

## 입력설계기법에 의한 유연구조물의 잔류진동제어

박 명 호\* · 한 명 석\*\* · 박 성 중\*\*

---

### <국문초록>

---

본 연구는 모델링 오차를 갖는 유연구조물의 잔류진동을 억제하는 입력설계에 대한 방법이다. 개루프 제어방법으로 시간지연방법을 이용하여 여러 가지 형태로 설계된 입력을 사용하여 유연구조물의 강제운동과 잔류진동을 억제함을 시뮬레이션과 실험을 통해 비교 확인해 보았다. 또한 모델 오차에 대한 강인성 측면에서도 해석적으로 개루프 시스템에서 검토해 보았다. 여기서 사용된 입력설계(Input-Shaping) 방법은 일련의 임펄스 콘볼루션을 이용하여 진동이 제어되는 입력을 설계한다.

실린더 모양의 허브와 양쪽에 유연한 날개 모양을 가진 모델이 실험에 이용되었으며 제안된 입력설계 명령과 설계되지 않은 명령에 대한 강제운동과 구조물의 잔류진동을 측정하여 입력설계 방법의 효과를 확인하였다. 날개모양의 구조물은 길고 유연하여 운동 상태에서 낮은 주파수 진동을 수반하는 구조물이다. 또한, 적절히 설계된 입력이 페루프 제어 시스템의 입력으로 사용할 때의 응답을 개루프 제어시스템의 응답과 비교하기 위해 해석적 방법을 통해 살펴보았다. 제어의 목적은 강체의 빠른 정착시간, 유연 구조물의 빠른 잔류진동 감소, 모델의 불확실성에 대한 강인성 등을 검토해 보는 것이다.

주요어 : 유연구조물, 잔류진동제어, 입력설계기법, 오픈루프

---

\* 교신저자, 이메일(parker@motor.ac.kr), 아주자동차대학, 041-939-3064

\*\* 아주자동차대학 카일렉트로닉스 전공 부교수

## I. 서론

### 1. 연구의 필요성 및 목적

최근에 우주 정거장이나 위성의 부착물과 같이 유연성을 갖는 구조물에 대한 관심이 증가 되고 있다. 특히, 무게에 민감한 시스템(weight-sensitive system)인 운송체(Vehicle), 로봇 머니플레이터, 위성의 부착물 등 성능 향상을 목적으로 한 경량화로 인한 구조물의 유연화는 구조물이 어떤 임무를 수행한 후 심각한 잔류진동을 수반하게 된다. 잔류진동은 시스템의 성능에 나쁜 영향을 미치며, 유연화와 함께 복잡해진 구조물의 모델링 오차는 불가피하여 더욱 강인한 제어 법칙이 필요하게 되었다. 따라서 유연한 구조물의 잔류진동 제어를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 구조물의 진동을 제어하는 방법으로는 강성이나 감쇠를 증가 시키거나, 복잡한 제어방법이나 입력설계 기법 등을 생각할 수 있는데, 앞의 두 가지 경우는 오히려 무게를 증가시키게 되므로 실제로 가능한 경우는 복잡한 제어방법을 적용하거나 입력설계 기법을 사용하는 것이다. 그러나 복잡한 알고리즘이 필요한 결합제어(coupled control)나 제어모드와 동수의 구동기가 요구되는 IMSC도 특정한 경우 외에는 구현하기 어렵다.

입력설계(input shaping) 방법은 Tallman과 O.J.M. Smith<sup>(1)</sup>에 의해서 최초로 제시되었다. 이들이 제안한 Posicast 제어방법은 마지막 가진이 끝난 후 모든 과도 항의 합이 영이 되게 하는 여러 개로 나누어진 충격 가진 입력을 사용하는 입력 설계 방법으로 제어기는 비례나 시간 지연 블록과 같은 방법으로 나타낼 수 있으나, 제어할 시스템의 감쇠와 주파수 추정에 대한 오차에 따른 강인성의 문제가 발생 되었고 이로 인해 적용하기 힘들게 되었다. 이들이 제안한 방법은 그 후 Singer와 Seering<sup>(2)</sup>가 모델링 오차에 따라 입력 설계 제어기의 감도를 감소시키는 방법으로 강인성을 고려한 개선된 방법을 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<sup>(3,4)</sup>에서 고려되고 있으며 Signhose<sup>(12)</sup>는 같은 모델의 수학적 해석에서 위상 선도를 이용하였다. 위에서 언급된 입력설계 방법은 하나의 모드의 잔류진동을 억제하게 설계되었다. 다중 모드<sup>(5,6)</sup>를 이용하여 잔류진동을 더욱 효과적으로 제거하기 위해서 각 모드에 대한 충격힘을 콘볼루션 하거나 비선형 연립방정식을 선형화 하여 충격힘을 구할 수 있다.

