

감쇠비 불확실성을 고려한 유연구조물의 H_∞ 제어기 설계

채 장 수[†] · 박 태 원^{*}

(2000년 12월 6일 접수, 2002년 2월 18일 심사완료)

H_∞ Controller Design of Flexible Space Structure with the Uncertainty of Damping Ratio

Jang-Soo Chae and Tae-Won Park

Key Words : H_∞ (강인제어), Flexible Space Structure(유연우주구조물), Active Damping(능동감쇠), Weighting Function(가중함수), Model Uncertainty(모델 불확실성)

Abstract

The flexible structure like solar array and antenna in spacecraft shows very sensitive responses to the inner or outer disturbance and noise. And the spacecraft becomes more complex and larger as it has various mission and role. But since the spacecraft need to have the limited mass, the thin and light material should be selected and this necessity induces the decrease of natural frequency and structural stiffness. It reduces the ability of adapting to the disturbance and induces the structural instability. Certainly, the disturbance does not only make the structural instability, but also give the bad effect to the precise attitude control. So it is necessary to control the vibration in the space. In this paper, the flexible structure control modeling with piezo sensor and piezo actuator is developed. The model uncertainty of damping ratio is overcome by robust control. The system equation is induced by the finite element method.

기호설명

S : 민감도 전달함수
 T : 보조민감도 전달함수
 W_1 : 민감도 전달함수의 가중함수
 W_3 : 보조민감도 전달함수의 가중함수
 $\bar{\sigma}$: 가장 큰 특이값
 Δ : 모델 불확실성
 t_b : 유연보 두께
 w_b : 유연보 넓이
 E_b : 유연보 탄성계수
 L : 유연보 길이
 ρ : 유연보 밀도
 d_{31} : 압전 상수

v : 푸아송 비
 E_p : 압전 재질의 탄성계수
 t_p : 압전 재질 두께
 ρ_p : 압전 재질 밀도

1. 서론

유연 구조물의 제어에 관해서는 수동적인 방법과 능동적인 방법이 연구되어 왔다. 유연구조물의 수동적인 감쇠는 점성과 탄성을 지닌 물질을 사용해서 증가될 수 있다. 그러나 고주파 모드는 이 방법에 의해서 달성될 수 있으나 저주파 모드는 시스템 성능에 제한을 가할 수 있다. 능동적인 방법에는 페루프 제어가 유연구조물에 이용된다.

복합재료 응용기술은 광섬유, 압전 세라믹, 폴리머 그리고 형상기억합금 등의 기술개발을 가져왔으며, 이런 재료들은 측정 및 구동기 기능을 수

[†] 책임저자, 회원, 아주대학교 대학원 기계공학과
E-mail : jschae@madang.ajou.ac.kr
TEL : (042)860-2977

^{*} 회원, 아주대학교 기계공학과

행하게 되었다.

최근에는 압전재료를 이용한 구조물제어에 대한 연구가 많이 이루어졌다. 압전재료에 의한 연구는 트러스, 평판, 실린더, 보 형태의 우주 구조물 등 다양하게 이루어졌다. 압전재료는 구동기로만 이용되기도 하지만, 구동기와 센서로 동시에 이용되기도 한다.

Bailey 와 Hubbard⁽¹⁾는 유연구조물을 제어하기 위해서 압전필름을 구동기로 이용하여 비선형 제어를 설계하여 이에 대한 타당성을 검증하였다. Tzou⁽²⁾ 등은 구조물 진동제어를 위해서 압전재료 셀 형태 구동기와 연성인 다층판에 대한 연구를 수행하였다. Lee⁽³⁾ 등은 압전세라믹을 사용한 유연 링크 시스템의 제어에 관한 연구를 수행하였다.

