

論文

유연구조물의 강인한 입력설계기법의 실험적 연구

황재혁*, 배재성**, 현영오***, 콧동기***, 박영근***

An Experiment Study on the Robust Input Shaping of Flexible Structures

Jai-Hyuk Hwang*, Jae-Sung Bae**, Young-O Hyun***, Dongi-Gi Kwak***, Young-Guen Park***

Abstract

In this paper, an experimental study on the robust input shaping for control of the residual vibration of flexible structures has been investigated. Two approaches has been used for the robustness of input shaping: the first method is to increase the number of impulses, and the other includes an EI shaper using vector diagram. The input case designed by the application of the above methods has been applied to a control problem involving residual vibration of a rotating hub with two flexible appendages. It has been found by a series of experiments that the input shaper designed in this paper works well for the residual vibration control of the flexible structure.

Key Words: Vibration Control(진동제어), Input Shaping(입력설계), Robustness(강인성)

1. 서 론

유연성을 가지는 구조물에서 구조물의 강제운동은 반드시 잔류진동을 수반한다. 이러한 잔류진동은 정확한 동작을 요하는 구조물의 운동성능에 심각한 영향을 미치게 된다. 또한 구조물이 복잡해짐에 따라 모델링 과정에서의 오차는 불가피하게 된다. 모델링의 불확실성을 갖는 구조물의 잔류 진동을 제어하기 위한 방법으로는 강성이나 감쇠의 증가, 제어기의 적용, 그리고 입력의 형태를 설계하는 방법이 있다. 강성이나 감쇠의 증가는 시스템의 질량을 증가시키게 되며, 제어기의 적용은 계를 복잡하게 만들며, 많은 비용이 들어간다. 따라서 질량을 증가시키지 않으며 입력을 형태를 변화시키는 입력설계 방법이 가장 효율적인 방법으로 인식되어 있다.

입력설계의 최초의 형태는 1950년대에 개발된 Posicast control 방법이였다[1]. 이 방법은 단지 잔류진동을 '0'으로 만드는 방법으로 모델링 오차에 대해 강인성이 없다. 따라서 입력설계 기법연구에서 강인한 입력설계 기법의 개발에 초점이 맞추어 연구가 되어 왔다[2-3]. 또한 많은 연구를 통해 입력설계 방법은 일정한 힘이 가해지는 작동기로 구성된 제어계나 다중모드 진동계에 효과적으로 적용 될 수 있다는 것이 연구되어 왔다[3-5].

입력 설계기법은 진동계의 고유모드를 가진 시키지 않는 일련의 임펄스와 입력을 컨벌루션 시킨 다음 계에 가해질 새로운 입력을 구성한다. 만약 설계된 입력이 진동을 발생시키지 않고 계를 운동시킬 수 있으려면 일련의 임펄스들은 일정 크기의 진폭과 시간 간격이 반드시 필요 하게 된다. 일련의 임펄스들의 진폭과 시간 간격은 제한 조건식들을 풀어냄으로써 결정될 수 있다.

본 연구에서는 유연구조물의 회전 시 발생할 수 있는 잔류진동을 최소화 시키는 강인한 입력설계 기법을 다루었다. 입력설계 방법에서 강인성의 확대는 임펄스 입력 수의 증가와 시간간격을 증대 시키고 입력신호와의 컨벌루션에 있어

2006년 11월 7일 접수 ~ 2006년 11월 24일 심사완료

* 정회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
연락처, E-mail : jhhwang@hau.ac.kr
경기도 고양시 덕양구 화전동 200-1

** 정회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

*** 대학원생, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

계산량을 증가 시킨다. 고속으로 작동되는 계에서의 시간지연의 확대는 그리 좋은 성능을 발휘하지 못하게 될 것이다. 따라서 본 연구에서는 임펄스의 수를 증가시키는 방법과 동시에 시간지연의 증대 없이 파라미터 오차의 넓은 범위에서 강인성을 갖는 입력설계 기법에 대해 고려하였다 [6,7]. 이러한 강인성을 갖는 입력설계 기법들을 회전운동을 하는 유연구조물에 적용 하였다. 그리고 실험을 통하여 강인한 입력 설계기법을 이용한 잔류 진동 제어기법의 강인성 성능을 확인 하였다.

