

동적 시스템의 잔류진동 제거를 위한 새로운 다모드 입력성형기 설계 방법

A New Design Method for Multi-mode Input Shapers to Eliminate Residual Vibration in Dynamic Systems

박상원¹, 홍성욱^{2,✉}, Danielson Jon³
Sang-Won Park¹, Seong-Wook Hong^{2,✉} and Jon Danielson³

¹ 금오공과대학교 기전공학과 (Department of Mechatronics Engineering, Kumoh National Institute of Technology)

² 금오공과대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology)

³ School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology

✉ Corresponding author: swhong@kumoh.ac.kr, Tel: 054-478-7344

Manuscript received: 2008.7.30 / Revised: 2009.1.7 / Accepted: 2009.1.23

The current tendency toward light weight and fast machines has lead to a need to suppress vibration of flexible dynamic systems. Input shaping is an efficient tool to eliminate transient and residual vibration caused by motion of these systems. This paper proposes a new formulation of the design method for multi-mode input shapers to eliminate residual vibration in flexible dynamic systems. The essence of the proposed method is to minimize the number of impulses to be $n+1$ for n -mode input shapers. This paper also suggests a solution procedure to solve the complex-valued nonlinear matrix equation for the input shapers. The proposed method is applied to two-mode input shapers. This paper discusses characteristics of several input shapers obtained under the same condition. Simulations and experiments show that the proposed method is very useful for designing multi-mode input shapers.

Key Words: Dynamic System (동적 시스템), Input Shaping Method (입력성형기법), Input Shaper (입력성형기), Multi-mode Input Shaper (다모드 입력성형기), Residual Vibration (잔류진동)

1. 서론

구동계를 가지는 모든 동적 시스템에서 구조물의 동적 유연성으로 인해 동작 및 정지 시에 원하지 않는 잔류진동(Residual Vibration)이 발생하게 된다. 이 같은 잔류진동은 원하는 경로로 시스템을 이동하기 어렵게 만들 뿐만 아니라, 고속 위치 결정 작업 시 목표지점에서의 동작 완료 시간을 지연시킴으로써 다음 동작으로의 전환을 느리게 한다. 이런 이유로 시스템의 성능을 저하 시키는 매우 중요한 요인 중의 하나가 되고 있다.

이론적으로 동적 시스템은 많은 진동모드를 가지게 되지만 대체로 가장 낮은 고유진동수를 갖는 한 개의 진동모드가 진동에 가장 큰 영향을 미치는 경우가 많다. 따라서 대부분의 경우 진동응답에 가장 큰 영향을 많이 미치는 한 개의 진동모드를 제어함으로써 만족할 만한 결과를 얻을 수 있다. 하지만, 시스템의 진동에 영향을 미치는 진동모드가 2 개 이상인 다모드를 고려해야만 하는 경우 또한 많이 존재한다.¹⁻³ 본 연구에서는 다모드계에서의 잔류진동 제거를 위한 입력성형기법을 제안하고자 한다.

입력성형기법(Input Shaping Method)은 시스템의 성능에 영향을 미치는 과도진동 또는 잔류진동을 효과적으로 제거하기 위한 방법으로 근래 많은 연구가 이루어지고 있다.¹⁻⁹ 입력성형기법은 일반적으로 많이 사용되고 있는 되먹임 제어(Feedback Control)⁴ 와 달리 추가적인 하드웨어 작업이 요구되지 않고, 복잡하지 않은 구조로 인해 시스템에 쉽게 적용할 수 있다는 장점이 있다.

2 개 이상의 진동모드를 고려해야 하는 다모드 입력성형기법 중 지금까지 개발된 방법은 3 가지로 나누어 볼 수 있다.^{1,4,5} 가장 잘 알려진 방법으로는 한 개의 모드에 대해 입력성형기를 설계하는 방법을 확장한 것으로 컨볼루션 입력성형기(Convolved Input Shaper)가 있다.^{1,7} 컨볼루션 입력성형기는 개별모드에 대한 입력성형기(Input Shaper)를 개별모드 별로 설계한 후 설계된 입력성형기들을 컨볼루션(Convolution)하여 다모드 입력성형기를 생성하는 방법이다. 이 입력성형기는 구성이 쉽고 모든 대상모드 진동 제거에는 효과적이지만, 개별모드에 대한 입력성형기들의 컨볼루션을 통해 얻어지므로 입력성형기의 지속시간(Duration Time)이 상당히 증가하게 된다.¹ 이로 인해 시스템의 응답속도가 느려지게 되고, 이는 시스템의 성능에 악영향을 미치게 된다.

