

모델 불확실성에 강인한 유연구조물의 입력설계

황재혁*,⁰공병식**, 이성춘**

Robust Input Shaping Controller for Slewing Uncertain Flexible Structures

Jai-Hyuk Hwang*,⁰Byung-Sik Kong** and Seong-Choon Lee**

Abstract

This paper compares input shaping techniques for controlling residual vibration of flexible structures. Input shaping generates vibration-reducing shaped commands through convolution of an impulse sequence with the desired command. Both feedforward and feedback control approaches with/without input shaper for uncertain dynamical systems are investigated to evaluate the control performances. The control objective is to achieve a fast settling time and robustness to plant uncertainty, to eliminate residual vibrations. It is shown by a series of simulation that a properly designed feedback controller with input shaper performs well, as compared with open-loop controller with input shaper.

1. 서론

근래에는 유연성을 갖는 구조물들에 대한 관심이 커지고 있다. 특히 로봇 머니플레이터나 위성의 부착물의 경우에서와 같이 성능 향상을 목적으로 한 구조물의 경량화 추세는 유연화를 더욱 심화시키고 있다. 이러한 유연화는 구조물이 어떤 임무를 수행한 후 일으키는 잔류진동을 반드시 수반한다. 유연구조물에서 발생하는 잔류진동은 시스템의 성능에 심각한 영향을 미치게 된다. 또한 유연화와 함께 구조물이 복잡해짐에 따라서 모델링 과정에서의 오차가 불가피하게 된다. 이에 대해 더욱 강인한 제어 법칙이 필요하게 되었다.

입력설계(input shaping) 방법은 O.J.M. Smith⁽¹⁾에 의해서 최초로 제시되었으나, 이 방법은 강인성의 문제로 인해 사용되기 힘들었다. 그 후 Singer와 Seering⁽²⁾이 강인성의 문제를 고려한 개선된 방법

을 제안함으로써 활발한 연구가 진행되기 시작했다. 이들의 방법은 일련의 충격입력에 대한 응답을 고려하고 있다. 이 응답에 대한 수학적 해석을 통해서 모델링 오차에 대한 강인성을 갖는 입력을 설계하게 된다. 이 입력은 어떤 구조물이 잔류진동 없이 원하는 움직임을 수행할 수 있도록 해준다. 강인성의 문제는 이후 여러 논문들⁽³⁻⁴⁾에서 고려되고 있다. 위의 방법들이 주로 시간 영역에서의 해석을 주로 수행한 데 반해, Singh와 Vadali⁽⁵⁾는 이를 주파수 영역으로 확대하고 등가화된 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 시스템의 극점과 영점 관점에서 입력설계의 문제를 해석하였다. 주파수 영역에서의 등가화된 방법을 이용하면 지금까지 연구되어 온 폭 넓은 제어 분야의 영역들에 입력설계의 방법을 적용할 수 있다.

본 연구에서는 유연한 부착물을 갖는 우주구조물의 회전 시 발생할 수 있는 잔류진동을 최소화하는 입력설계 기법을 다루었다. 지금까지 다루어진 논문들에서는 기본적인 입력설계의 방법의 유도에 중점을 두고 있어서, 실제의 모델에 대한 다양한 적용과 해석이 요구된다. 본 연구에서는 입력설계 기법을 유연한 부착물을 갖는 우주구조물

*한국항공대학교, 항공기계공학과

**한국항공대학교 대학원

의 개루프 계와 페루프 계에 적용하여 잔류진동의 억제 성능 및 강인성을 해석하고, 우수한 방법을 제안하였다. 페루프 계 및 개루프 계에서 성능과 강인성은 최대한 향상될 수 있는 방향으로 절충되었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 제 2 절에서는 입력설계 방법에 대해 간략히 기술하였다. 본 연구에서 사용한 입력설계 기법은 시간 영역에서 개발된 기법이다. 제 3 절에서는 본 연구에서 적용하고자 하는 유연구조물의 운동방정식을 유도하는 과정을 기술 하였으며, 제 4 절에서는 유연구조물의 개루프 제어기 및 페루프 제어기에 입력설계 기법을 적용하여 그 성능 및 강인성을 해석하였다. 본 연구에서 얻어진 결과를 결론 부분에서 요약하였다.