고병식⁽⁴⁾은 유연구조물의 진동을 관측/제어하기 위해 압전센서와 압전구동기의 위치 최적에 관한 연구를 수행하였다. 여기서는 차량 내부에서의 구조진동-음향 연성에 의해 booming noise 에 심각한 영향을 주는 연성효과를 제어하는 데 초점이 맞추어져 있다. 유연구조물의 최적제어에 관한 연구는 Hankel 행렬의 특이값으로 구성되는 함수의 최적화에 관한 연구도 진행되었다. 이철희⁽⁵⁾ 등은 압전필름 작동기를 사용해서 위치 추적제어를 수행하였고, 김문현⁽⁶⁾ 등은 탄소섬유/에폭시 복합적 층판의 적층각과 되먹임 이득에 따른 수동 및 능동제어 해석 및 실험을 수행하였으며, 또한 다양한 제어기법을 이용하여 구조물 제어 연구를 수행하고 있다.⁽¹⁴⁻¹⁶⁾

압전재료를 구동기와 센서로 사용할 경우 non-collocation 문제가 제거될 수 있고, 유연보 각각의 모드를 측정하고 제어할 수 있게 형태가 변경될 수 있다. 우주 공간의 유연 구조물은 지구의 섭동, 태양풍의 영향 등의 외력을 가지며, 이는 감쇠비에 영향을 준다. 이것은 제어기 설계에서 parameter 의 불확실성을 제공하기 때문에 parameter 의 불확실성에 대하여 제어기의 성능을 유지하면서 위상 여유 및 이득여유를 보장하기 위해서 H_∞ 를 제어기로 선택하였다.

본 논문에서는 시스템 방정식을 유도하고, 방정식을 구성하고 있는 계수의 오차를 교란(disturbance)으로 가정하는 경우와 센서에 입력되는 잡음 상황에서도 강인한 제어를 설계하였다. H_∞ 제어기 설계 핵심은 저주파수와 고주파수에서 제어 대상 시스템의 물리적 의미를 가지고 가중합수를 설정하는 것이다.

2. H_∞ 제어기 설계

가중합수 W 는 민감도 전달함수(S)와 관계를

맺고, W_3 는 보조 민감도 전달함수(T)와 관계를 맺는다. $|W_1^{-1}(j\omega)|$ 는 교란 감소 요소(disturbance attenuation factor)이고 $|W_3^{-1}(j\omega)|$ 는 고주파 잡음이나 플랜트 섭동 감소 요소 (plant perturbation attenuation factor)에 해당한다. 이 가중합수들은 민감도 전달함수 및 보조 민감도 전달함수 그리고 다음 식 (1), (2)의 관계를 만족해야 한다.

$$\bar{\sigma}(S(j\omega)) \leq |W_1^{-1}(j\omega)| \quad (1)$$

$$\bar{\sigma}(T(j\omega)) \leq |W_3^{-1}(j\omega)| \quad (2)$$

여기서 $\bar{\sigma}$ 는 행렬의 특이값 중 가장 큰 값이다. 결국 H_∞ 제어에서 설계자가 해야 할 최종 디자인은 식 (1)과 (2)에서 보여준 가중합수를 만들어내는 것이다. 이 가중합수는 시스템의 특성과 주파수에 따른 반응성 그리고 최종 설계목적에 해당한다.

그런데 H_∞ 제어에서 고려해야 할 중요한 개념은 시스템을 안정하게 하면서 교란을 제거하여 성능(performance)을 좋게 하는 것이다. 이 두 가지를 동시에 달성하는 것을 performance robustness 라 한다. 식 (1), (2)를 다음의 하나의 식으로 간단하게 하자.

$$F(p,k) = [W_1 S, W_3 T]^T \quad (3)$$

그러면 식 (3)은 $\|F(p,k)\|_\infty < 1$ 으로 표현될 수 있다. 이 식은 가능한 섭동에 대해서 시스템의 불안정성이 발생하지 않도록 보장하는 조건이 된다. F 의 structured singular value(SSV)가 다음과 같이 정의된다.

$$\mu(F(j\omega)) = \|F(j\omega)\|_\mu = \sup(F(j\omega)) \quad (4)$$

이 식에서 $\Delta(j\omega)$ 는 다음의 식이 만족하는 허용 가능한 섭동이다.

$$\text{def}[I - F(j\omega)\Delta(j\omega)] = 0 \quad (5)$$

3. 시스템 방정식

시스템 운동방정식은 유한요소 모델을 사용해서 구한다. Fig. 1 은 ‘Γ’ 자형 유연구조물로 안테나를 지지하는 보로 가정하여 모델링하였다. 유한요소 모델에서 사용한 요소는 2 절점 6 자유도 보 요소로 절점 변위 q^e 는 다음 식과 같다.