2. 강인한 입력설계 방법

2.1 임펄스의 수 증가를 통한 강인한 입력설계

입력설계의 방법은 시간 영역에서의 임펄스 응답 함수에 기초하고 있다. 유연구조물의 모드를 1개로 가정할 때, 다음과 같은 임펄스 응답함수를 갖는다.

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

여기서 A는 임펄스의 크기, ω_n 는 구조물의 비감쇠 고유진동수, ζ 는 감쇠비, t_0 는 임펄스 입력이 가해진 시간이다. 만일 임펄스응답함수의 반주기에 해당되는 시간 후에 새로운 임펄스가 적절한 크기로 작용하면, 두 임펄스의 작용에 의한 응답(잔류진동)은 0으로 만들 수 있다. 이러한 결과는 수학적으로 2개의 임펄스 응답을 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

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

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

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

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

$$\phi_j = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t_j$$

여기서 B_j 는 각 N개의 임펄스 입력에 대한 식 (1)에서의 사인(sin)항의 계수들이고, t_j 는 임펄스가 가해진 시간, 그리고 ω_n 는 고유진동수이다. 입력이 모두 끝난 후 잔류진동이 '0'이 되기 위해서는 A_{amp} 라고 표현된 식(3)이 t_N 에서 '0'이 되어야 한다. 이것은 식 (3)에서 다음과 같은 두 개의 제곱 항이 독립적으로 0일 때 가능하다.

$$B_1 \sin \phi_1 + B_2 \sin \phi_2 + \dots + B_N \sin \phi_N = 0$$

$$B_1 \cos \phi_1 + B_2 \cos \phi_2 + \dots + B_N \cos \phi_N = 0 \quad (4)$$

여기서,

$$B_j = \frac{A_j \omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n(t_N-t_0)}$$

A_j 는 j번째 임펄스의 진폭, t_j 는 j 번째 임펄스가 가해진 시간, 그리고 t_N 은 마지막 임펄스가 가해진 시간(입력이 모두 끝나는 시간)이다. 이 식들은 다음과 같이 단순화 될 수 있는데 이 식들은 '0' 잔류진동 제한식 (Zero Vibration, ZV)으로서 잔류 진동을 '0'으로 만드는 임펄스 입력을 구성할 수 있다.

원래 입력신호는 입력설계기를 거치면서 입력과 임펄스들이 컨벌루션 되면서 새로운 입력신호가 만들어진다. 입력설계 시 입력신호는 처음 입력 설계를 거치지 않은 입력신호와 같은 결과를 갖기 위해 식 하나가 추가되어야 한다.

$$\sum_{j=1}^N A_j = 1 \quad (5)$$

만약 두 개의 임펄스 입력으로 구성되는 경우라면, 식(3)의 2개의 항만 고려하면 된다. 첫 번째 임펄스 입력이 '0' 시간에 가해진 경우 세 개의 방정식을 풀이하여 A_1, A_2, t_2 구할 수 있다. 이렇게 얻어진 두 개의 임펄스 입력은 시스템의 고유진동수와 감쇠비를 정확히 알고 있다는 가정 하에서만 잔류진동을 제거할 수 있다. 그러나 실제 시스템의 파라미터들을 정확히 알아내는 것은 불가능하므로 강인성을 갖는 입력이 요구된다. 만일 잔류진동 허용치를 5% 정도로 제한하는 계에서는 매개변수 추정치가 $\pm 3.2\%$ 내에 준

재 하여야 잔류진동 허용조건을 만족한다. 상당히 적은 범위에 대해서만 강인한 성질을 갖는 것을 볼 수 있다. 시스템 고유진동수의 불확실성에 대해 민감한 성질을 개선하기 위해서, 식 (4)를 진동수에 대해 미분 하여 '0' 으로 놓음으로서 새로운 제한식(Zero Vibration and Zero Derivative, ZVD)을 얻어낼 수 있다. 이제 두 개의 방정식을 추가됨에 따라서 세 개의 임펄스를 갖는 입력을 설계할 수 있다.