2. 입력설계의 개요

본 절에서는 시간 영역에서 개발된 입력설계 방법을 간략히 기술하고자 한다. 시간 영역에서의 접근 방법은 크게 세 부분으로 나누어진다. 먼저 충격입력에 대한 시스템의 응답을 함수 형태로 유도하고, 둘째로 얻어진 함수에 수학적 기법을 적용하여 시스템의 잔류진동을 없앨 수 있는 입력을 설계한다. 셋째로 이 입력을 불확실성에 민감하지 않게 보완시킨다. 여기서 얻어지는 입력은 여러 개의 충격입력의 형태를 갖게 된다.

입력설계의 방법은 시간 영역에서의 충격응답 함수에 기초하고 있다. 비결합 된(uncoupled) 선형 진동계는 어떤 차수를 갖더라도 충격입력에 대한 시스템의 응답을 감소하는 조화함수의 형태로 나타낼 수 있다. 유연구조물의 모드를 1 개로 가정할 때, 다음과 같은 충격응답함수를 갖는다.

$$y(t) = \left[A \frac{\omega_0}{\sqrt{1.0 - \zeta^2}} e^{-\zeta \omega_0 (t-t_0)} \right] \sin(\omega_0 \sqrt{1.0 - \zeta^2} (t-t_0)), \quad (1)$$

여기서 A는 충격력(impulse)의 진폭, ω_0 는 계의 비감쇠 고유진동수, ζ 는 감쇠비, t_0 는 충격입력이 가해진 시간이다. 만일 충격응답함수의 반주기에 해당되는 시간 후에 새로운 충격력이 적절한 크기로

작용하면, 두 충격력의 작용에 의한 응답(잔류진동)은 0으로 만들 수 있다.

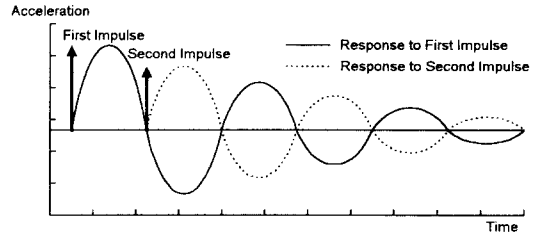


Fig.1 Superposition of Impulse Responses

Fig.1은 두개의 충격입력이 모두 가해진 후에 각각의 충격응답이 중첩되어서 시스템의 잔류진동이 0이 된 경우를 보여주고 있다. 이러한 결과는 수학적으로 2개의 충격응답을 더하여 유도할 수 있다. 이를 위해 다음과 같은 삼각함수의 관계식을 고려한다.

$$B_1 \sin(\alpha t + \phi_1) + B_2 \sin(\alpha t + \phi_2) = A_{amp} \sin(\alpha t + \psi) \quad (2)$$

여기서,

$$A_{amp} = \sqrt{(B_1 \cos \phi_1 + B_2 \cos \phi_2)^2 + (B_1 \sin \phi_1 + B_2 \sin \phi_2)^2}$$

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{B_1 \sin \phi_1 + B_2 \sin \phi_2}{B_1 \cos \phi_1 + B_2 \cos \phi_2} \right)$$

이 결과를 일반화하기 위해, 여러 개의 충격입력에 대한 진동의 진폭으로 확장하면 결과는 다음과 같다.

$$A_{amp} = \sqrt{\left(\sum_{j=1}^N B_j \cos \phi_j \right)^2 + \left(\sum_{j=1}^N B_j \sin \phi_j \right)^2} \quad (3)$$

$$\phi_j = \omega \sqrt{(1 - \zeta^2)} t_j,$$

여기서 B_j 는 각 N 개의 충격입력에 대한 식(1)에서의 사인(sin)항의 계수들이고, t_j 는 충격이 가해진 시간, 그리고 ω 는 고유진동수이다. 입력이 모두 끝난 후 잔류진동이 0이 되기 위해서는, A_{amp} 라고 표현된 식(3)이 입력이 끝난 시간인 t_N 에서 0이 되어야 한다. 즉

$$\sum_{j=1}^N A_j e^{-\zeta\omega(t-t_j)} \sin(t_j \omega \sqrt{1-\zeta^2}) = 0$$

$$\sum_{j=1}^N A_j e^{-\zeta\omega(t-t_j)} \cos(t_j \omega \sqrt{1-\zeta^2}) = 0 \quad (4)$$