많은 논문들이 시간영역에서의 해석을 주로 수행한 데 반해, Singh과 Vadali<sup>(5)</sup>는 이를

주파수 영역으로 확대하고 등가화 된 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 시스템의 극점과 영점 관점에서 입력설계의 문제를 해석하였다. 주파수 영역에서의 등가화 된 방법을 이용하면 지금까지 연구되어 온 폭 넓은 제어 분야의 영역들에 입력설계의 방법을 적용할 수 있다. 그리고 Hyde와 Seering, Singh and Vadali에 의해 많은 연구를 통해 입력설계 방법은 일정한 힘이 가해지는 작동기로 구성된 제어계나 다중모드 계에 효과적으로 적용 될 수 있다는 것이 연구되어 왔다

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 요구되기에 입력설계 기법을 유연한 부착물을 갖는 우주구조물의 개루프 계와 폐루프 계에 적용하여 잔류진동의 억제 성능 및 강인성을 해석하고, 실험을 통해 우수성을 확인하였다. 폐루프 및 개루프 계에서 성능과 강인성은 최대한 향상될 수 있는 방향으로 절충되었다. 또한 그 응용 범위가 넓은 입력설계 방법과 등가화 된 시간 지연 기법을 다루어 먼저 하나의 모드에 대한 시간 지연 제어를 설계하고 입력설계 방법과 등가됨을 보였다. 시간 지연 제어기는 Singh와 Vadali가 제안한 제어기를 이용했다. 설계된 입력력들의 성능과 강인성을 확인하기 위해 해석과 실험을 병행하여 검토함으로써 보다 넓은 영역에서 강인성을 갖는 입력설계 방법을 제안하고자 했다. 정밀한 잔류진동을 제어하기 위해 다중모드입력설계 방법도 향후 고려하겠다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 제2장에서는 입력설계 방법에 대해 간략히 기술하였다. 본 연구에서는 시간 영역에서 개발된 입력설계 기법과 주파수 영역에서 개발된 기법을 사용하였다. 제3장에서는 본 연구에서 적용하고자 하는 유연구조물의 운동방정식을 유도하는 과정을 기술 하였으며, 유연구조물의 개루프 제어기 및 폐루프 제어기 등에 입력설계 기법을 적용하여 그 성능 및 강인성을 해석하였다. 제4장에서는 하나의 모드에 대한 시간지연 제어기를 설계하고 입력설계 방법과 등가화 됨을 보이고 Singh와 Vadali가 제안한 제어기를 이용하여 실험을 통하여 입력설계 방법과 시간 지연 기법을 이용한 잔류 진동 제어에 대한 성능을 확인했다. 본 연구를 통해 얻어진 결과를 결론 부분에서 요약하였다.

## II. 이론적 배경

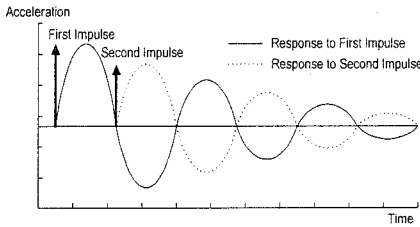
본 장에서는 시간 영역에서 개발된 입력설계 방법을 소개하고, 등가화 된 주파수 영역에서의 방법을 간략히 기술하고자 한다. 시간 영역에서의 접근 방법은 크게 세 부분으로 나누어진다. 먼저 충격입력에 대한 시스템의 응답을 함수 형태로 유도하고, 둘째로 얻어진 함수에 수학적 기법을 적용하여 시스템의 잔류진동을 없앨 수 있는 입력을 설계한다. 셋째로 이 입력을 불확실성에 민감하지 않게 보완시킨다. 여기서 얻어지는 입력은 여러 개의 충격입력의 형태를 갖게 된다.

### 2-1 시스템의 잔류진동과 충격입력 의 설계

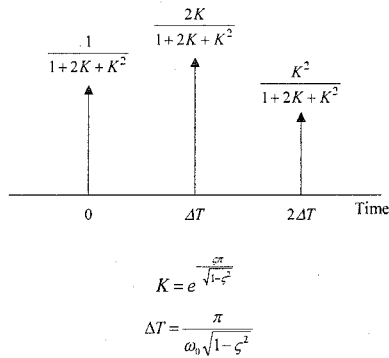
입력설계의 방법은 시간 영역에서의 충격응답 함수에 기초하고 있다. 비 결합된(uncoupled) 선형진동계는 어떤 차수를 갖더라도 충격입력에 대한 시스템의 응답을 감소하는 조화함수의 형태로 나타낼 수 있다. 유연구조물의 모드를 1개로 가정할 때, 다음과 같은 충격응답함수를 갖는다.