만일 시간지연에 대해 영향을 별로 받지 않는 진동계에서는 식 (4)을 추가적으로 미분함으로서 새로운 제한식(ZVDD)을 구성할 수 있다. 이렇게 추가적인 제한식 두개를 얻음으로써 새로운 임펄스 네 개를 구성할 수 있다. 임펄스의 수가 증가될수록 입력설계기법이 더욱 강인함을 Fig.1에서 확인할 수 있다. Fig.1은 식(3)을 이용하여 쉽게 그릴 수 있다. Fig.1은 임펄스 입력이 2 개인 경우, 3 개인 경우, 4 개인 경우에 대해 고유 진동수의 변화에 따른 잔류진동의 크기를 보이고 있다. Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 잔류 진동의 허용 범위를 5% 로 제한하는 경우 두개의 임펄스 입력의 경우 고유진동수의 오차가 3%이내 일 때 잔류진동 허용범위를 만족하지만, 세 개의 임펄스 입력의 경우는 고유진동수의 오차의 범위가 14% 로 확대되고 네 개의 임펄스 입력의 경우 25% 로 확대됨을 확인할 수 있다.

그러나 이러한 강인성의 확보는 필수적으로 시간 지연을 증가를 초래한다. 임펄스 입력이 하나가 추가되면 시간 지연은 반주기만큼 증가한다. 시간 지연의 확대를 심각히 고려하지 않는 계라면 임펄스의 개수를 증가시킴으로서 넓은 파라미터 오차에 대한 강인성의 범위를 확대시킬 수 있다.

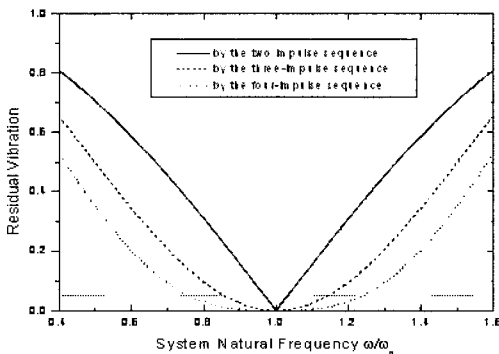


Fig. 1 Robustness of Two, Three, and Four Impulse Sequences

2.2 EI 개념을 이용한 강인한 입력설계

파라미터 오차에 대한 강인성의 증가를 위해서 추가적인 임펄스의 적용은 시간지연을 증대 시키고 입력신호와의 컨벌루션에 있어 계산량을 증가시킨다. 고속으로 작동되는 계에서의 시간지연의 확대는 그리 좋은 성능을 발휘하지 못하게 될 것이다. 그래서 시간 지연을 증대 시키지 않으면서 추가적인 강인성을 확대시키기 위해 벡터 다이어그램의 개념을 이용하여 Extra-Insensitivity Shaper를 설계하였다[6,7].

EI 개념을 이용하여 새로 구성되어진 세 개의 임펄스 입력의 민감도 그래프인 Fig.2에서 보면 진동 한계를 크게 했을 때 강인성은 상당히 증가하게 된다. 만일 진동허용한계를 5% 로 할 때 약 ± 20% 정도의 강인성을 갖는다. 이것은 Fig.1에 있는 세 개의 임펄스 입력의 구성(ZVD)보다 39%의 강인성이 증대 되었다. 만일 진동한계를 10% 로 할 때는 강인성 정도는 약 ± 28% 로 증가 하게 된다.