만약 두개의 충격입력이 가해지는 경우라면, 식(4)의 2개의 항만 고려하면 된다. 첫번째 충격입력의 형태가 결정되면 두개의 미지수(A_2, t_2)는 식(4)의 두개의 방정식을 풀이하여 구할 수 있다.

이렇게 얻어진 두개의 충격입력은 시스템의 고유진동수와 감쇠비를 정확히 알고 있다는 가정하에서만 잔류진동을 제거할 수 있다. 그러나 실제 시스템의 파라미터들을 정확히 알아내는 것은 불가능하므로 강인성을 갖는 입력이 요구된다. 시스템 고유진동수의 불확실성에 대해 민감한 성질을 개선하기 위해서, 식(4)를 미분하여 0으로 놓음으로써 새로운 방정식을 얻어낼 수 있다.

$$\sum_{j=1}^N A_j t_j e^{-\zeta\omega(t-t_j)} \sin(t_j \omega \sqrt{1-\zeta^2}) = 0$$

$$\sum_{j=1}^N A_j t_j e^{-\zeta\omega(t-t_j)} \cos(t_j \omega \sqrt{1-\zeta^2}) = 0 \quad (5)$$

이제 두개의 방정식을 추가됨에 따라서 세 개의 충격을 갖는 입력을 설계할 수 있다. 얻어진 세개의 충격입력의 합을 1이 되게 하면 시스템의 강체운동에는 영향을 주지 않으면서 잔류진동을 제거할 수 있다. 이렇게 얻어진 입력의 모양을 Fig.2에 나타내었다.

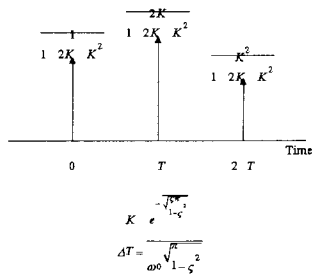


Fig.2 Sequences of Three-Impulses

충격입력의 수에 따른 강인성의 정도를 보이기 위해 식(3)과 같은 잔류진동의 식에 실제의 고유진동수가 아닌 오차를 갖는 임의의 진동수를 대입해

보았다. Fig.3은 충격입력이 2개인 경우와 3개인 경우에 대해 고유진동수의 변화에 따른 잔류진동의 크기를 보이고 있다. 이 그림으로부터 3개의 충격입력을 갖는 경우가 매우 강인함을 확인할 수 있다.

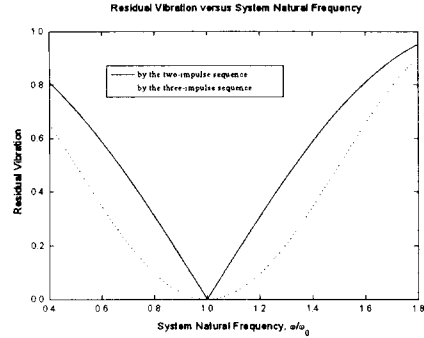


Fig.3 Robustness of Two and Three-Impulse Sequences

3. 유연구조물의 운동방정식

대칭적인 유연한 부착물(appendage)을 갖는 우주 구조물의 일반적인 모델로 Fig.4과 같은 균일한 베르누이-오일러 보와 연결된 강체를 고려한다. 작은 탄성변형을 갖는 평면상의 굽힘운동과 큰 각도를 움직이며 일어날 수 있는 강체회전을 함께 고려한다.

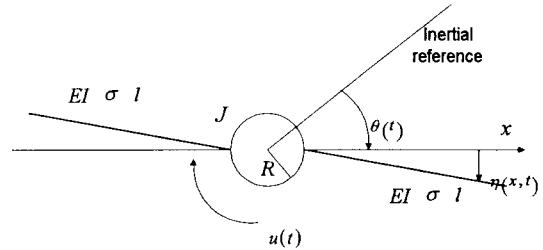


Fig.4 General Model of Flexible Structure

유연한 구조물의 운동방정식을 유도하는 체계적인 방법 중의 하나가 해밀턴의 원리(Hamilton's Principle)이다.

