

$$Q_c = \text{diag}(C_2^T C_2, Q), \quad N_c = \begin{bmatrix} C_2^T D_2 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad R_c = D_2^T D_2$$

식 (10)에 대한 LQ 최적제어의 해는 식 (12)의 리카티 방정식(Riccati equation)으로부터 식 (11)로 구할 수 있다.

$$u = -(K_c + R_c^{-1}N_c^T)x_c \quad (K_c = R_c^{-1}B_c^T P_c) \quad (11)$$

$$(A_c - B_c R_c^{-1}N_c^T)^T P_c + P_c (A_c - B_c R_c^{-1}N_c^T) - P_c B_c R_c^{-1} B_c^T P_c + (Q_c - N_c^T R_c^{-1} N_c) = 0 \quad (12)$$

선형계에 대해 슬라이딩모드 제어가 되고 나사의 상태의 변동을 최소로 하는 최적의 슬라이딩면을 구하기 위해 식 (13)의 성능지수를 도입하며,^[41] t_c 는 슬라이딩제어를 시작한 시점을 나타낸다.

$$J_s = \int_{t_c}^{\infty} (x^T Q x) dt \quad (13)$$

이 문제는 식 (14)의 시스템에 대해 가격함수 (15)

를 최소화하는 LQ 문제로 해석할 수 있으며,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B_2 \end{bmatrix} u \quad (14)$$

$$J_s = \int_{t_0}^{\infty} (x_1^T Q_{11} x_1 + 2x_1^T Q_{12} x_2 + x_2^T Q_{22} x_2) dt \quad (15)$$

식 (15)를 최소화하는 해인 식 (16)은 최적 슬라이딩면 $s(x_1, x_2) = 0$ 를 만족시키는 해가된다.

$$x_2 = -Q_{22}^{-1} [A_{21}^T P + Q_{12}^T] x_1 \quad (16)$$

따라서 주파수 성형 LQ설계로부터 식 (15)를 식 (17)의 주파수의존 가중행렬로 적용하고,

$$J_s = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} [x_1^*(j\omega) Q_{11}(j\omega) x_{1(j\omega)} + x_2^*(j\omega) Q_{22}(j\omega) x_{2(j\omega)}] d\omega \quad (17)$$

식 (10)을 이용하여 주파수성형 최적 슬라이딩면을 다음의 식 (18)과 같이 얻을 수 있다.

$$s(x_1, x_2, z) = x_2 - \hat{x}_2 = x_2 + R_c^{-1} (B_2^T P_c + N_c^T) \begin{bmatrix} z \\ x_1 \end{bmatrix} = 0 \quad (18)$$

여기서 z 는 전달함수 $Q_{22}(s)$ 의 상태벡터로 식 (8)로부터 식 (19)로 정의되고, P_c 는 식 (12)의 해가되며, $Q_{22}(s)$ 는 식 (8)의 주파수 성형특성을 갖도록 하는 설계함수이다.

$$Q_{22}(s) = D + H(sI - F)^{-1} G \quad (19)$$

여기서, $\dot{z} = Fz + G \hat{x}_2$

$$\eta_1 = Hz + D \hat{x}_2 \quad (20)$$

3.2 슬라이딩모드 제어기의 설계

방진 시스템에 부착된 기기의 고주파 모드를 가진 한 방진부 변동분의 고주파 성분을 억제하면서 진동을 저감시키는 슬라이딩 모드 제어기를 설계하기 위하여, 실제 플랜트와 공칭 모델에 대한 식을 일반식 형태로 다음의 식 (21), (22)와 같이 나타내고,

$$\dot{\hat{x}} = f(x, \hat{x}) + bu \quad (21)$$

$$\dot{\hat{x}} = \hat{f}(x, \hat{x}) + \hat{b}u \quad (22)$$

식 (5), 식 (18)로부터 식 (23) 형태의 주파수 성형된 최적의 슬라이딩면을 도입한다.

$$s = x_2 - \hat{x}_2 = \hat{x} - \hat{\hat{x}} \quad (23)$$

여기서,

$$\dot{\hat{x}} = -R_c^{-1} (B_c^T P_c + N_c^T) \begin{bmatrix} z \\ x_1 \end{bmatrix} = -[K_s \ K_c] \begin{bmatrix} z \\ x_1 \end{bmatrix}$$

대상 방진부에 대한 모델이 완벽하다고 가정하여 슬라이딩면 s 의 시간미분을 구하면 다음과 같다.

$$\dot{s} = \dot{\hat{x}} - \dot{\hat{\hat{x}}} \quad (24)$$

여기서, $\dot{\hat{x}} = -K_s Fz - K_s G \hat{x}_2 - K_s x_2$

슬라이딩 조건은 다음의 식 (25)와 같이 나타낼 수 있다.