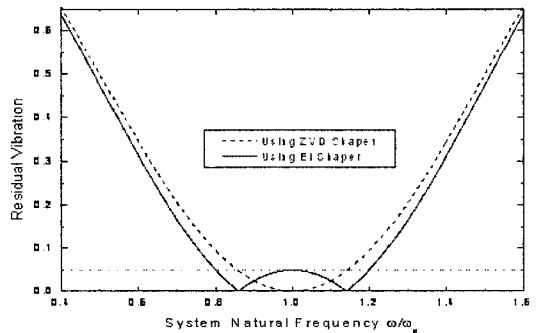


Fig. 2 Robustness of ZVD and EI Shaper

지금까지 언급한 강인성의 확장은 강인성의 범위는 확대되나, 파라미터가 약 ± 10%의 추정오차내에 있는 경우 오히려 임펄스 입력 세 개만으로 구성된 방법보다 나쁜 성능을 갖게 된다. 파라미터의 추정 오차가 적은 경우에 오차가 적도록 하기 위해 네 개의 임펄스 입력을 갖는 Two-hump EI를 새로이 구성하였다. 이렇게 구성된 임펄스 입력들의 민감도 그래프인 Fig.3에서 네 개의 임펄스 입력으로 구성되어 있는 ZVDD와 비교를 해보면 ZVDD에서는 추정 오차의 범위가 ± 24%정도에서 잔류진동 5%를 만족하는데 반하여 Two-hump EI의 새로운 네 개

의 펄스의 민감도범위는 $\pm 36\%$ 로 확대됨을 확인할 수 있다.

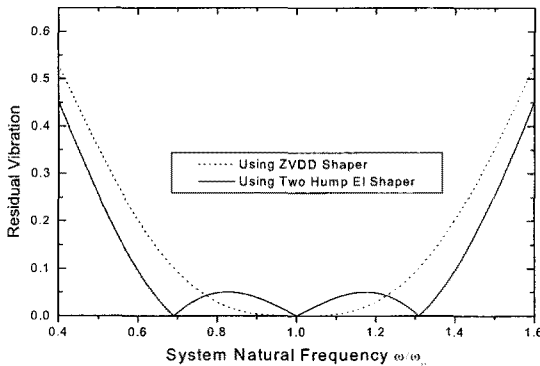


Fig. 3 Robustness of ZVD and Two-hump EI Shaper

3. 유연구조물의 운동방정식

대칭적인 유연한 부착물(appendage)을 갖는 구조물의 일반적인 모델로 Fig.4와 같은 균일한 베르누이-오일러 보와 연결된 강체를 고려한다. 작은 탄성변형을 갖는 평면상의 굽힘 운동과 큰 각도를 움직이는 강체회전을 함께 고려한다.

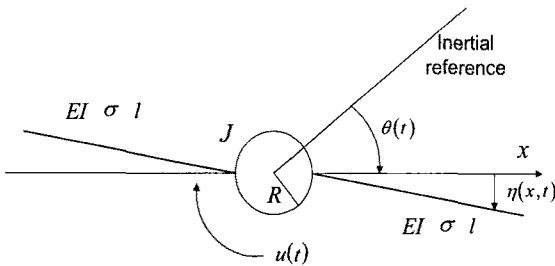


Fig. 4 General Model of Flexible Structure

Fig.4와 같은 유연구조물의 운동방정식을 상태 방정식으로 표현하면 다음과 같다. 이 식에서는 중심의 강체모드와 부착물의 유연모드를 함께 나타내었다.