$$q^e = [u_1, v_1, \theta_1, u_2, v_2, \theta_2]^T \quad (6)$$

여기서 u 는 횡방향 변위, v 는 종방향 변위를 나타내고, θ 는 x 축에 대한 회전 변위를 나타낸다. 압전재료는 유연보에 부착되어 있기 때문에 보의

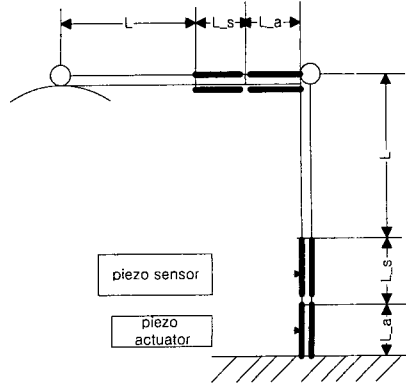


Fig. 1 Flexible beam with tip mass

변형률에 비례하는 전하가 발생한다. 이 전류의 양으로 보의 변형률을 인식하고, 여기에 비례해서 전압을 발생시켜 압전 구동기를 구동시킨다.

3.1 지배 방정식

감지기와 구동기가 부착된 유연보의 운동방정식을 구하기 위해서는 Hamilton's principle 을 사용하면 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\int_{t_1}^{t_2} [\delta T - \delta U + \delta W] dt = 0 \quad (7)$$

여기서 T는 운동에너지, U는 포텐셜 에너지, W는 외력에 의한 일이다. 여기에서는 순수 유연보의 운동 및 탄성 변형에너지가 고려되고, Euler-Bernoulli 이론과 변형이 적다고 가정하였다

3.2 압전 방정식

전기장과 기계적 탄성장을 연계하는 선형관계식은 다음 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} D_3 \\ S_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_3^T & d_{31} \\ d_{31} & s_{11}^E \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_3 \\ T_1 \end{Bmatrix} \quad (8)$$

요소에 대한 기계적 에너지($T_1 S_1$)와 전기적 에너지($D_3 E_3$)로부터 압전재료에 대한 강성행렬을 식 (10)과 같이 유도할 수 있다. 압전요소에 대한 질량행렬은 순수 보의 질량 행렬요소와 같은 형태이다.

$$\begin{aligned} -U &= \frac{1}{2} \int_V (-T_1 S + D_3 S_3) dV \\ &= \frac{1}{2} \Gamma e^e - q^T b e - \frac{1}{2} q^T K_p q \end{aligned} \quad (9)$$

여기서

$$\Gamma = \frac{w_p h}{t_p} (\epsilon_3^T - d_{31}^2 E_p), \quad e = t_p E_3$$

$$b_i = \text{sgn}(z_p) \frac{d_{31} E_p w_p t_p}{2} \int_{-a-m}^{a+m} \psi(x) \frac{d^2 \psi_i(x)}{dx^2} dx$$

$$K_{ij}^{piezo} = \frac{1}{4} t_p^2 E_p w_p t_p \int_{-a-m}^{a+m} \frac{d^2 \psi_i(x)}{dx^2} \frac{d^2 \psi_j(x)}{dx^2} dx \quad (10)$$

본 연구에서는 압전재료와 유연보가 완전히 접촉되어 있으며, 온도 효과와 열적인 변형을 무시하고 압전재료는 보의 두께에 비해서 매우 얇다고 가정하였다. 압전 센서에 발생하는 전압 $E(t)$ 는 외부 전기장을 가하지 않으므로 순방향의 압전식을 이용하여 변형률에 의해 발생하는 전기량에 비례하며 식 (11)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V(t) = \sum_{i=1}^n C_i^V q_i(t) \quad (11)$$

여기서 C_i^V 는 변환상수이며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_i^V = \text{sgn}(z_p) \frac{d_{31} E_p w_p t_p}{2 C_p} \int_{-a-m}^{a+m} \psi(x) \frac{d^2 \phi_i(x)}{dx^2} dx \quad (12)$$

여기서 $\phi(x)$ 는 형상 함수, $\psi(x)$ 는 압전재료가 극화되는 면적의 공간함수다. 압전 센서에 발생하는 전압 $V(t)$ 는 모달 크기의 선형 합으로 표현된다.