$$s \dot{s} = s(\dot{\hat{f}} + \delta u - \dot{\hat{\hat{x}}}) \leq -\eta |s| \quad (\eta > 0) \quad (25)$$

식 (25)으로부터 \hat{u} 를 식 (26)과 같이 선정하고 $k > \eta$ 으로 선정하면 제어 입력 u 는 식 (25)로부터 싸인함수(signum function)를 이용하여 식 (27)과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{u} = -f + \dot{\hat{x}} \quad (26)$$

$$u = \hat{b}^{-1} [\hat{u} - k \text{sgn}(s)] \quad (27)$$

실제의 플랜트는 모델링된 계와 차이가 존재하므로 이를 고려하면 식 (24)는 다음의 식 (28)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{s} = \dot{\hat{x}} - \dot{\hat{\hat{x}}} = f + bu - \dot{\hat{\hat{x}}} \quad (28)$$

여기에 식 (27)을 대입하면 슬라이딩면 s 의 시간미분항 \dot{s} 는 식 (29)가 되고, 슬라이딩 조건식은 식 (30)과 같이 구할 수 있으며,

$$\dot{s} = f + (-\dot{\hat{f}} + \dot{\hat{x}} - k \text{sgn}(s)) - \dot{\hat{\hat{x}}} \quad (29)$$

$$s \dot{s} = (f - \dot{\hat{f}})s + \eta |s| \leq k |s| \quad (30)$$

식 (29)의 좌변은 다음의 식 (31)과 같이 표현할 수 있다.

$$\text{좌변} \leq |f - \dot{\hat{f}}| |s| + \eta |s| \leq k |s| \quad (31)$$

$$k = F_s + \eta, \quad F_s = |f - \dot{\hat{f}}| = |k_1 x_{\max} + c_1 \dot{x}_{\max}|$$

이때 채터링 현상의 발생을 억제하기 위하여 식 (33)으로 정의되는 포화함수(saturation function)를 (6) 사용하여 최종 제어입력 u 를 식 (32) 형태로 구

한다.

$$u = b^{-1}[\hat{u} - k \text{sat}(\frac{s}{\phi})] \quad (32)$$

$$\text{sat}(\frac{s}{\phi}) = \begin{cases} \frac{s}{\phi} & |s/\phi| \leq 1 \\ \text{sgn}(\frac{s}{\phi}) & \text{else} \end{cases} \quad (33)$$

4. 시뮬레이션

정밀 기기를 포함한 방진 시스템의 능동 제어를 위하여 주파수 성형 슬라이딩 모드 제어 이론을 이용하여 제어기를 설계하고 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하여 제어 특성을 고찰하였다.

여기서, 시뮬레이션에 적용한 대상 시스템의 파라미터로는 $m_1 = 130$, $m_2 = 15$, $m_3 = 2$, $k_1 = 7.2e3$, $k_{12} = 3.1e3$, $k_{23} = 9e2$, $c_1 = 1.8e2$, $c_{12} = 2e1$, $c_{23} = 1$ 이며 작동기 상수는 $K_s = 6.267 N/V$ 을 적용하였다.

제어의 설계변수로는 $\eta = 1.2$, $\phi = 0.4$ 을 적용하였으며, 주파수성형 가중함수 $R(s)$ 는 고주파 영역(3차모드)에 대한 제어 영향을 비교하기 위하여 식 (34), (35)와 같이 선정하였으며 이를 Fig. 2에 함께 도시하였다.

$$R_1(s) = \frac{0.0493(s^2 + 11.3s + 32)}{s^2 + 25s + 158} \quad (34)$$

$$R_2(s) = \frac{4(s^2 + 19s + 89)}{s^2 + 377s + 35531} \quad (35)$$

3절에서 설계된 주파수 성형 슬라이딩 모드 제어기(F-SMC)의 특성을 고찰하기 위하여 일반적인 슬라이딩모드 제어(SMC)기법을 적용하여 식 (32)에서와 동일한 제어기 계인 및 경계층 두께(boundary layer thickness)를 갖는 제어기를 설계, 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

충격 외란 입력에 대한 제어 성능을 고찰하기 위하여, $x_{0, \dots} = 5 \times 10^{-3}$ 이고 지속시간(duration time)이 0.5 sec인 충격 입력에 대하여 Fig. 3에 저차 모드인 방진테이블의 수직 가속도에 대한 응답 결과를 비제어시와 비교하여 도시하였다. 결과에서처럼 공기 스프링으로만 지지된 수동 방진 테이블의 경우에는 외란에 의한 영향이 사라지는데 소요 시간이 길게 나타나 보이스 코일 모터를 이용한 능동 제어의 경우에는 방진 테이블의 진동 억제에 효과적이며, 일반적인 슬라이딩모드 제어 및 주파수성형 슬라이딩모드 제어의