다음으로 모든 진동모드에 대해 구속 방정식을 설정하고 이를 동시에 풀어 성형기를 생성하는 방법이 있다.^{1,7,8} 이와 같은 방법으로 설계된 입력성형기를 동시적인 성형기(Simultaneous Shaper)라고 한다. 이 방법은 초기에 설정하는 입력성형기 형태에 의해 영향을 받게 되지만 일반적으로 입력성형기의 지속시간이 앞에서 설명한 컨볼루션 방식의 입력성형기 보다 짧아지도록 설계할 수 있다. 그렇지만, 몇 가지 특별한 경우를 제외하고는 수치적인 최적화를 통해 얻어지므로 일반화가 어렵다는 문제가 있다.

마지막으로 SI 성형기(Specified Insensitivity Shaper)를 응용한 방법이 있다.⁹ SI 성형기는 제어하고자 하는 모드들의 주파수 또는 근접 주파수와 허용진동크기를 구속조건으로 두어 입력성형기를 결정한다. 이 방법은 고려대상 모드의 수와 상관없이 진동허용치를 제한하는 주파수의 수에 영향을 받게 되며 대상 시스템의 고유 진동수를 정확히 알 수 있는 경우에는 비효율적인 방법이 될 수 있다. 허용진동크기는 일반적으로 제어대상 모드의 진동크기가 입력성형기법을 적용하지 않은 경

우를 기준으로 5%이내로 사용한다.

본 논문에서는 기존의 다모드 입력성형기들과 다른 새로운 방식의 다모드 입력성형기 설계 방법을 제안하였다. 기존의 컨볼루션 방식의 다모드 입력성형기 설계방법에서는 모드 당 두 개의 임펄스를 추가하는 방식으로 설계되었으나 본 논문에서는 모드 당 1 개의 임펄스를 추가하는 방식으로 수식화하여 설계변수를 최소화하였다. 그리고 제안된 이론식에 의하면 주어진 조건에 따라 다모드를 위한 여러 가지 입력성형기를 설계할 수 있으며 일반화가 가능하다. 본 논문에서는 이와 같은 설계 방법을 검증하기 위해 2 모드 시스템에 대한 여러 가지 입력성형기를 설계하고 시뮬레이션 및 실험을 통해 그 특성을 살펴보았다.

2. 기존의 다모드 입력성형기

대부분의 시스템에서는 한 개의 주도적인 모드가 응답에 직접적인 영향을 미치게 된다. 따라서 단일 모드에 대한 입력성형기가 대체로 유효하다. 여러 개의 모드가 고려되어야 하는 경우에도 비교적 손쉽게 입력성형기를 도입할 수 있다. 여기서는 앞 장에서 언급하였던 다모드 입력성형기 설계 방법 중 컨볼루션 입력성형기에 대해 설명하고자 한다. Fig. 1 은 기존 연구에서 제시한 다모드 입력성형기 생성 방법을 나타낸 것이다. 여기에 사용된 개별 입력성형기는 ZV(Zero Vibration)이며, 2 개의 임펄스를 가지고 있다. 제어하고자 하는 2 개의 모드 α, β 의 각 모드에 따라 설계된 입력성형기를 각각 $i_1^\alpha(t), i_1^\beta(t)$ 라 둔다. 여기서 하첨자 1 은 모드 개수를 의미한다. 즉 여기서는 1 개 모드를 고려한 입력성형기를 의미한다. 각각에 대한 라플라스 변환식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$I_1^\alpha(s) = A_1^\alpha + A_2^\alpha e^{-\Delta_\alpha s} \quad (1)$$

$$I_1^\beta(s) = A_1^\beta + A_2^\beta e^{-\Delta_\beta s} \quad (2)$$

여기서 $\Delta_\alpha = \pi/\omega_\alpha$, $\Delta_\beta = \pi/\omega_\beta$ 로 표현된다. 각각의 입력성형기는 해당 진동모드에 따라 설계되었으므로 대응이 되는 고유치를 영점으로 갖는다. 따라서 두 입력성형기를 컨볼루션해서 얻어지는 입력성형기는 대상시스템의 2 개 극점 모두를