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (T-V) dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta W dt = 0 \quad (6)$$

여기서,

$$T = \text{전체의 운동에너지}$$

V = 위치 에너지
 W = 비보존력에 의한 일

본 연구에서 다루는 유연구조물의 부착물은 대칭적인 단순균일보이고, 중심의 강체는 구형이라고 가정한다. 그러면 Fig.4 과 같은 이상적인 모델에서 식(6)의 $T, V, \delta W$ 는 다음과 같다.

$$T = \frac{1}{2} J \dot{\theta}^2 + \int_0^l \sigma [(R+x)\dot{\theta} + \dot{\eta}]^2 dx \quad (7a)$$

$$V = \int_0^l EI [\eta''(x, t)]^2 dx \quad (7b)$$

$$\delta W = u(t) \delta \theta \quad (7c)$$

여기서, $\theta(t)$ 는 중심 강체의 임의의 큰 회전각, $\eta(t)$ 는 강체에 부착된 부착물의 탄성변형, $u(t)$ 는 강체에 작용하는 제어토크, EI 는 부착물의 굽힘강성, σ 는 부착물의 단위길이당 질량, l 은 하나의 부착물의 길이, $J=2MR^2/5$ 는 중심의 구형 강체의 회전관성, 그리고 R 은 중심 강체의 반지름이다.

해밀턴의 원리(Hamilton's Principle)를 이용하여 다음과 같은 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$[EI\eta''(x, t)]'' + \sigma [(R+x)\ddot{\theta}(t) + \ddot{\eta}(x, t)] = 0 \quad (8)$$

그리고 경계조건은 다음과 같다.

$$J\ddot{\theta}(t) = u(t) - 2REI\eta'''(0, t) + 2EI\eta''(0, t) \quad (9a)$$

$$\eta(0, t) = \eta'(0, t) = 0 \quad (9b)$$

$$\eta''(l, t) = \eta'''(l, t) = 0 \quad (9c)$$

식(8)의 탄성변형 η 는 다음과 같은 일반좌표의 선형조합으로 표현할 수 있다.

$$\eta(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i(x) q_i(t) \quad (10)$$

여기서, ϕ 는 $\eta(x, t)$ 를 식(10)과 같이 표현할 수 있는 기준(basis)으로서 외팔보의 i -번째 모드모양이다. q_i 는 ϕ 에 대응하는 일반좌표(모달좌표)이다. $x=0$ 일 때, 부착물의 모드모양 ϕ 의 경사도는 외팔보의 모드에서 항상 0이다.

보의 굽힘진동에 관한 이론으로부터, 외팔보의 부착물의 모드모양에 관한 식은 다음과 같다.

$$\phi_i = (a_i) [\cosh \beta_i x - \cos \beta_i x - \sigma_i (\sinh \beta_i x - \sin \beta_i x)] \quad (11)$$

여기서,

$$\sigma_i = \frac{\sinh \beta_i l - \sin \beta_i l}{\cosh \beta_i l + \cos \beta_i l} \quad (12a)$$

$$\beta_i l = 1.8751, 4.6941, 7.8548, 10.9955, \dots \quad (12b)$$

그리고 다음과 같은 정규화 된 모드모양의 직교성을 이용하면 (a_i) 를 구할 수 있다.

$$\int_0^l \phi_n(x) \phi_n(x) dx = 1, \int_0^l \phi_n(x) \phi_m(x) dx = 0 \quad (13)$$

이제 모달좌표에 대한 식을 유도하기 위해 식(8)과 (9)에, 식(10)을 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i(x) \ddot{q}_i(t) + \frac{EI}{\sigma} \sum_{i=1}^{\infty} \beta_i^4 \phi_i(x) q_i(t) \\ &= -\frac{1}{J} (R+x) \left[u(t) - 2REI \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i'(0) q_i(t) + 2EI \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i''(0) q_i(t) \right] \end{aligned} \quad (14)$$