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

여기서 A는 충격력(impulse)의 진폭,  $\omega_0$ 는 계의 비감쇠 고유진동수,  $\zeta$ 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. [그림1]은 두 개의 충격입력이 모두 가해진 후에 각각의 충격응답이 중첩되어서 시스템의 잔류진동이 0이 된 경우를 보여주고 있다. 이러한 결과는 수학적으로 2개의 충격응답을 더하여 유도할 수 있다. 얻어진 세 개의 충격입력의 합을 1이 되게 하면, 시스템의 강제운동에는 영향을 주지 않으면서 잔류진동을 제거할 수 있다. 이렇게 얻어진 입력의 모양을 [그림2]에 나타내었다. 충격입력의 수에 따른 강인성의 정도를 보이기 위해 잔류진동의 식에 실제의 고유진동수가 아닌 오차를 갖는 임의의 진동수를 대입해 보았다.



[그림1] 충격응답함수의 중첩

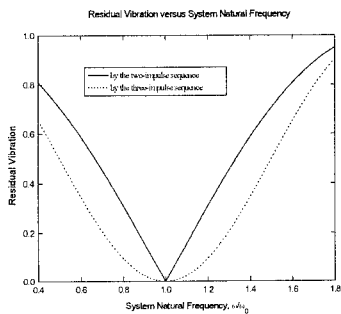


[그림2] 세개의 충격력

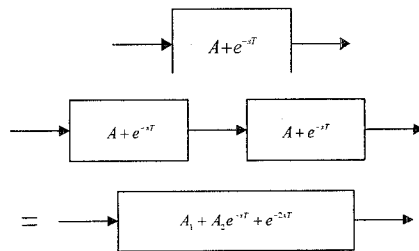
[그림3~4]은 충격입력이 2개인 경우와 3개인 경우에 대해 고유진동수의 변화에 따른 잔류진동의 크기를 보이고 있다. 이 그림으로부터 3개의 충격입력을 갖는 경우가 매우 강인함을 확인할 수 있다. 다음으로는 주파수 영역에서의 입력설계 방법을 시간 영역에서의 방법과 등가화 시켜 유도해보았다. 먼저 두 개의 충격입력을 갖는 경우 이 입력을 라플라스 변환을 통해 다음과 같은 형태의 식으로 나타낼 수 있다.

$$A + e^{-sT} \quad (2-2)$$

여기서,  $A = \exp\left(\frac{\zeta_i \pi}{\sqrt{1-\zeta_i^2}}\right) = \frac{1}{K}$ ,  $T = \frac{\pi}{\omega_r \sqrt{1-\zeta_i^2}} = \Delta T$  이고, A+1으로 나누어 두개의 충격입력의 합이 1이 되게 하면 시간 영역에서와 동일한 입력을 얻게 된다. 시간 영역에서의 입력설계 방법과 잔류진동의 억제 성능 및 파라미터 불확실성에 대한 강인성의 측면에서 완전히 동일한 결과를 얻을 수 있다.

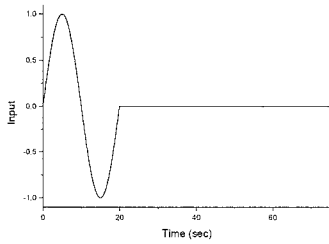


[그림3] 2개인 경우와 3개인 경우의 충격입력의 강인성

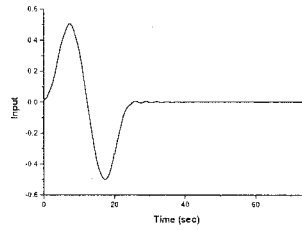


[그림4] PPD와 PPMD 제어기

시간영역에서의 입력 설계 방법이 주파수 영역에서 시간지연 기법과 등가 되는데 이렇게 얻어진 세 개의 시간지연 제어기의 전달함수를 이용하여 얻어진 입력을 [그림5~6]에서 제시하였다.