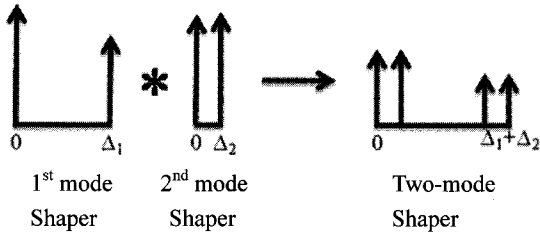


Fig. 1 Convolution of two input shapers to form a multi-mode shaper

상쇄할 수 있다. 즉, 다음과 같은 입력성형기를 이용하면 두 개의 모드를 갖는 시스템에 대해 입력성형을 동시 적용할 수 있다.

$$I^{\alpha+\beta}(s) = I^\alpha(s)I^\beta(s) \quad (3)$$

2 모드 성형기(Two-mode Shaper)는 2 개의 입력성형기 $i^\alpha(t), i^\beta(t)$ 를 컨볼루션함으로써 생성할 수 있다. 이렇게 생성된 입력성형기의 지속시간은 2 개의 입력성형기 지속시간의 합과 같다.

따라서 다모드 시스템의 진동을 제어하기 위해 Fig. 1 과 같은 입력성형기 설계 방법을 이용할 경우 입력성형기 지속시간이 길어지고 결국 시스템의 상승시간(Rise Time)이 불가피하게 증가하게 된다.

고려해야 할 모드가 3 개 이상인 경우에도 앞서 기술한 방식과 같이, 각 모드별로 설계된 개별 입력성형기를 컨볼루션하는 방식으로 얻을 수 있다. 그러나 모드의 수가 많아질수록 상승시간이 증가하게 되어 응용성에 제한이 따르게 된다.

3. 새로운 다모드 입력성형기

3.1 다모드 입력성형기 설계식

본 연구는 임펄스의 개수와 상승시간을 줄이면서 다모드 시스템의 잔류진동을 효과적으로 제거할 수 있는 새로운 입력성형기를 제안하는 것이 목적이다. 본 연구에서 제안하는 새로운 입력성형기의 임펄스 개수는 $n+1$ 개이다. 여기에서 n 은 고려대상이 되는 진동모드의 개수이다.

본 연구에서 제안한 다중 모드 시스템에 대한 입력성형기는 다음과 같이 $n+1$ 개 임펄스들의 조합으로 나타낼 수 있다.

$$i_n(t) = A_1\delta(t-t_1) + A_2\delta(t-t_2) + \dots + A_{n+1}\delta(t-t_{n+1}) \quad (4)$$

여기에서 $A_k, k = 1, 2, \dots, n+1$ 는 k 번째 임펄스 크기(Impulse Amplitude)이며, $t_k, k = 1, 2, \dots, n+1$ 는 k 번째 임펄스의 시간(Time Location)이다. $t_k < t_{k+1}, k = 1, 2, \dots, n$ 의 관계가 성립하여야 하며, 첫번째 임펄스의 작용시간을 0 으로 두면 편리하다.

식(4)를 라플라스 변환을 하여 다시 정리하면 식(5)와 같다.

$$I_n(s) = A_1 + A_2e^{-t_2s} + A_3e^{-t_3s} + \dots + A_{n+1}e^{-t_{n+1}s} \quad (5)$$

주어진 시스템의 전달함수를 $G(s)$, 기준입력 명령을 $U(s)$ 라 하면, 식(5)와 같이 주어진 입력성형기가 있을 경우 응답은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Y(s) = G(s)U(s)I_n(s) = G(s)I_n(s)U(s) \quad (6)$$

만약 $I_n(s)$ 의 영점이 전달함수 $G(s)$ 의 극점과 일치한다면 시스템의 응답에서 오실레이션(Oscillation)은 없어지게 된다.

대상시스템이 안정하고, 저감쇠(Under-damped) 이면 입력성형을 적용하기 위한 각 모드의 극점(또는 고유치)은 식(7)과 같이 정의할 수 있다.

$$s_k = \sigma_k + j\omega_k = -\zeta_k\omega_{nk} + j\omega_{nk}\sqrt{1-\zeta_k^2}, k = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

여기에서 ζ_k, ω_{nk} 는 k 번째의 모드의 감쇠비(Damping Ratio)와 고유진동수(Natural Frequency)이며, ω_k 는 k 번째 감쇠고유진동수(Damped Natural Frequency)로서 $\omega_k = \omega_{nk}\sqrt{1-\zeta_k^2}$ 와 같이 정의된다. 또한 각 고유치의 공액복소수(Complex Conjugate)들도 시스템의 고유치가 된다.