압전재료에 구동전압 $V(t)$ 를 가하였을 때 발생하는 힘은 다음과 같이 표현된다.

$$Q_i(t) = \alpha_i V(t) \quad (13)$$

여기서

$$\alpha_i = \text{sgn}(z_p) \frac{d_{31} E_p w_p t_p}{2 C_p} \int_{-a-m}^{a+m} \psi(x) \frac{d^2 \phi_i(x)}{dx^2} dx \quad (14)$$

3.3 시스템 방정식

압전재료가 부착된 유연보에 대한 운동방정식은 순수 보 요소에 대한 질량(M) 및 강성행렬(K)을 구하고 여기에 접촉된 압전재료 요소에 대한 질량 (M^{piezo}) 및 강성행렬 (K^{piezo})을 구하여 선형적으로 합하여 전체 시스템에 대한 운동방정식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$(M_s + M^{\text{piezo}}) \ddot{q} + (K_s + K^{\text{piezo}}) q = F^{\text{piezo}} \quad (15)$$

$M_s + M^{\text{piezo}}$ 은 일반화된 질량 행렬, $K_s + K^{\text{piezo}}$ 은 일반화된 강성 행렬이고 F^{piezo} 은 일반화된 외력이다. 최종적인 형태의 상태 공간식은 다음과 같다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (16)$$

여기서

$$x = [q_1, q_2, \dots, q_n, \dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n]^T \text{ 이고,}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\omega^2 & -2\zeta\omega \end{bmatrix}_{2n \times 2n}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ b \end{bmatrix}_{2n \times 1}$$

Table 1 System parameter of flexible beam

Description	Quantity	Value	Unit
Beam thickness	t_b	1.587e-3	Meter
Beam width	w_b	0.0254	Meter
Young's modulus	E_b	1.03e+7	N/m^2
Density	ρ	2800	kg/m^3
Length	L	0.7	Meter

Table 2 System parameter of piezo-material

Description	Quantity	Value	Unit
Strain constant	d_{31}	1.8e-10	m/V
Possion's ratio	ν	0.35	NA
Young's modulus	E_p	6.3e+10	N/m^2
Absolute permittivity	D	1.5e-8	N/m^2
Bonding surface	$Sign(z_p)$	1(bottom)	•
Thickness	t_p	2*1.901e-4	Meter
Centure position	a	0.085	Meter
Density	ρ_p	7700	N/m^2

이다. ζ 는 모달 감쇠 벡터이고, ω 는 고유진동수를 나타낸다. 유연보의 재질은 알루미늄이고 모드는 주요모드와 비주요모드로 나누었다. 주요모드의 감쇠비는 0.05 이고 비주요모드의 감쇠비는 0.1 이다.

측정방정식은 유연보의 변형시에 발생하는 압전센서의 유발 전하에 의한 전류나 전압이 될 수 있다.

$$y = [V(t)^{piezo_1}, V(t)^{piezo_2}, \dots, V(t)^{piezo_n}]^T \quad (17)$$

유연보와 압전물질의 계수는 Table 1 과 Table 2 에서 보여준다.

4. 제어기 설계

모델의 불확실성(model uncertainty)은 알루미늄 유연보의 감쇠비에서 나오는 것으로 하였다. 불확실성은 18 개 모드를 주요모드와 비주요모드로 나누어서 감쇠비를 가정한 부분과 실제 유연보의 감쇠비가 시스템 방정식 모델과 다르게 가정되었다는 점에서 기인한다. 따라서 모델 불확실성을 포함하기 위해서 시스템 방정식을 다음과 같이 새롭게 구성했다.