[그림5] 제어하지 않은 입력



[그림6] 근사적 시간제어기에서 얻어진 입력

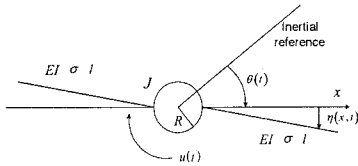
### Ⅲ. 유연구조물의 운동방정식과 시뮬레이션

#### 3-1 유연 구조물의 운동방정식

대칭적인 유연한 부착물(appendage)을 갖는 우주구조물의 일반적인 모델로 [그림7]과 같은 균일한 베르누이-오일러 보와 연결된 강체를 고려한다. 작은 탄성변형을 갖는 평면상의 굽힘운동과 큰 각도를 움직이며 일어날 수 있는 강체회전을 함께 고려한다. 유연한 구조물의 운동방정식을 유도하는 체계적인 방법 중의 하나가 해밀톤의 원리(Hamilton's Principle)이다.

$$\delta \int_0^t (T - V) dt + \int_0^t \delta W dt = 0 \quad (3-1)$$

여기서,  $T$  = 전체의 운동에너지,  $V$  = 위치 에너지,  $W$  = 비보존력에 의한 일이다. 연구에서 다루는 유연구조물의 부착물은 대칭적인 단순균일보이고, 중심의 강체는 구형이라고 가정한다. 그러면 [그림7]과 같은 이상적인 모델에서 식(3-1)의  $T, V, dW$ 는 다음 식(3-2)와 같다.



[그림7] 유연구조물의 일반적인 모델

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

$$V = \int_b^l EI [\eta''(x,t)]^2 dx$$

$$\delta W = u(t) \delta \theta \tag{3-2}$$

해밀톤의 원리(Hamilton's Principle)에 의해 선형 조합과 정규화된 모드모양의 직교성을 이용하여 모달좌표에 대한 식을 행렬의 형태로 정리하면 식(3-3)와 같다.

(3-3)

여기서,  $I\ddot{q}(t) + Kq(t) = Cu(t)$

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

$$q(t) = [q_1(t) \ q_2(t) \ \dots \ q_x(t)]^T$$

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

$$C_n = -\frac{1}{J} \int_b^l (R+x) \phi_n(x) dx \quad D_i = 2REI\phi_i'''(0) - 2EI\phi_i''(0)$$

중심 강체의 회전운동에 대한 방정식은 (3-4)과 같다. 중심의 강체모드와 부착물의 유연모드를 함께 포함하는 상태방정식으로 정리하면 식(3-5)과 같다. 운동방정식(3-5)에 고려한 모드의 수를 3으로 가정할 때 계수행렬과 상태벡터를 다음 식 (3-6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\ddot{\theta}(t) = \frac{1}{J} \left[ u(t) - \sum_{i=1}^{\infty} D_i q_i(t) \right] \tag{3-4}$$

$$\dot{p}(t) = Ap(t) + Bu(t) \tag{3-5}$$

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

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{J}D_1 & -\frac{1}{J}D_2 & -\frac{1}{J}D_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -K & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{3-6}$$

$$B = \left[ 0 \ \frac{1}{J} \ 0 \ 0 \ 0 \ C_1 \ C_2 \ C_3 \right]^T$$

### 3-2 시뮬레이션 및 고찰

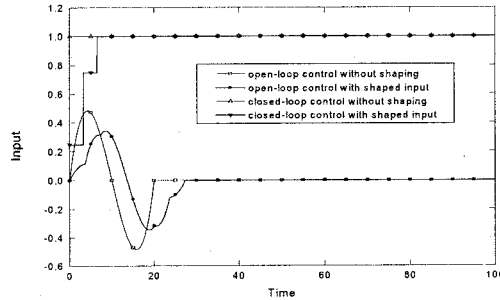
본 연구에서는 크게 다섯 가지의 방법을 모델에 적용했다. 처음 네 가지 방법에서는 입력설계기와 제어 법칙들의 조합으로 시스템을 제어하는 것을 보인다. 마지막으로 페루프 내부에 입력 설계기를 갖는 경우를 살펴보았다.

네 가지 입력에서 입력설계기가 없는 개루프 제어기와 그 입력으로는 캠 운동의 설계에 있어 다른 형태의 입력에 비해 유리한 다항식운동(polynomial motion)<sup>(7)</sup>을 사용하였다. 두 번째로는 입력 설계기를 갖고 있는 개루프 제어기의 적용과 다항식운동의 입력에 입력 설계기를 통과한 입력을 유연구조물의 회전입력으로 사용하는 것이다. 다음은 페루프의 경우로 사용된 제어기법은 최적제어이론에서 널리 알려진 LQR방법을 사용하였다. 이렇게 구성된 페루프 시스템에 입력설계의 방법을 적용하지 않은 경우와 적용한 경우를 비교하였다. 여기서는 구성 페루프 시스템을 하나의 개루프 시스템으로 생각하고, 주어진 기준입력(reference input)을 설계하였다.