다모드 진동시스템의 잔류진동을 제거하기 위해 여기서 소개하는 입력성형기는 기준명령(Reference Command)을 수정하는 방식으로, 다른 모드에 대한 진동을 가진시키지는 않는다. 입력성형기가 제어대상 모드들에 의해 구성되는 극점을 상쇄하기 위해서는 대상 고유치를 영점으로 가져야 한다. 즉, 다음과 같은 식을 만족하여야 한다.

$$I_n(s_k) = 0, k = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

식(8)은 모두 복소변수 비선형방정식으로써 총 $2n$ 개의 실변수 비선형방정식에 대응된다. 그런데 구해야 할 미지수의 개수는 $2n+1$ 이므로 해를 구하기 위한 식이 하나가 더 필요하다. 마지막으로 입력성형기에 의해 변경된 입력의 최종값 크기에 변화가 없도록 임펄스 크기의 합을 1 로 두는 다음과 같은 제한식을 도입한다.

$$I_n(0) = A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_{n+1} = 1 \quad (9)$$

결국 식(8)과 (9)로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & e^{-t_2 s_1} & e^{-t_3 s_1} & \dots & e^{-t_{n+1} s_1} \\ 1 & e^{-t_2 s_2} & e^{-t_3 s_2} & \dots & e^{-t_{n+1} s_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & e^{-t_2 s_n} & e^{-t_3 s_n} & \dots & e^{-t_{n+1} s_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \vdots \\ A_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

식(10)은 $t_k, k=2, \dots, n+1, A_k, k=1, 2, \dots, n+1$ 의 미지수로 이루어진 복소 비선형 행렬방정식이다. 따라서 식(10)으로 주어지는 비선형 행렬방정식을 풀면 다모드에 대한 새로운 입력성형기 설계가 가능하다.

식(10)에는 미지변수가 행렬내부에 있게 되므로 직접적인 계산에 의해 해를 구할 수 없으며 반복계산에 근거한 수치해석적 해법을 이용해야 한다. 식(10)의 해를 구하는 한 방법으로 다음과 같이 오차에 대한 절대값(norm)을 정의하고 그 절대값이 0 이 되도록 하는 해를 찾는 방법이 가능하다.

$$\text{norm} \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & e^{-t_2 s_1} & e^{-t_3 s_1} & \dots & e^{-t_{n+1} s_1} \\ 1 & e^{-t_2 s_2} & e^{-t_3 s_2} & \dots & e^{-t_{n+1} s_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & e^{-t_2 s_n} & e^{-t_3 s_n} & \dots & e^{-t_{n+1} s_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \vdots \\ A_{n+1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \right\} \quad (11)$$

본 연구에서는 식(11)로 정의된 절대값이 0 이 되는 비선형방정식으로부터 해를 구하였다. 다음 절에는 이상 설명한 다모드 입력성형기의 가장 간단한 예인 2 개의 모드를 고려한 경우를 통해 제안된 방법의 특성에 대해 설명하였다.

3.2.2 개 모드를 고려한 입력성형기

모드의 개수가 2 개인 경우 식(4)는 다음과 같이 표현된다.

$$i_2(t) = A_1 \delta(t-t_1) + A_2 \delta(t-t_2) + A_3 \delta(t-t_3) \quad (12)$$

식(12)를 라플라스 변환하면 다음과 같다.

$$I_2(s) = A_1 e^{-t_1 s} + A_2 e^{-t_2 s} + A_3 e^{-t_3 s} \quad (13)$$

2 개의 모드가 각각 s_1, s_2 라는 고유치로 표현된다고 가정하고, 편의상 시작시간을 0 이라 하여 $t_1 = 0$ 로 두면, 입력성형기를 설계하기 위해 식(8)을 이용하여 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$I_2(s_1) = A_1 + A_2 e^{-t_2 s_1} + A_3 e^{-t_3 s_1} = 0 \quad (14)$$

$$I_2(s_2) = A_1 + A_2 e^{-t_2 s_2} + A_3 e^{-t_3 s_2} = 0 \quad (15)$$

입력성형기에 대한 크기 제한 조건을 다음과 같이 두기로 한다.