$$\dot{p}(t) = Ap(t) + Bu(t) \tag{6}$$

여기서,

$$p(t) = [\theta(t) \dot{\theta}(t) q_1(t) q_2(t) \dots q_{\infty}(t) \dot{q}_1(t) \dot{q}_2(t) \dots \dot{q}_{\infty}(t)]$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{J}D_1 & \dots & -\frac{1}{J}D_n & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & & & & & I \\ \vdots & \vdots & & \ddots & & & & \\ 0 & 0 & & & 0 & & & \\ 0 & 0 & & & & & & \\ \vdots & \vdots & & & -K & & & \\ 0 & 0 & & & & & & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ C_1 \\ \vdots \\ C_{(x)} \end{bmatrix}$$

$$C_n = -\frac{1}{J} \sum_0^l (R+x)\phi_n(x)dx$$

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

4. 실험 및 고찰

본 절에서는 전절에서 얻어진 유연구조물 모델에 대해 입력설계기법의 강인성을 실험하였다. 먼저 다섯 종류의 입력 설계기를 사용하여 입력을 설계한 후, 잔류진동의 크기를 실험으로 측정하였다. 이 입력은 강체 구조물이 90° 를 회전하게 설계된 입력으로 가속도 단위를 가지고 있다.

비교 성능은 부착 구조물의 끝단 변형을 고려하였다. 실험에 사용된 유연구조물의 파라메타 값은 Table 1과 같다. Fig.5는 계에 가해지는 입력과 이를 입력 설계기에 통과시킨 설계입력을 보여 주고 있다. 입력설계된 입력들은 임펄스수에 따라 시간지연이 증대됨을 알 수 있다.

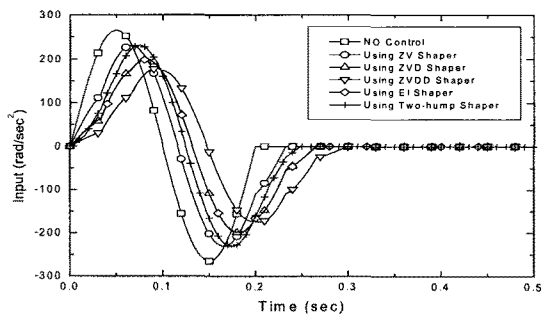


Fig. 5 Control Input with/without Shaping

4.1 실험 장치의 구성

실험 장치는 Fig.6과 같이 구성되어 있다. 컴퓨터에는 A/D 보드가 내부적으로 설치되어 있어 외부에서 들어오는 신호를 이산처리

한다. 컴퓨터는 A/D 보드를 통해 들어오는 데이터는 유연한 보의 잔류진동에 대한 값과 모터 회전각에 대한 값과, 모터를 회전하는 출력 인가 전압을 처리한다. 모터는 AC 서보 모터를 사용하였고, 모터에는 허브가 장착되었다. 허브에는 유연한 보의 특성을 가지고 있는 얇은 보를 부착하였다. 모터는 서보 드라이버와 같이 연결이 되어 있는데 서보 드라이버는 인가되는 전압을 대응되는 속도로 모터를 작동시키고, 또한 모터의 회전속도를 측정하여 외부로 신호를 내보낸다. 인터페이스 회로는 모터의 회전각에 대한 값을 처리하는데 사용된다. 구조물의 잔류진동을 측정하는 방법으로 스트레인 게이지(Strain Gauge)를 이용 하였다. 빔의 처짐이 선형적으로 변하는 구간을 측정하여 밀단(root 부분)에 가장 가까운 부분에 부착을 하였다. 스트레인 게이지에서 측정된 신호는 Signal Conditioning Amplifier를 이용하여 증폭을 시켜 컴퓨터에 입력하도록 하였다. 모터와 허브 그리고 유연한 보의 연결은 Fig.7과 같다.

Table 1과 같다.

Table 1 Parameters of the Experimental Structure

Parameter	Value
Length of the flexible beam (l)	0.264 m
Mass per unit length of the flexible beam (σ)	0.0964 kg/m
Bending stiffness of the flexible beam (EI)	0.1975 Nm ²
Hub radius (R)	0.05 m
Hub mass (M)	2.0176 kg
Natural Frequency (1st mode)	13 Hz
Damping ratio of the flexible beam (ζ)	20.7341×10^{-3}