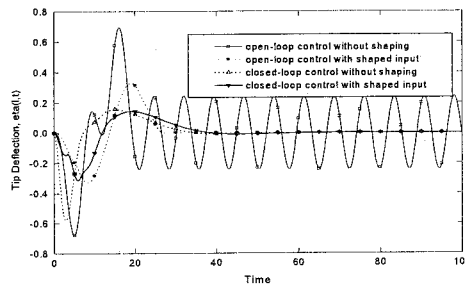
#### 3-2-1 기본적인 성능 비교

적용된 네 가지 방법을 비교하는데 있어서는 시스템의 성능을 가장 잘 나타내고 있는 강체의 회전각과 부착물의 끝 단의 변형을 고려하였다. 입력 모양[그림8]와 부착물의 끝단의 변형[그림9]에 중점을 두어 나타내었다. 이 그림에서 입력 설계기를 갖고 있는 경우 중심 강체가 회전 후 잔류진동이 완벽하게 제거되는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 입력설계기가 있는 경우는 없는 경우보다 응답이 다소 느린 것도 그림으로 알 수 있다. 가장 성능이 떨어지는 경우는 입력설계기가 없는 개루프 제어기이며, 성능이 가장 우수한 경우는 입력 설계기를 갖고 있는 페루프 제어기로 확인할 수 있다. 페루프 제어기는 잔류진동도 제거지만 페루프 계의 특성에 의해 외란 및 모델링 오차에 강인한 성능을 갖고 있으나 단점은 센서 및 작동기와 같은 하드웨어를 구비하여야 하는 점이다.





[그림8] 4가지 경우의 입력 모양

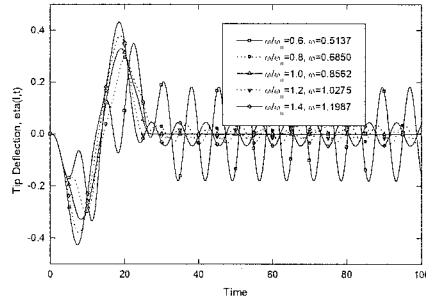


[그림9] 4가지 시스템의 강제운동 성능비교

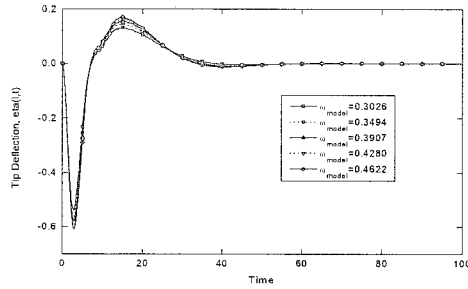
### 3-2-2 파라미터 오차에 대한 강인성

파라미터 오차에 대한 강인성을 시뮬레이션한 결과를 [그림10~12]에 나타내었다. 시스템의 고유진동수를 정확히 측정하지 못해 오차가 발생했다고 가정하고 시뮬레이션을 수행하였고 입력설계 방법을 적용한 개루프 시스템의 결과는 [그림11]에 나타내었으며,  $\omega_{model}/\omega_{real}$ 은 0.6~1.4의 구간에서 0.2의 간격으로 변한다고 가정하였다.  $\omega$ 는 시스템의 고유진동수를 나타낸다. 이 그림에서 입력설계기를 갖고 있는 개루프 제어기는 상당한 고유진동수의 변화에도 강인함을 나타내는데, 이러한 강인성은 입력설계기의 특성에서 기인된다고 볼 수 있다. 이제 페루프 시스템의 경우, 파라미터 오차에 대한 강인성을 고려해 보았다. 여기서는 두 가지 형태의 모델링 오차를 생각해 보았다. 먼저 부착물의 물성치인 EI가 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[그림12]. 또 다른 경우는 전체 페루프 시스템의 모델링에서 오차가 발생하였

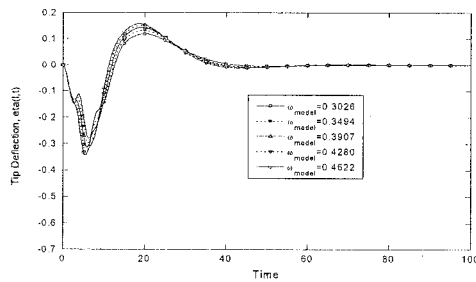
다고 가정하였다. 페루프 시스템의 고유진동수가 부정확하여  $\omega_{\text{model}}/\omega_{\text{real}}$ 가 0.6~1.4의 구간에서 0.2의 간격으로 변화하며[그림13] 파라미터 오차에 대한 강인성을 확인해 보았다.