$$A_1 + A_2 + A_3 = 1 \quad (16)$$

따라서 식(14)~(16)을 만족하는 다음식을 통해 t_2, t_3 및 A_1, A_2, A_3 를 구하면 원하는 입력성형기를 얻을 수 있다.

$$\text{norm} \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{-t_2 s_1} & e^{-t_3 s_1} \\ 1 & e^{-t_2 s_2} & e^{-t_3 s_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right\} = 0 \quad (17)$$

Figs. 2, 3 은 식(17)로 주어지는 조건식을 이용하여 2 개의 진동모드를 가지는 다모드 시스템에 대해 계산한 입력성형기의 특성을 나타낸 것이다. 여기서 첫 번째 모드는 1Hz 로 고정하였고 두 번째 고유진동수를 변경하여 그 변화를 관찰하였다. Fig. 2 는 두 번째 고유진동수의 변화에 따른 입력성형기 지속시간의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 2 에서 볼 수 있는 바와 같이 두 개의 진동모드를 가지는 시스템에 대해 주파수 대역에 따라 여러 개의 입력성형기가 존재함을 알 수 있다. 한편 Fig. 3 은 Fig. 2 에서 확인된 지속시간 계산결과로부터

그 값이 가장 작은 한계선을 따라 임펄스 크기의 변화를 계산하여 나타낸 것이다.

Fig. 4 는 Fig. 2 와 3 의 결과를 바탕으로 실제로 설계된 입력성형기들의 예를 보여주고 있다. 계산된 서로 다른 입력성형기 간의 비교를 위해 여기서는 Fig. 2 에 표시한 바와 같이 고유진동수 1Hz, 4Hz 에서 계산된 3 개의 입력성형기를 보여주고 있다. 그 지속시간은 각각 0.4s, 0.6s 그리고 0.8s 이다. 2 개의 진동모드를 위해 사용되는 전통적인 입력성형기는 4 개의 임펄스를 가지고 있지만, 본 연구에서 제안하는 새로운 입력성형기는 Fig. 4 에서 보여지는 것과 같이 3 개의 임펄스를 가지고 있다. 본 연구에서와 같이 1Hz 와 4Hz 를 고유진동수로 가지는 다모드에서 Fig. 1 과 같은 고전적인 방법으로 입력성형기를 설계하게 되면 입력성형기의 지속시간이 0.625s 가 된다.

지속시간이 최소인 입력성형기(Short duration)의 두 번째 임펄스는 음의 값을 가지는 반면, 나머지 입력성형기의 모든 임펄스는 양의 값을 가진다. 그리고 최소 지속시간을 갖는 입력성형기와 최장 지속시간을 갖는(Long Duration) 입력성형기에서는 임펄스 간 시간간격(Time Spacing)이 균일한 특성을 보이고 있지만, 중간 지속시간(Medium Duration)을 갖는 입력성형기는 시간간격에 차이가 나는 독특한 결과를 보여주고 있다.

Fig. 5 는 설계된 입력성형기에 대한 민감도 곡선(Sensitivity Curve)을 보여주고 있다. 지속시간이 최소인 입력성형기와 최장인 입력성형기 그리고 기존의 컨볼루션 입력성형기의 민감도 곡선을 동시에 비교해서 보여주고 있다. 여기서 민감도는 입력성형을 적용하지 않았을 경우의 진동크기를 1 로 했을 때, 설계한 입력성형기를 적용했을 때 고유진동수 오차에 의해 발생하는 잔류진동의 크기를 상대적으로 비교한 결과로서 그 값이 클수록 좋지 않다. Fig. 5 의 가로축은 고유진동수를 세로축은 상대적 진동크기를 나타낸 것이다. 잔류진동 제거를 위해 사용된 서로 다른 3 가지의 다모드 입력성형기 모두 1Hz, 4Hz 에서 진동의 크기가 0 이므로 두 고유진동수가 정확히 1Hz, 4Hz 라면 진동이 완전히 제거됨을 알 수 있다. 입력성형기 설계의 목표 주파수인 1Hz, 4Hz 외의 진동의 크기가 0 이 되는 주파수가 존재하게 되는 이유는 입력성형기가 지수함수로 표현되어 무한히 많은 영점을 갖기 때문이다.