$$\dot{x} = Ax + B_1u_1 + B_2y_2$$

$$y_1 = C_1x + D_1u_1$$

$$y_2 = \Delta C_2x + \Delta D_2u_1$$

이 방정식은 불확실성 Δ 를 포함하게 되고, 행

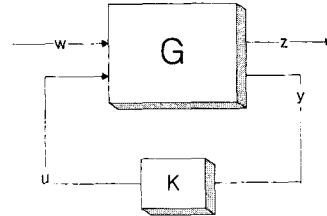


Fig. 2 Extended system with controller K

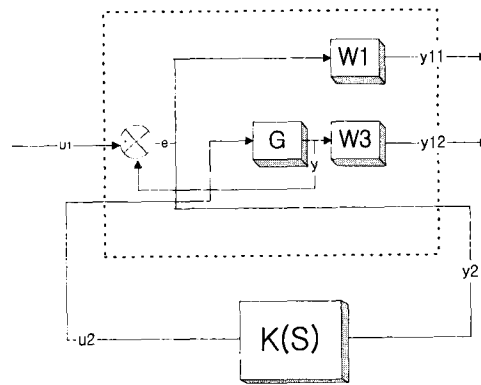


Fig. 3 Extended system with weighting functions

행렬 C_2 와 D_2 가 행렬의 차수를 맞추어 준다. 위 식은 다음의 상태 방정식으로 표현되게 되어 모델에 오차를 포함하는 상태 방정식을 만들어 주게 된다.

$$\dot{x} = (A + B_2\Delta C_2)x + (B_1 + B_2\Delta D_2)u_1 \quad (18)$$

이 과정이 끝난 후에는 가중함수를 만들게 되고, 이 가중함수가 포함된 확장된 시스템을 구성하게 된다. 이 확장된 시스템을 $G(j\omega)$ 라 하면 Fig. 2 와 같이 표현된다.

K 는 최종적으로 구해야 하는 제어기이고, z 는 오차 신호, y 는 측정값이고, u 는 제어 입력이며, 신호 w 는 센서 잡음, 외부 교란 등을 포함한 외력이다. 가중함수가 포함된 확장된 플랜트는 Fig. 3 에서 보여준다. 점선 안에 포함된 부분이 확장된 시스템 방정식이다. 따라서 이제 남은 문제는 모델링 오차의 수치화, 센서 측정 잡음의 모델링, 적절한 가중함수를 선택해주는 것이다

가중함수의 선택은 디자인 목적에 해당하는 것으로 robustness specification 을 위해서 1000rad/sec 이상에서는 적어도 -20db/decade 를 갖도록 한다. 이것은 고주파 잡음을 억제하기 위한 것이다.

다음은 민감도 전달 함수가 최대한 작도록 한다. 이를 위해서 $W_1^{-1} = \gamma^{-1} \frac{10s + 0.001}{0.1s + 2.0}$ 으로 가중함수