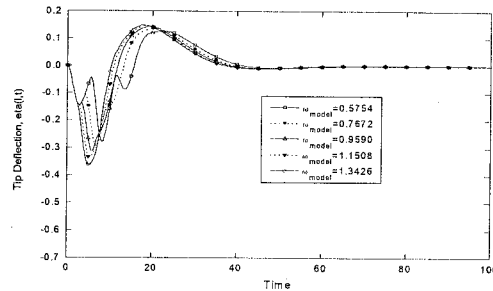
[그림10] 시스템 고유진동수에 대한 강인성



[그림11] 입력을 설계하지 않은 LQR 제어



[그림12] 입력을 설계한 LQR 제어



[그림13] 페루프계의 파라미터 오차에  
대한 강인성

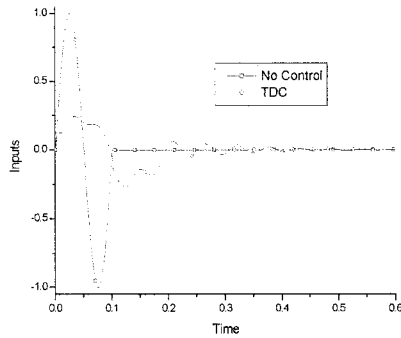
#### IV. 모델링과 실험

이 장에서는 실험 모델을 가지고 입력설계 제어기의 잔류진동 제거 효과를 확인하였다.

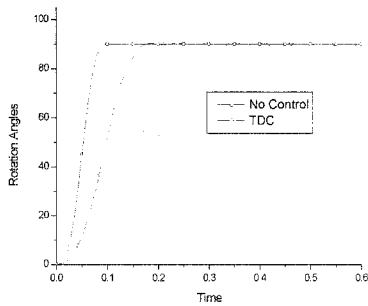
##### 4-1 모델링과 시뮬레이션

두 가지의 입력을 실험 모델에 적용하기 위해서 시간 지연 기법을 쓰지 않은 입력을 모델에 적용하였다. 이 입력은 강체 구조물이 90도를 회전하게 설계된 입력으로 가속도 단위를 가지고 있다. 두 번째 방법은 입력을 시간 지연 기법을 이용한 제어기에 통과한 후 나온 신호를 모델에 적용한 경우이다. 두 가지 방법 모두 개루프 제어기이다. 모델의 파라미터 값은 실험에서 적용할 모델의 값을 사용하였으며, 이는 다음 절에 제시한 <표 1>과 같다. 제시한 두 방법의 비교 성능으로는 입력 신호, 강체의 회전각, 그리고 부착물의 끝 단 변형을 고려하였다.

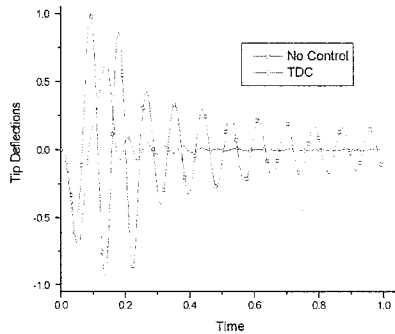
[그림14]는 본 연구에서 적용하는 2가지 방법에 대한 입력 모양을 보여주고 있는데, 제어되지 않은 입력을 기준으로 하여 설계된 입력을 나타내었다. [그림14]와 같은 입력을 사용했을 때, 강체 응답인 회전각은 [그림15]에 나타내었고, 부착물의 유연 응답인 끝 단 변형은 제어되지 않은 입력에 대한 응답을 기준으로 하여 제어된 입력 응답을 [그림 16]에 나타내었다. 그림에서 시간 지연 기법을 사용한 경우에 중심 강체가 회전 후 잔류 진동이 완벽하게 제어되는 것을 확인할 수 있다.



[그림 14] 두 가지 경우의 입력 모양



[그림15] 두 가지 시스템의 강제운동  
비교



[그림16] 두 시스템의 끝 단의 변형  
비교

일반적으로 시간 지연기법을 사용하는 경우 사용하지 않는 경우보다 응답이 다소 느린 것도 [그림15]를 통해 확인할 수 있다. 이와 같은 결과를 보면 센서 및 작동기와 같은 하드웨어를 구비해야 하는 폐루프 제어를 사용하지 않고도 시간지연 입력설계기법을 이용하면 개루프(open-loop) 만으로도 강제운동이 다소 느리지만 잔류진동은 크게 제어 되고 있음을 알 수 있다[그림16].

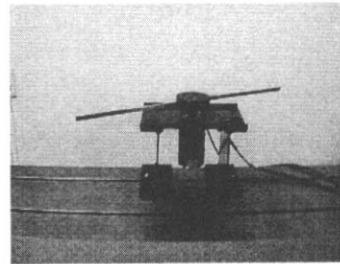
#### 4-2 실험

실험 장치는 [그림17]와 같다. 컴퓨터에는 A/D 보드가 내부적으로 설치가 되어 있어 외부에서 들어오는 신호를 이산처리를 한다. 컴퓨터는 A/D 보드를 통해 들어오는 데이터는 유연한 보의 잔류진동에 대한 값과 모터 회전각에 대한 값과, 모터를 회전하는 출

력 인가 전압을 처리한다. 모터는 AC 서보 모터를 사용하고, 모터에는 허브가 장착되었다. 허브에는 유연한 보의 특성을 가지고 있는 얇은 보를 부착하였다. 모터는 서보 드라이버와 같이 연결이 되어 있는데 서보 드라이브는 인가되는 전압을 대응되는 속도로 모터를 작동시키고, 또한 모터의 회전속도를 측정하여 외부로 신호를 내보낸다. 인터페이스 회로는 모터의 회전각에 대한 값을 처리하는데 정 회전과 역 회전에 대한 판단을 하는데 사용된다.