한편 제안된 입력성형기 중 최소 지속시간을

갖는 입력성형기의 민감도가 특히 높게 나타나고

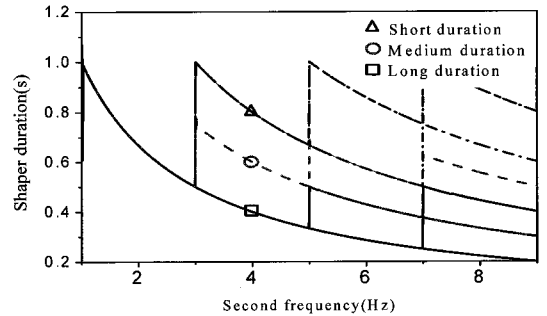


Fig. 2 Two-mode input shaper duration with respect to the second natural frequency

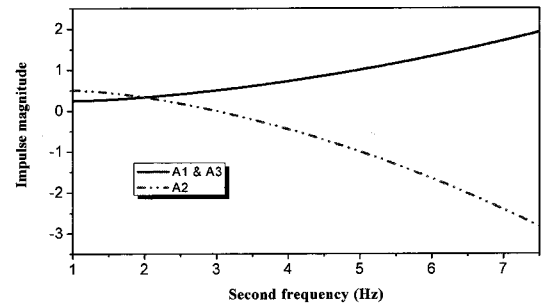
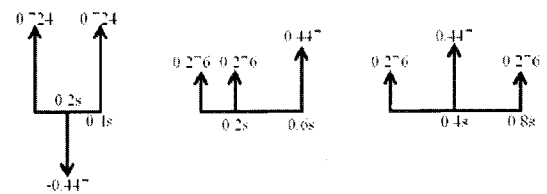


Fig. 3 Impulse amplitudes with respect to the second natural frequency



(a) short duration (b) medium duration (c) long duration
Fig. 4 Three possible input shapers for $f_1 = 1\text{Hz}, f_2 = 4\text{Hz}$

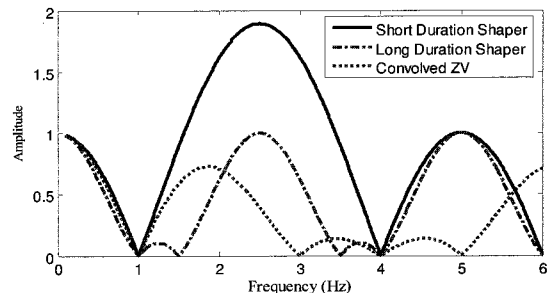


Fig. 5 Sensitivity curves for convolved ZV, short and long duration shapers when $f_1 = 1\text{Hz}, f_2 = 4\text{Hz}$

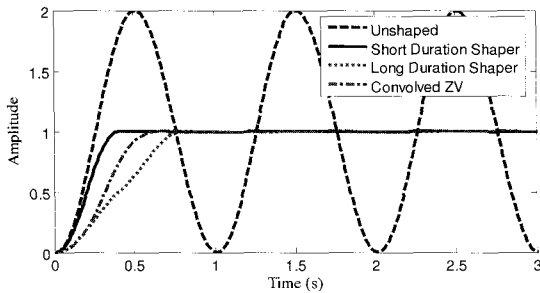


Fig. 6 Comparison of time responses with three input shapers and without shaper when $f_1=1\text{Hz}$, $f_2=4\text{Hz}$

있다. 민감도가 높다는 것은 모델링 오차가 있을 경우 잔류진동이 커질 수 있음을 의미하는 것으로 바람직하지 않은 특성이다. 반면 지속시간이 긴 입력성형기의 경우 민감도 관점에서 상대적으로 우수한 특성을 보이고 있음을 확인할 수 있다.

민감도 계산결과에서 확인할 수 있는 바와 같이 일반적으로 입력성형기 지속시간과 민감도는 반비례하는 양상을 보인다. 즉, 짧은 지속시간을 갖는 입력성형기는 모델링 오차에 따른 민감도가 커지는 경향을 보이게 된다. 따라서 실제 적용 시에는 대상 시스템에 대한 고유진동수의 정확성 여부와 진동허용 범위 등의 정보에 기초하여 민감도 크기를 제한하고, 이를 적절하게 만족시킬 수 있는 입력성형기를 선택할 필요가 있다.