식(13)의 성질을 이용하면,

$$\ddot{q}_n(t) + \frac{EI\beta_n^4}{\sigma} q_n(t) = C_n \left[u(t) - \sum_{i=1}^{\infty} D_i q_i(t) \right], n=1,2,3,\dots \quad (15a)$$

여기서,

$$C_n = -\frac{1}{J} \int_0^l (R+x) \phi_n(x) dx \quad (15b)$$

$$D_i = 2REI \phi_i'''(0) - 2EI \phi_i''(0) \quad (15c)$$

식(15a)의 모양을 행렬의 형태로 정리하면 다음과 같다.

$$I\ddot{q}(t) + Kq(t) = Cu(t) \quad (16)$$

여기서

$$q(t) = [q_1(t) \quad q_2(t) \quad \dots \quad q_n(t)]^T \quad (17)$$

$$K = \begin{bmatrix} \frac{EI\beta_1^4}{\sigma} + C_1 D_1 & C_1 D_2 & \dots & C_1 D_n \\ C_2 D_1 & \frac{EI\beta_2^4}{\sigma} + C_2 D_2 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ C_n D_1 & \dots & \dots & \frac{EI\beta_n^4}{\sigma} + C_n D_n \end{bmatrix}$$

$$C = [C_1 \ C_2 \ \dots \ C_n]^T$$

중심 강체의 회전운동에 대한 방정식은 식(9a)에서 얻어진다.

$$\ddot{\theta}(t) = \frac{1}{J} \left[u(t) - \sum_{i=1}^n D_i q_i(t) \right] \quad (18)$$

중심의 강체모드와 부착물의 유연모드를 함께 포함하는 상태방정식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{p}(t) = Ap(t) + Bu(t) \quad (19)$$

운동방정식(19)에 고려한 모드의 수를 3으로 가정할 때 계수행렬과 상태벡터를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$p(t) = [\theta(t) \ \dot{\theta}(t) \ q_1(t) \ q_2(t) \ q_3(t) \ \dot{q}_1(t) \ \dot{q}_2(t) \ \dot{q}_3(t)]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{J}D_1 & -\frac{1}{J}D_2 & -\frac{1}{J}D_3 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & & & & & \\ 0 & 0 & & 0 & & & & I \\ 0 & 0 & & & 0 & & & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & & & & & & 0 \\ 0 & 0 & & -K & & & & \\ 0 & 0 & & & & & & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{J} & 0 & 0 & 0 & C_1 & C_2 & C_3 \end{bmatrix}^T$$

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 연구에서는 크게 네 가지의 방법을 모델에 적용해 보았다. 먼저 입력설계가 없는 개루프 제어기를 적용하였다. 이 방법은 다른 여러 가지 방법과의 비교를 위해서 제시되었다. 개루프 시스

템의 입력으로는 캠 운동의 설계에 있어 다른 형태의 입력에 비해 유리한 다항식운동(polynomial motion)⁽⁷⁾을 사용하였다. 두 번째로는 입력설계를 갖고 있는 개루프 제어기의 적용이다. 이는 다항식운동의 입력에 입력설계를 통과한 입력을 유연구조물의 회전입력으로 사용하는 것이다. 다음은 페루프의 경우이다. 페루프 시스템을 구성하기 위해서 사용된 제어기법은 최적제어 이론에서 널리 알려진 LQR 방법을 사용하였다. 이렇게 구성된 페루프 시스템에 입력설계의 방법을 적용하지 않은 경우와 적용한 경우를 비교하였다. 여기서는 구성된 페루프 시스템을 하나의 개루프 시스템으로 생각하고, 주어진 기준입력(reference input)을 설계하였다. 적용된 네 가지 방법을 비교하는데 있어서는 시스템의 성능을 가장 잘 나타내고 있는 강체의 회전각과 부착물의 끝단의 변형을 고려하였다. Fig.5에서는 본 연구에서 적용하는 4 가지 방법에 대한 입력 모양을 나타내었다. Fig.5와 같은 입력을 사용했을 때, 강체의 회전각 및 부착물의 끝단의 변형은 Fig.6에 나타내었다. 이 그림에서 입력설계를 갖고 있는 경우 중심강체가 회전 후 잔류진동이 완벽하게 제거되는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 입력설계가 있는 경우는 없는 경우보다 응답이 다소 느린 것도 그림으로 알 수 있다. 가장 성능이 떨어지는 경우는 입력설계가 없는 개루프 제어기이며, 성능이 가장 우수한 경우는 입력설계를 갖고 있는 페루프 제어기로 확인되었다. 페루프 제어기는 잔류진동도 제거할 수 있지만 페루프 계의 특성에 의해 외란 및 모델링 오차에 강인한 성능을 갖고 있다. 그러나 이 경우의 단점은 센서 및 작동기와 같은 하드웨어를 구비하여야 하며 신뢰성이 떨어질 수 있다는 점이다.