<표1> 실험 모델의 물성치

| Parameter                                       | Value                    |
|---|--------------------------|
| Length of the flexible beam (l)                 | 0.264 m                  |
| Mass per unit length of the flexible beam (l)   | 0.0964 kg/m              |
| Bending stiffness of the flexible beam (EI)     | 0.1975 Nm <sup>2</sup>   |
| Hub radius (R)                                  | 0.05 m                   |
| Hub mass (M)                                    | 2.0176 kg                |
| Natural Frequency (1st mode, 1)                 | 72.58 rad/sec            |
| Natural Frequency (2nd mode, 2)                 | 420.76 rad/sec           |
| Natural Frequency (3rd mode, 3)                 | 1230.80 rad/sec          |
| Damping ratio of the flexible beam (1st mode 1) | 20.7341x10 <sup>-3</sup> |
| Damping ratio of the flexible beam (2nd mode 1) | 8.6104x10 <sup>-3</sup>  |



[그림17] 실험 장치(모터)

구조물의 잔류진동을 측정하는 방법으로 스트레인 게이지(Strain Gauge)를 이용하였다. 시정수(time constant) 값이 실제 모델과 그 오차가 가장 작은 1차 시스템으로 고려했으며 모터의 모델링의 전달함수는 식(4-1)과 같다.

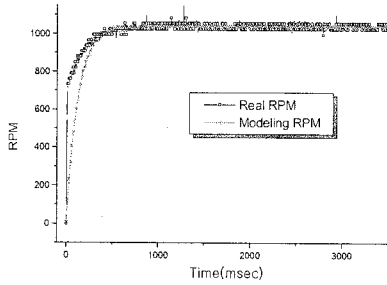
실험은 허브의 회전각이 90도를 기준입력으로 구동하는 방법을 선택하였다[그림18] 잔류진동의 제어 방법은 시간지연기법을 사용하였다.

$$G(s) = \frac{7.0147}{s + \frac{1000}{142}} \quad (4-1)$$

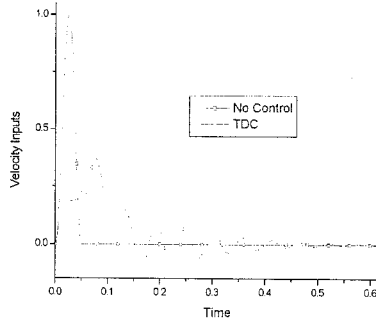
제어를 하지 않고 강체를 회전 시킨 경우와 시간지연기법입력[그림19] 이용하여 강체를 회전 시킨 경우에 대해서 비교를 하였다. 제어를 하였을 경우 입력이 크기가 줄고 지연됨을 알 수 있다. 제어를 한 경우에는 인가되는 입력이 영점을 기준으로 상하로 진동하므로 과도 응답이 있고 90도에 도달함을 볼 수 있다.

[그림20]에 시간지연기법으로 제어를 한 경우 잔류진동 값이 초기에도 상대적으로

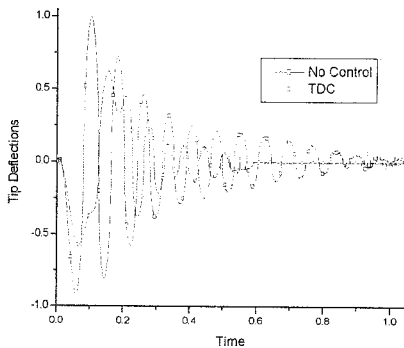
작지만 빠른 시간에 감쇠 되어 없어지는 것을 확인할 수 있다. 이로서 구조물의 잔류진동제어를 시간지연기법을 이용하여 큰 효과를 볼 수 있다는 것을 확인할 수 있다.



[그림18] 기준 입력에 의한 모델 응답



<그림19> 모터에 인가되는 시간지연 입력



[그림20] 시간지연 입력에 의한 끝단 변형

### V. 결론

본 논문에서는 모델 불확실성에 강인한 유연구조물의 입력설계 기법에 관한 연구를 목적으로 시뮬레이션과 실험을 통해 얻어진 유연구조물의 응답을 통해 개루프 제어기의 성능과 강인성을 해석하여 우수한 입력설계 방법을 제안하고 유연구조물의 잔류진동 제어 효과를 확인하였다.