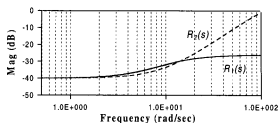
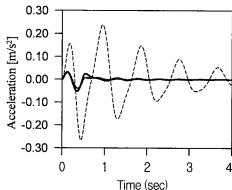
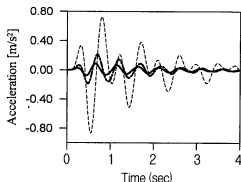


Fig. 2 Weighting functions



Soild : F-SMC using $R_2(s)$, Dash-dot : SMC, Dotted : uncontrolled

Fig. 3 Vertical accelerations of isolation table



Soild : F-SMC using $R_1(s)$, Dash-dot : F-SMC using $R_2(s)$, Dotted : uncontrolled

Fig. 4 Vertical accelerations of equipment 2

경우 모두 유사한 제진 성능을 나타내고 있다.

고차 모드에 대한 제어입력의 주파수 성형 특성을 보다 명확히 비교하기 위하여 식 (34)와 식 (35)의 주파수성형 가중함수를 각각 적용하여 설계된 제어기로 시뮬레이션을 수행하여 3차모드에 대한 결과 Fig. 4에 각각 비교하여 도시하였다. 결과에서처럼 Fig. 2의 형상을 갖는 가중함수 $R_2(s)$ 의 경우

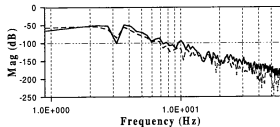
$R_1(s)$ 대비 고차 모드에 대한 제어 영향이 둔감해짐을 확인할 수 있다.

이러한 특성은 일반적인 슬라이딩모드 제어^[12]로는 구현할 수 없는 고차 모드에 대한 제어입력의 주파수성형 특성이 반영된 것으로, 모델링되지 않은 고주파 모드(unmodelled high frequency dynamics)의 불확실성이 상존하는 실제의 제어환경 하에서 동상적인 능동제어의 경우 발생할 수 있는 제어입력의 고차모드에 대한 영향 혹은 최악의 경우 발생될 수 있는 스펙오버 불안정화 현상에 효과적으로 대응할 수 있음을 의미한다.

이러한 제어입력에 대한 주파수성형의 결과로 저차 모드에 대한 영향을 살펴보기 위하여 Fig. 3에 도시한 제어시의 시간응답에 대한 파워스펙트럼을 일반적인 슬라이딩모드 제어 및 주파수성형 슬라이딩모드 제어에 대하여 비교하여 Fig. 4에 도시하였다.

결과에서처럼 주파수성형 슬라이딩모드 제어의 경우, 고차모드의 영향이 미약하게 나타나지만 그 크기는 저차모드에 대한 시간응답에서의 영향이 작은 것으로 판단되며, Fig. 3의 제진 성능을 나타내는 충격 외란 입력에 대한 주파수성형 슬라이딩모드 제어로 부터의 보이스 코일 모터 제어입력과 슬라이딩면의 위상도(phase portrait)를 Figs. 6, 7에 각각 도시하였다.

상시 진동이 존재하는 조건 하에서의 제진 특성을 살펴보기 위하여 Fig. 2의 가중함수 $R_1(s)$, $R_2(s)$ 를 적용한 제어기를 각각 적용하여 Fig. 8(a)에 도시한 구조물을 통해 전달되는 불규칙한 외란 입력에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 이때의 방진 테이블 및 m_2 , m_3 의 변위 응답을 비제어시와 비교하여 Fig. 8(b), (c), (d)에 각각 도시하였다. 결과에서처럼 보



Solid: F-SMC using $R_2(s)$. Dotted: SMC

Fig. 5 Power spectrum of vertical acceleration

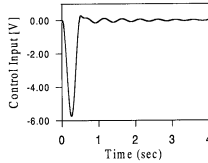


Fig. 6 Control input voltage using $R_2(s)$

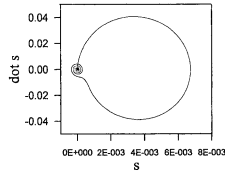
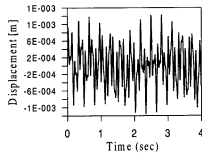
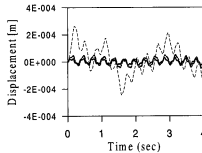