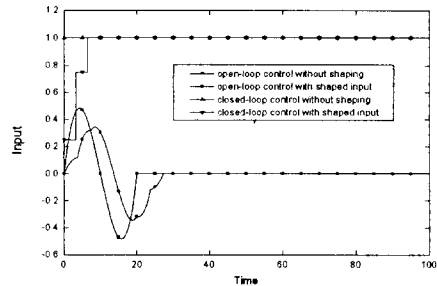
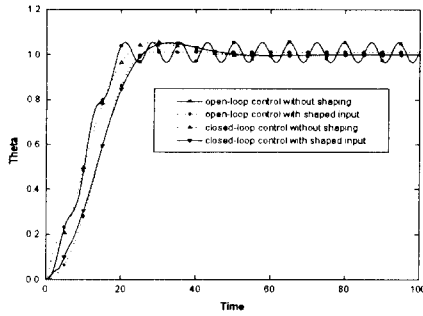
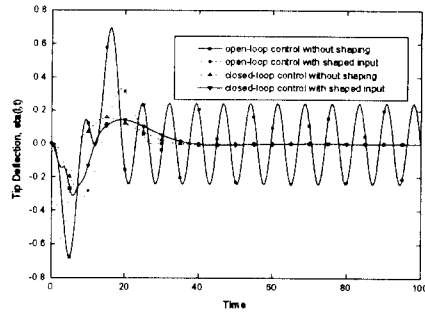


Fig.5 Input shapes of four different systems



(a) rigid-body motions

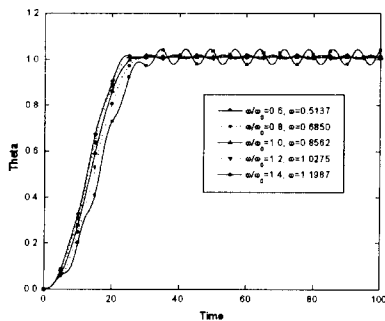


(b) tip deflections

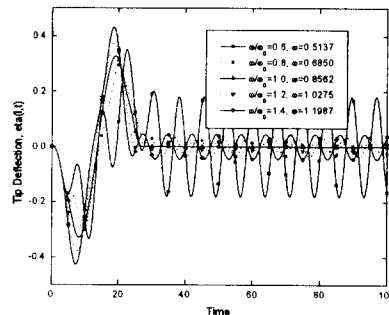
Fig.6 Performance of four different systems

다음으로 파라미터 오차에 대한 강인성을 시뮬레이션한 결과를 Fig.7~9에 나타내었다. 본 논문에서는 시스템의 고유진동수를 정확히 측정하지 못해 오차가 발생했다고 가정하고 시뮬레이션을 수행하였다. 입력설계 방법을 적용한 개루프 시스템의 결과는 Fig.7에 나타내었으며, $\omega_{model}/\omega_{real}$ 은

0.6~1.4의 구간에서 0.2의 간격으로 변한다고 가정하였다. ω 는 시스템의 고유진동수를 나타낸다. 이 그림에서 입력설계를 갖고 있는 개루프 제어기는 상당한 고유진동수의 변화에도 강인함을 나타내는데, 이러한 강인성은 입력설계의 특성에서 기인된다고 볼 수 있다.