Fig. 6 은 본 논문에서 제안하는 새로운 입력성형기와 기존 연구의 입력성형기들에 대한 진동응답을 비교하여 나타낸 것이다. 여기에 비교한 새로운 입력성형기는 임펄스의 시간간격이 짧은 것과 긴 것이다. 잔류진동 제거의 효과는 모두 동일하지만 적용된 방법에 따라 상승시간이 크게 차이나는 것을 볼 수 있다.

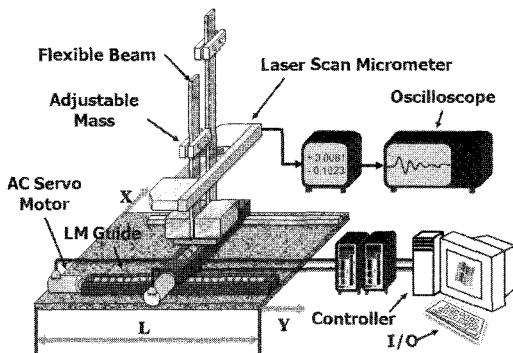


Fig. 7 Schematic diagram of experimental setup

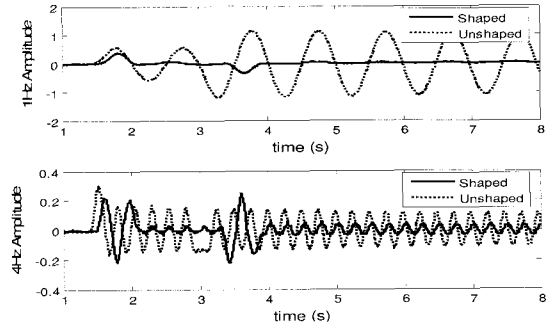


Fig. 8 Experimental response of short duration shaper

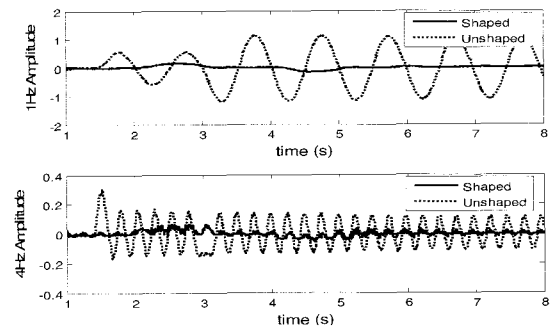


Fig. 9 Experimental response of long duration shaper

4. 실험 및 결과 토의

Fig. 7 은 본 논문에서 사용된 실험장치의 개략도이다. 실험용 스테이지는 서보모터(Servo Motor)와 볼스크루(Ball Screw)로 구동된다. 스테이지 위에는 동일한 유연보(Flexible Beam) 두 개가 고정되어 있으며 각 유연보에는 위치를 이동하여 고정시킬 수 있는 질량체가 있다. 보에 부착된 이와 같은 질량의 위치를 조정함으로써 두 유연보가 서로 다른 고유진동수를 갖도록 설정할 수 있다. 스테이지의 운동으로 인해 발생하는 유연보의 진동은 스테이지 위에 탑재한 레이저 스캔 마이크로미터(Laser Scan Micrometer, LSM)를 이용하여 측정하였다. LSM 은 평면레이저빔을 발생시켜, 이를 쇄교하는 물체의 운동을 측정할 수 있도록 개발된 장비로서 두 유연보의 진동을 측정 하는데 매우 효과적이다. 측정된 신호는 디지털 오실로스코프를 통해 저장하였다. 정확한 속도 및 위치제어를 위해 DSP 모션 컨트롤러를 사용하였고 출발과 정지과정에서 가감속을 하며 스테이지를 200mm 이송시켰다.

Figs. 8, 9 는 2 개의 유연보 고유진동수를 각각

1Hz 와 4Hz 를 가지도록 설정하고, XY 스테이지를 동작시키면서 입력성형기법을 적용한 경우와 그렇지 않은 경우에 대한 응답을 측정된 결과를 나타낸 것이다. Fig. 8 은 최소 지속시간을 가지는 입력성형기를 사용한 결과, Fig. 9 는 최장 지속시간의 입력성형기를 사용한 결과를 보여주고 있다.