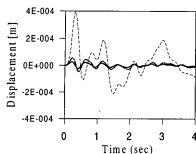
Fig. 7 Phase portrait of s using $R_2(s)$



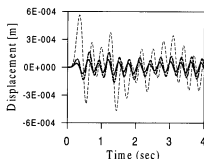
(a) Disturbance signal from base structure



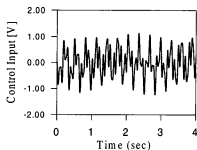
(b) Responses of isolation table



(c) Responses of equipment 1



(d) Responses of equipment 2

(e) Control input voltage using $R_2(s)$

Solid: F-SMC using $R_1(s)$. Dash-dot: F-SMC using $R_2(s)$. Dotted: uncontrolled

Fig. 8 Comparison of responses in random disturbance

이스 코일 모터를 이용한 능동 제어를 통하여 1차 모드인 방진테이블의 최대 변위가 비제어시 대비 약 10% 수준 이하로 제한됨을 알 수 있으며, 2차모드의 경우, 초기응답을 제외하면 $R_1(s)$, $R_2(s)$ 에서 유사한 응답결과를 나타내며, 가중함수 $R_2(s)$ 를 적용한 경우 $R_1(s)$ 대비 3차 모드에 대한 제어영향이 둔감해짐을 확인할 수 있다. 이러한 제어성능을 나타내는 보이스 코일 모터의 제어입력을 Fig. 8(e)에 도시하였다.

5. 결론

본 연구에서는 상시 진동이 존재하는 환경에서 계속 정밀도 및 고집적 생산 품질 등을 확보하기 위하여 방진 테이블에 탑재된 정밀 기기를 고려한 방진 시스템 모델을 기반으로, 수동 방진 테이블에 보이스 코일 모터를 힘작동기로 하는 능동 방진 시스템을 구성하였으며, 이를 기반으로 탑재된 기기들로 인한 고차모드와 모델링되지 않은 고주파모드의 불확실성에 대하여 제어입력의 영향, 스핀오버 현상을 억제할 수 있는 주파수 성형 슬라이딩 모드 제어 기법으로 제어기를 설계, 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 지지 구조물로부터 전달되는 불규칙한 외란 입력 및 충격 외란 입력에 대하여 탑재 장비의 특성을 고려하여 방진 테이블을 효과적으로 제어할 수 있음을 확인하였다.

참고 문헌

- (1) Takagami, T. and Jimbo, Y., 1985, "Study of an Active Vibration Isolation System-A Learning Control Method", Journal of Low Frequency Noise and Vibration, Vol. 4, No. 3, pp. 104~119.
- (2) 田嶋文夫, 1992, "能動除振機構を備えた除振台の開発", 日本精密工學會誌, 第 58卷, 第 7號, pp. 1155~1160.
- (3) Gupta, N. K., 1980, "Frequency-shaped Cost Functionals : Extension of Linear-Quadratic-Gaussian Design Methods", Journal of Guidance and Control, Vol. 3, pp. 529~535.
- (4) Utkin, V. I. and Young, K. D., 1978, "Methods for Constructing Discontinuous Planes in Multidimensional Variable Structure Systems", Automation and Remote Control, Vol. 31, pp. 1466~1470.
- (5) Kitamura, Y., Nishimura, H. et. al, 1996, "Positioning Control of Flexible Arm Using Frequency-shaped Sliding Mode Control", Third International Conference on Motion and Vibration Control, pp. 178~183.

- (6) Slotine, J. and Li, W., Applied Nonlinear Control, Prentice-Hall International, Inc.
- (7) Utkin, V. L., Sliding Modes and Their Application in Variable Structure Systems, MIR Publishers.
- (8) Young, K. D. et al., 1993, "Frequency Shaping Compensator Design for Sliding Mode", International Journal of Control, Vol. 57, No. 5, pp. 1005~1019.
- (9) 三橋邦家, 外 3, 1993, "機械の起振力推定とその相殺による能動防振技術制御", 日本機械學會論文誌, 第 59卷, 第 560號, pp. 1031~1039.
- (10) 崔衡民, 外 3, 1994, "空氣ばねと磁氣軸受を作用した防振台の微振動制御", 日本機械學會論文誌, 第 60卷, 第 575號, pp. 2227~2232.
- (11) 박영필, 김규용, 송진호, 1994, "공기스프링 방진대의 능동제어", 대한기계학회논문집, 제 18권, 제 5호, pp. 1169~1181.
- (12) 최승복, 김정식, 1996, "퍼지-슬라이딩 모드를 이용한 단일링크 유연 매니퓰레이터의 진동제어", 한국소음진동공학회지, 제 6권, 제 1호, pp. 35~44.