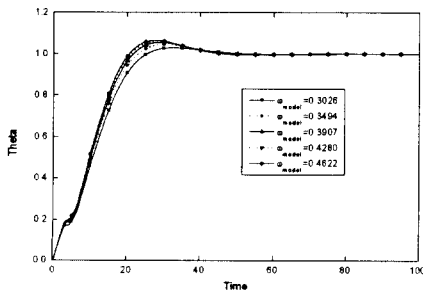


(a) rigid-body motion

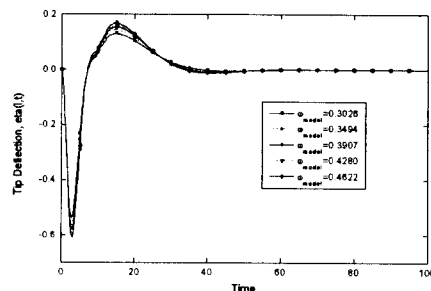


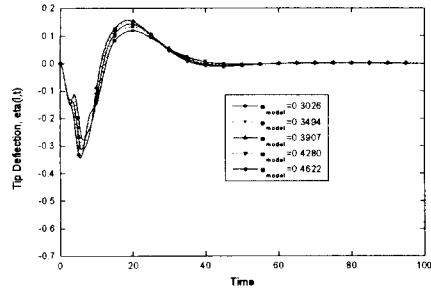
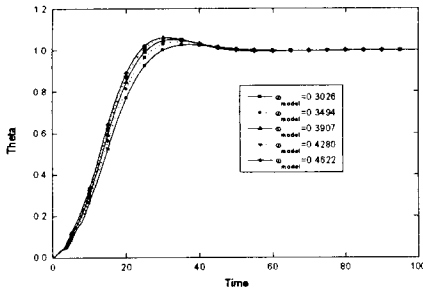
(b) tip deflection

Fig.7 Robustness to System Natural Frequency



(a) LQR Control(unshaped)





(b) LQR Control(shaped)

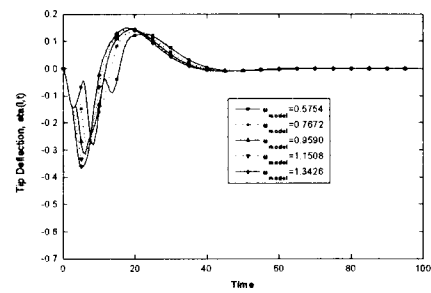
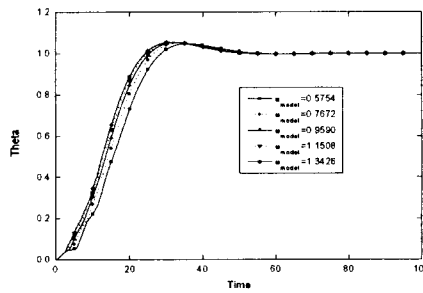
Fig.8 Robustness for LQR Control with shaped or unshaped input, $\omega_{real}=0.3907$

이제 페루프 시스템의 경우, 파라미터 오차에 대한 강인성을 고려해 보자. 여기서는 두 가지 형태의 모델링 오차를 생각해 보았다. 먼저 부착물의 물성치인 EI 가 부정확해서 EI_{model}/EI_{real} 가 0.6~1.4의 구간에서 0.2의 간격으로 변한다고 가정하였다. 이 경우는 플랜트의 오차가 페루프 시스템을 구성할 때 영향을 미치는 경우이다. 다시 말하면 LQR 방법으로 페루프 시스템을 설계할 때 게인행렬에 영향을 미친다. Fig.8은 이런 경우의 시스템의 반응을 나타내었다. 언급된 ω 는 부착물의 첫번째 모드의 고유진동수를 나타낸다.

또 다른 경우는 전체 페루프 시스템의 모델링에서 오차가 발생하였다고 가정하였다. 페루프 시스템의 고유진동수가 부정확하여 $\omega_{model}/\omega_{real}$ 가

0.6~1.4의 구간에서 0.2의 간격으로 변한다고 가정하였다. 이 때의 파라미터 오차에 대한 강인성은 입력설계의 방법에 의해서 얻어지게 된다.