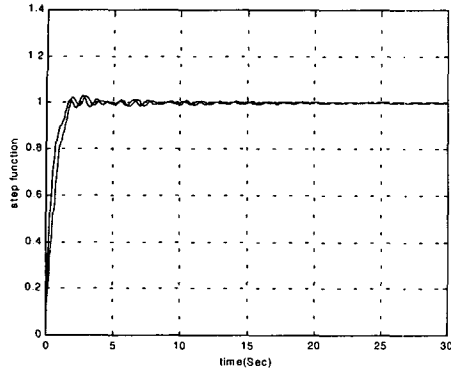


Fig. 4 Step response of the system controlled by H_∞

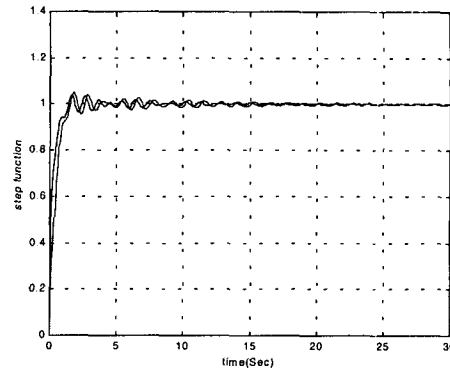


Fig. 7 Redesigned step response

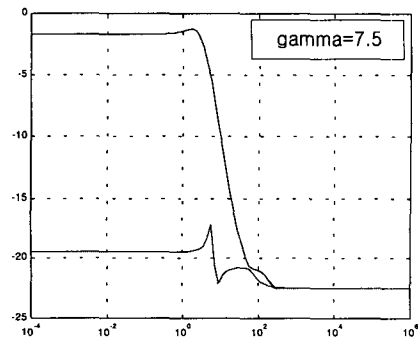


Fig. 5 Cost function of designed controller

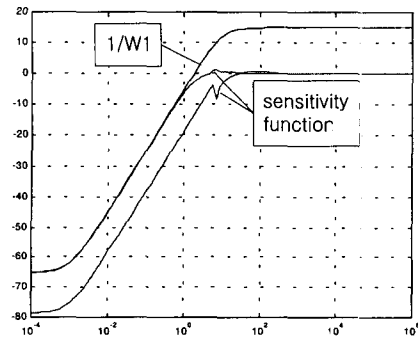


Fig. 8 Redesigned sensitivity function

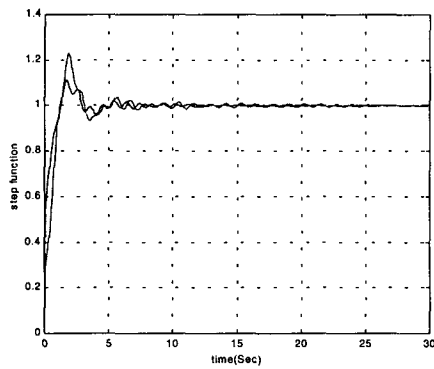


Fig. 6 Step response with model uncertainty

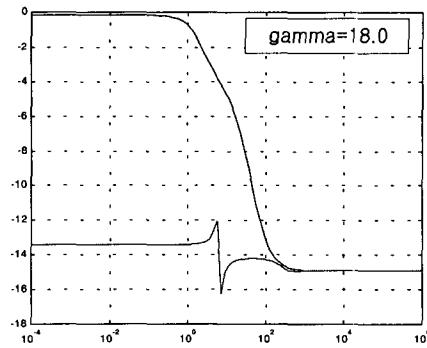


Fig. 9 Redesigned cost function

를 설계하였고 γ 의 최대값을 찾아준다. 그리고 모든 주파수에서 $\sigma(W_1^{-1}(j\omega)) + \sigma(W_3^{-1}(j\omega)) > 1$ 의 조건을 만족하도록 해야 한다. 그렇지 않을 경우 식 (1)과 (2)의 조건이 달성되지 않는다. 결국 위의 조건들에 따라 보조민감도 전달함수의 가중함수를 다음과 같이 설계하였다.

$$W_3^{-1} = \frac{450000}{s^2} \quad (19)$$

모델 불확실성 Δ 는 감쇠비가 주요모드 경우 0.005에서 0.0034으로 감소하고, 비주요모드는 0.1에서 0.085로 감소하는 것으로 시뮬레이션하였다. 이와 같이 감쇠비가 감소하는 것은 여러 번의 시뮬레이션을 수행해 본 결과이다. 감쇠비가 20% 정도 커질 경우는 시스템의 안정도에 크게 영향이 없었고, 오히려 더 빨리 수렴하는 모습을 보여줬다. 따라서 본 논문에서는 약 20% 정도 감쇠비가 감소하는 결과만을 다루도록 한다. 사실 위의 감소한 감쇠비는 시스템이 불안정하게 되는 경계값이다. 시뮬레이션에서 감쇠비가 20% 감소했을 때 시스템은 불안정해지기 시작했기 때문이다. Fig. 6이 불안정해지기 시작한 시스템 응답성을 보여준다. 결국 모델 불확실성이 포함될 경우 가중함수는 약간 변경되어야 한다. 이 가중함수는 위의 가중함수보다 다소 여유 있는 특이값을 가져야 하기 때문에 Cross-over frequency에서 특이값이 위의 가중함수 경우보다 커지게 된다. 식 (20)은 바뀐 가중함수이다.

$$W_1^{-1} = \frac{10s + 0.001}{0.1s + 1.0}, \quad W_3^{-1} = \frac{550000}{s^2} \quad (20)$$

그리고 가중함수의 특이값 크기를 조정하는 비례상수인 γ 의 값은 최적의 설계를 위해서 7.5에서 18로 변경시켜 줬다.