Fig. 8 과 9 모두 입력성형기법을 사용하지 않은 경우의 응답을 점선으로, 입력성형기법을 사용한 경우의 응답을 실선으로 나타내었다. 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 2 개의 진동 모드를 가지는 시스템에 대해 본 연구에서 새롭게 도입한 입력성형기가 잔류진동을 제거하는 데 효과적임을 알 수 있다. 한편, Fig. 8 과 9 모두에서 입력성형을 적용하지 않은 경우의 고차모드 진동을 살펴보면 3 초가 지난 후 진동이 반전되는 현상을 보이고 있는데 이는 3 초가 지난 후 스테이지가 정지되면서, 스테이지의 출발 시 발생한 진동과 정지 시 발생한 진동이 중첩되어 나타난 것이다.

Fig. 8 의 결과를 Fig. 9 의 결과와 비교해 보면 저차모드에 비해 고차모드의 잔류진동이 다소 많이 나타나고 있는데, 이는 입력성형기 설계 시 비감쇠계로 가정한 점과 설정한 고유진동수에 약간의 오차가 개입되어 나타난 것으로 판단되며, 최소 지속시간의 입력성형기 민감도가 더 높아 그 크기가 최장 지속시간의 입력성형기에 비해 조금 더 크게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 다모드 시스템을 위한 새로운 입력성형기 설계방법을 제안하였다. 이를 위해 일반적으로 다모드 시스템의 입력성형기를 설계할 수 있는 식을 제안하였다. 또한 제안된 입력성형기 설계방법에 의해 구해진 입력성형기기의 특성을 시뮬레이션과 실험을 통해 확인하였으며 그 유용성을 확인하였다. 2 개의 진동모드를 가지는 시스템을 중심으로 새로운 입력성형기를 검토한 결과, 제안된 입력성형기법에 의하면 동일 조건에서 여러 가지 입력성형기 설계가 가능하며 문제의 여건에 적합한 입력성형기를 선택하여 사용할 수 있음을 확인하였다. 특히 임펄스의 개수를 최소화함으로써 입력성형과정을 단순화할 수 있으며 상승시간을 특성에 맞추어 줄일 수 있는 입력성형기들 설계할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 지속시간을 감소시키면 민감도 특성이 나빠지므로 모델링

정밀도를 높이기 위한 적절한 대책이 필요하다.

후 기

본 연구의 일부는 나노정밀부품인력양성사업단 및 탑엔지니어링㈜의 지원에 의해 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Singhose, W. E. and Seering, W. L., "Command Generation for Dynamic Systems," Lulu.com, 2007.
2. Park, U. W., Lee, J. W. and Noh, S. H., "Reduction of Residual Vibration for 2 Axes Overhead Crane by Input Shaping," J. of the KSPE, Vol. 17, No. 4, pp. 181-188, 2000.
3. Kim, D. and Singhose, W. E., "Reduction of Double-Pendulum Bridge Crane Oscillations," The 8th Int. Conf. on MOVIC, pp. 300-305, 2006.
4. Smith, O. J. M., "Feedback Control Systems," McGraw-Hill Book Co., Inc., 1958.
5. Hong, S. W., Park, S. W. and Singhose, W. E., "Input Shaping for Vibration Reduction in Precise Positioning System," J. of the KSPE, Vol. 25, No. 4, pp. 26-31, 2008.
6. Jang, J. W., Park, S. W. and Hong, S. W., "Command Generation Method for High-Speed and Precise Positioning of Positioning Stage," J. of the KSPE, Vol. 25, No. 10, pp.122-129, 2008.
7. Singhose, W. E., Crain, E. A. and Seering, W. P., "Convolved and Simultaneous Two-Mode Input Shapers," IEEE Control Theory and Applications, Vol. 144, No. 6, pp. 515-520, 1997.
8. Rappole, B. W., Singer, N. C. and Seering, W. P., "Multiple-Mode Impulse Shaping Sequences for Reducing Residual Vibrations," ASME Mechanisms Conference, pp. 11-16, 1994.
9. Singhose, W. E., Seering, W. P. and Singer, N. C., "Input Shaping for Vibration Reduction with Specified Insensitivity to Modeling Errors," Japan-USA Symposium on Flexible Automation, pp. 307-313, 1996.