첫째로 유연한 부착물을 갖는 구조물의 운동을 제어하는 개루프 및 폐루프 제어기를 설계한 후 입력 설계기를 적용하여 잔류진동 억제 성능 및 강인성을 해석하였다. 그리고 제어 루프 내부에 입력설계기가 위치하는 경우도 살펴보았다. 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. 본 연구의 결과로부터 입력설계의 방법은 잔류진동을 줄이는데 좋은 성능을 나타내고 있고, 시뮬레이션을 통해 기존의 폐루프 제어기법과 결합하면 강인성과 성능 면에서 매우 우수한 효과를 갖고 있음을 확인하였다.

둘째로 시간지연기법을 이용한 유연구조물의 잔류진동 제어를 위해서 유연한 부착물을 갖는 구조물의 운동을 제어하기 위하여 실험 대상에 대한 모델링을 하였고, 이 모델에 알맞은 시간지연 제어기를 설계하였다. 실험에서는 AC 서보모터를 이용하여 허브를 회전시켰다. 허브와 서보모터의 모델링에서는 1차 시스템으로 가정하여 구했고, 구조물의 끝 단 변형 측정을 위해서 스트레인 게이지를 이용하였다. 실험을 통하여 유연구조물이 운동을 한 후 수반하는 잔류진동을 시간지연 기법으로 제어할 때 유연구조물의 끝단의 잔류진동 크기가 작고 빠른 시간에 감쇠되어 사라짐을 보았다. 이 결과로부터 시간지연 기법은 잔류진동 제거 성능이 우수함을 실험을 통해 확인하였다.

## ▣ 참고문헌 ▣

- Smith, O. J. M. (1958), *Feedback Control Systems*, McGraw-Hill, New York.
- 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.
- 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.
- 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.
- Singh, T. and Vadali, S. R. (1993), "Robust Time-Delay Control," *ASME J. Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 115, pp. 303~306.
- Rappole Jr., B. W., Singer N. C. and Seering, W. P. (1993), "Input Shaping With Negative Sequences for Reducing Vibrations in Flexible Structures," *Proceedings of the American Control Conference*.
- Singhose, W. E., Singer N. C. and Seering, W. P. (1995), "Comparison of Command Shaping Methods for Reducing Residual Vibration," *Proceedings of the 1995 European Control Conference*.
- Tokhi, M. O. and Poerwanto, H. (1996), "Control of Vibration of Flexible Manipulators Using Filtered Command Inputs," *4th International Congress on Sound and Vibration*, June 24-27, St. Petersburg, Russia, pp555-560.
- Singh, T. and Vadali, S. R. (1993), "Input-Shaped Control of Three-Dimensional Maneuvers of Flexible Spacecraft," *J. of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 16, No. 6, pp1061-1068.
- Murphy, B. R. and Watanabe, I. (1992), "Digital Shaping Filters for Reducing Machine Vibration," *IEEE Trans.* Vol 8, No. 2, pp285-289.
- Pao, L. Y. (1996), "Input Shaping Design for Flexible Systems with Multiple Actuators," *Proceedings of the 13th World Congress of the International Federation of Automatic Control*.
- Singhose, W. E., Singer N. C. and Seering, W. P. (1994), "Residual Vibration Reduction Using Vector Diagrams to Generate Shaped Inputs," *ASME J. of Mechanical Design*.



**<Abstract>****A Suppression of Residual Vibration on the Flexible Structures by Input Shaping**

Myoungho, Park\* · Myoungseok, Han\*\* · Sungjong, Park\*\*

This paper presents a procedure for designing command to maneuver flexible structure with very little residual vibration, even in the presence of modeling errors. For the open loop maneuver, the various shaped profiles using multiple step inputs delayed in time are considered for robustness and compared with the responses of rigid body and flexible body in virtue of simulations and experiments. Input shaping generates vibration-reducing shaped commands through convolution of an impulse sequence with the desired command.

A flexible model with a cylindrical hub and four symmetric appendages is considered to examine the responses to real plant, and to illustrate the effectiveness of the proposed shapers. The appendages are long and flexible, leading to low frequency vibration under any control action.

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. The control objective is to achieve a fast settling time of residual vibration to flexible structure and robustness (insensitivity) to plant uncertainty, to eliminate residual vibration.

**Key Words** : Open loop control, Flexible structure, Residual vibration suppression, input shaping

---

\* Correspondence, Ajou Motor College

\*\* Ajou Motor College