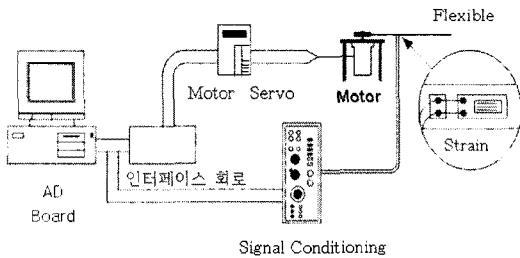


Fig. 6 Schematic of the Experimental Setup

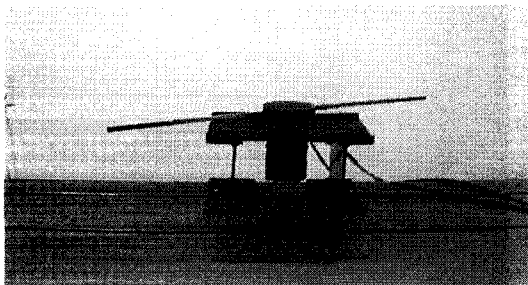


Fig. 7 Experimental Setup

유연구조물의 잔류진동 제어를 위해서는 구조물의 고유진동수와 감쇠비를 알고 있어야 한다. 구조물의 물성치 및 실험장치의 파라미터 값은

4.2 실험결과 및 검토

잔류진동 제어실험은 허브를 90° 회전시킬 때 발생하는 보의 잔류진동을 측정하였다. 제어할지 않을 경우 모터에 인가되는 입력의 구동시간은 0.2초이다. 잔류진동의 제어 방법은 입력설계 기법을 사용하였다. 이 실험에서 받아들이는 데이터는 회전하는 모터의 각, 즉 강체의 회전각과 유연구조물의 변형률 값을 받아들이는다. 스트레인 게이지를 이용하여 받아들여지는 변형률 값을 다시 끝단의 변위(deflection) 값으로 계산한다. 데이터 획득시간은 2초이다.

입력설계를 하지 않고 강체를 회전시킨 경우와 각각의 입력설계 방법을 적용하여 입력을 변화시킨 입력을 이용하여 강체를 회전시킨 경우에 대해 끝단 진동현상에 중점을 두고 비교하였다. Fig.8은 강체의 회전을 보여 주고 있다.

실험을 수행할 때, 모든 입력설계기법에서 동일한 고유진동수(파라메타) 오차를 갖는 것으로 설정한 후 입력설계를 수행하였다. 유연구조물의 1차모드의 실제고유진동수는 13Hz 이다. 획득한 데이터들은 노이즈를 포함하고 있어 Low-pass Filter를 사용하여 Filtering 을 수행하였다. Fig.9에서 나타낸 바와 같이 입력설계 방법 중 ZVDD 와 Two-hump EI Shaper가 가장 좋은 진동억제 성능을 보이는 것을 실험으로 확인 할 수 있었다.