5. 시뮬레이션 결과

본 연구 모델에 대한 시뮬레이션 결과는 시스템을 불안정하게 하는 감쇠비의 경계값을 찾는 것이다. 이 경계값을 찾아서 불안정한 시스템을 안정하게 되도록 가중함수를 조절한다. 결국 이 가중함수는 식 (20)으로 주어지고 이것은 식 (19)보다 더 넓은 범위의 안정도를 갖게 된다. 하지만 시스템의 performance가 감소하게 되는 결과를 낳는다. Fig. 4는 외력이 없을 때 H_{∞} 의 반응을 나타낸 것이다. 응답이 2개인 이유는 측정값이 2개이기 때문이고, 측정값은 압전재료 구동기의 전압이다. Fig. 5는 식 (3)을 나타낸 것으로 cost function이다. 여기서 알 수 있는 것은 시스템이 안정적임을 확인할 수 있다. 특이값이 0db보다 작기 때문이다. 그런데 모델 불확

실성이 있고 시스템에 추가적인 제어를 하지 않았을 경우에 Fig. 6과 같은 반응을 보여주는데 오버슈트가 매우 크게 나오는 모습을 볼 수 있다. Fig. 7은 새로운 가중함수를 설계했을 때 결과를 나타낸 것으로, 제어 설계의 방향은 이득 및 위상 여유를 증가시켜 주는 것이다. 가중함수를 식 (19)에서 식 (20)과 같이 변경시켰다. 식 (20)은 식 (19)보다 각 주파수에서 특이값이 커진 것을 알 수 있다. 즉 외부 섭동에 안정적인 반응을 보이지만 오버슈트나 상승시간이 커진 것을 알 수 있는 것으로 이는 안정성과 성능이 서로 trade-off된 것이다.

Fig. 8과 Fig. 9는 최종적인 제어의 과정을 보여주는 것으로 민감도 전달함수가 역 가중함수보다 근소하게 작고 cost function도 0db에서 조금 작음을 보여주는 것으로 성공적인 제어가 설계되었다는 것을 알 수 있다. Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12는 노이즈가 고주파일수록 시스템이 어떻게 반응하는지 결과를 보여주는데 이는 보조민감도 전달함수가 제어하고 있음을 나타낸다. 즉 고주파일수록 노이즈는 성공적으로 제어되고 있음을 알 수 있었고, 보조민감도 전달함수가 설계 목적에 부합하는 역할을 하고 있다.