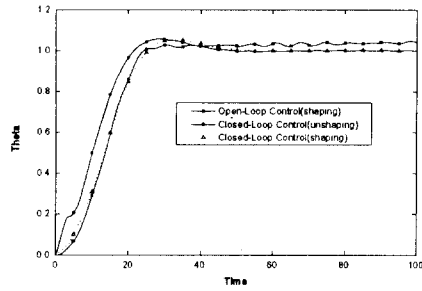
마지막으로 외란에 대한 강인성을 살펴본다. 외란은 플랜트의 입력 측에 반영되었다. 외란의 형태는 $10^{-2} \times \sin t$ 로 가정하였다. Fig.10은 외란에 대한 시스템의 반응을 나타낸다. 여기서 입력설계의 방법만이 사용된 개루프 계는 외란의 영향으로 성능이 저하되는 것을 알 수 있다. 그러나 페루프 제어기는 자체적으로 외란을 감당할 수 있는 특성이 있기 때문에 성능이 매우 우수하다. 따라서 입력설계를 갖고 있는 페루프 제어기가 가장 강인성과 성능이 우수하다고 판단할 수 있다.



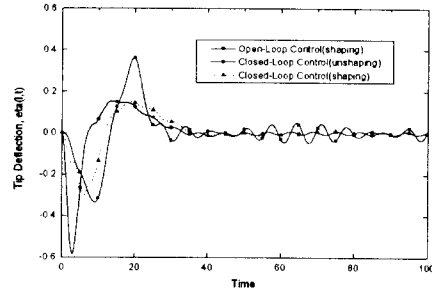
(a) rigid-body motion

(b) tip deflection

Fig.9 Robustness for LQR Control with Shaped Input, $\omega_{real}=0.9590$



(a) rigid-body motion



(b) tip deflection

Fig. 10 Robustness to Disturbance

5. 결론

본 논문에서는 모델 불확실성에 강인한 유연구조물의 입력설계 기법에 대해 연구하였다. 유연한 부착물을 갖는 구조물의 운동을 제어하는 개루프 및 폐루프 제어를 설계한 후 입력설계를 적용하여 잔류진동 억제 성능 및 강인성을 해석하였다. 일반적으로 입력설계의 방법은 개루프 시스템에 적용되는데, 이 개념을 확장하여 폐루프 시스템의 경우에도 적용하여 이 방법의 성능을 해석하고 비교하였다. 입력설계의 방법은 주로 시스템의 잔류진동을 억제하는데 큰 효과가 있음을 보였다. 또한 입력설계 방법의 커다란 장점으로 파라미터에 대한 강인성을 확인하였다. 마지막으로 외란이 가해지는 경우 입력설계의 방법이 적용될 수 있는지를 살펴보았다. 본 연구의 결과로부터 입력설계의 방법은 잔류진동을 줄이는데 좋은 성능을 나타내고 있고, 기존의 폐루프 제어기법과 결합하면 강인성과 성능면에서 매우 우수한 효과를 갖고 있음을 확인하였다.

참고문헌

- (1) Smith, O. J. M., 1958, *Feedback Control Systems*, McGraw-Hill, New York.
- (2) Singer, N. C. and Seering, W. P., 1990, "Preshaping Command Inputs of Reduce System Vibration," *ASME J. Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 112, pp. 76~82.
- (3) Wie, B. and Liu, Q., 1992, "Comparison Between

Robustified Feedforward and Feedback for Achieving Parameter Robustness," *J. Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 15, pp. 935~943.

- (4) Singhose, W., Derezinski, S. and Singer, N., 1996, "Extra-Insensitive Input Shapers for Controlling Flexible Spacecraft," *J. Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 19, pp. 385~391.
- (5) Singh, T. and Vadali, S. R., 1993, "Robust Time-Delay Control," *ASME J. Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 115, pp. 303~306.
- (6) Wie, B., 1995, *Spacecraft Dynamics and Control: Applications of Dynamical Systems Theory*, Lecture Note, Arizona State University.
- (7) Wilson, C. E. and Sadler, J. P., 1993, *Kinematics and Dynamics of Machinery*, HarperCollins, New York.
- (8) Inman, D. J., 1994, *Engineering Vibration*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.