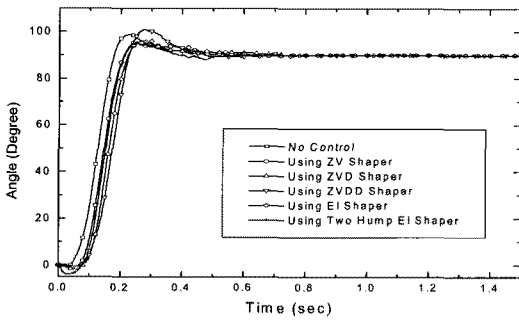


Fig. 8 Rigid Body Motion of the Hub

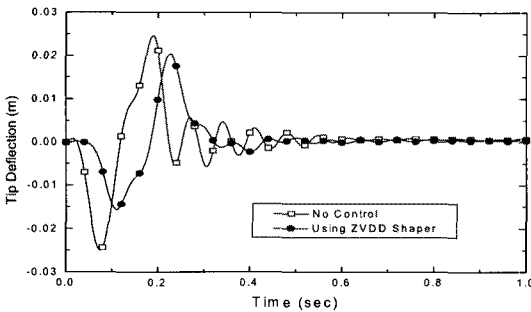


Fig. 9(a) Tip Deflection of Structure

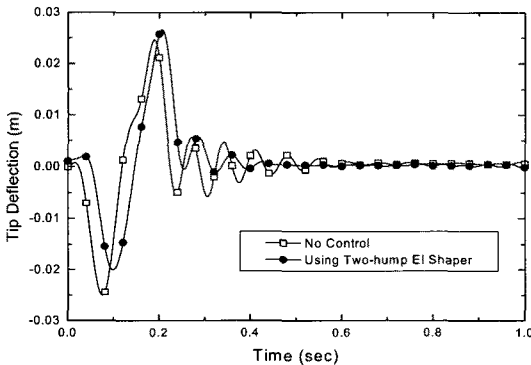


Fig. 9(b) Tip Deflection of Structure

5. 결 론

본 논문에서는 유연구조물의 잔류진동 억제기법의 일종인 입력설계기법의 강인성 확장에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 유연부착물을 갖는 구조물의 운동을 제어하기 위하여 실험대상에 대한 모델링을 수행하였고 각각의 입력설계 기법을 이용하여 파라미터 오차에 대하여 강인성을 가지는

입력들을 설계 하였다. 실험에서는 AC 서보 모터를 이용하여 허브를 회전 시켰고, 유연구조물의 끝단 변형 측정을 위해서 스트레인 게이지를 이용하였다. 모터 내부제어 프로그램은 Borland C를 사용하여 작성하였다.

본 연구에서 사용된 입력설계기법은 임펄스 수의 증가를 통한 강인성의 확장 방법인 ZVD, ZVDD Shaper와 시간지연의 증대 없이 잔류진동 제한 범위에 여유를 갖게 하여 구성 되어진 EI Shaper, Two-hump EI Shaper 기법이다. 본 실험을 통하여 사용된 모든 입력설계기법은 유연구조물의 잔류진동을 빠른 시간 내에 감쇠시키고 있음을 확인 할 수 있었다. 각각의 입력설계 방법들을 고려할 때 시간 지연이 계의 운동에 심각하게 영향을 미치는 경우 강인성의 확장을 위하여 세 개의 임펄스를 가지는 EI Shaper 나 네 개의 임펄스 입력을 가지는 Two-hump EI Shaper를 적용할 수 있다. 그러나 이 기법들은 파라미터의 오차가 매우 작은 경우, 오히려 잔류진동 감쇠특성이 나쁜 단점을 가지고 있다. 시간 지연이 계의 운동에 많은 영향을 끼치지 않는다면 네 개, 다섯 개의 임펄스 입력들로 확장함으로서 매우 우수한 파라미터 오차에 대한 강인성을 확보할 수 있다. 강인성측면의 성능은 Two-hump EI Shaper가 가장 만족할만한 성능을 보여줌을 확인할 수 있었다.

후 기

본 논문은 2003학년도 한국항공대학교 교비지원 연구비에 의해 지원된 연구의 결과입니다.

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] Singhose, W.P, Derezinski, S. and Singer, N., 1996, "Extra-Insensitive Input Shapers for Controlling Flexible Spacecraft," J. Guidance,

Control, and Dynamics, Vol. 19, pp. 385~391.

[4] Singh, T. and Vadali, S. R., 1993, "Robust Time-Delay Control," ASME J. Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 115, pp. 303~306.

[5] Crain, E.A., Singhose, W.E., Seering, W. 1996 "Derivation and Properties of Convolved and Simultaneous Two-mode Input Shapers"

the 1996 IFAC World Congress.

[6] Singhose, W., Seering, W. and Singer, N., 1994, "Residual Vibration reduction Using Vector Diagrams to Generate Shaped Inputs", ASME Vol.116, pp. 654-659.

[7] Singhose, W.E., Portor, L.G., Tuttle, T.D., and Singer, N.C., 1997 "Vibration Reduction Using Multi-Hump Input Shapers.