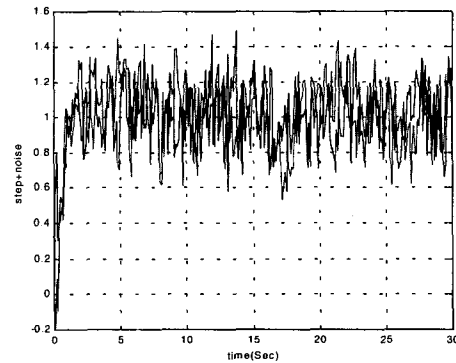


Fig. 10 Step response with 10Hz frequency noise

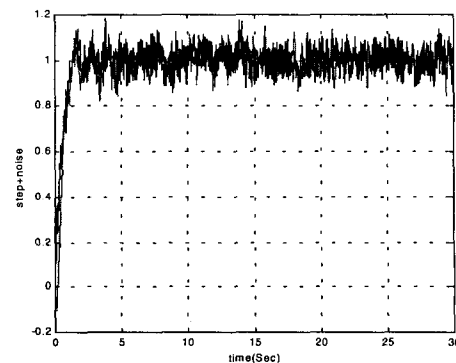


Fig. 11 Step response with 100Hz frequency noise

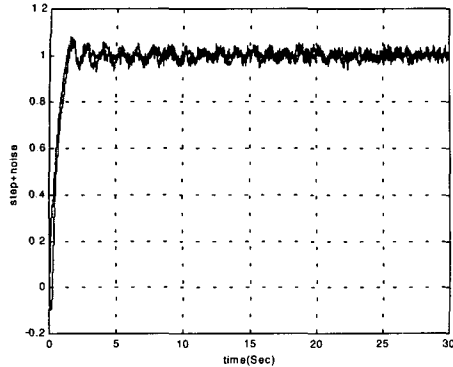


Fig. 12 Step response with 1000Hz frequency noise

6. 결 론

결과적으로 유연구조물의 감쇠비 불확실성과 잡음이 있는 상황에서도 성공적인 제어가 설계되었다고 할 수 있다. 이 제어 설계 과정에서 확인할 수 있었던 것은 damping coefficient disturbance가 있는 경우에는 이득, 위상여유를 보강해야 한다는 점과 특이값 개념에서 가중함수를 새롭게 조정해야 한다는 점이다. 또한 감쇠비 불확실성의 경계를 알 수 있었고, 위성체 구조물을 설계할 때 설계의 기준이 되기 때문에 향후 위성체 구조 및 자세제어 설계에서 효과적으로 적용될 수 있다고 판단할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Bailey and Hubbard, 1987, "Nonlinear Control of a Distributed System: Simulation and Experimental results," *Transactions of ASME Journal of Dynamic systems, Measurement, and Control*, Vol. 109.
- (2) Tzou, H.S. and Gadre, M., 1990, "Active Vibration Isolation and Excitation by Piezoelectric Slab with Constant Feedback," *Journal of Sound and Vibration*.
- (3) Lee, C.Y, Choi, S.R., Thompson, B.S. and Gandhi, M.V., 1989, "A Variational Formulation for the Finite

Element Analysis and control of Linkage and Robotics Systems Featuring Smart Material Incorporation Piezoelectric Materials," *Proceedings of the 1st National Applied Mechanisms and Robotics Conference*, Cincinnati, Ohio.

- (4) 고병식, 1995, "압전센서/액추에이터의 최적위치 설계," 한국항공우주학회지, pp.76~87.
- (5) 이철희, 최승복, 1996, "압전필름 작동기로 구성된 스마트 유연 구조물의 강진추적제어," 대한기계학회논문집(A), 제 20 권 제 5 호, pp. 1498~1507.
- (6) 김문현, 강영규, 박현철, 황운봉, 한경섭, 1996, "압전감지기/작동기를 이용한 복합적 증판의 다중모드 진동제어," 대한기계학회논문집(A), 제 20 권 제 10 호, pp. 3173~3185.
- (7) Maciejowski, J.M., 1989, "Multivariable feedback design," Addison-Wesley Publishing Company.
- (8) 한기봉, 이시복, 1997, "유연 링크 로봇의 특이 섭동모델 최적제어," 한국정밀공학학회지, 제 13 권 제 1 호.
- (9) Dumlu, D. and Ozcaldiran K., 1998, "Design of a fixed H_{∞} controller for a missile," *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Control Applications*, pp. 985~998.
- (10) Stevens, B.L. and Lewis, F.L., 1992, *Aircraft Control and Simulation*, John Wiley & Sons Inc.
- (11) Stout, W.L. and Sawan, M.E., 1992, "Application of H_{∞} Theory to Robot Manipulator Control," *IEEE AES Magazine*, pp. 148~153.
- (12) Huang, J., Lin, C.F., Cloutier, J. R., Evens, J.H. and Souza, C.D., 1992, "Robust Feedback Linearization Approach to Autopilot Design," *IEEE AES Magazine*, pp. 220~225.
- (13) Slotine, J.J. and Li, W., 1991, *Applied Nonlinear Control*, Prentice-Hall.
- (14) 광문규, 1998, "지능구조물의 능동진동제어를 위한 다중 PPF 제어기와 수정 LQG 제어기의 비교 연구," 한국소음진동공학학회지, 제 8 권 제 6 호.
- (15) 최승복, 박용근, 서문석, 1993, "전기 유동유체를 함유하는 지능외팔보의 진동 특성 및 제어," 대한기계학회논문집, 제 17 호 제 7 호, pp. 1649~1657.
- (16) 황우석, 황운봉, 한경섭, 박현철, 1993, "압전재료를 이용한 복합재료 보의 능동 및 수동제어," 대한기계학회논문집, 제 17 권 제 3 호, pp. 485~491.