

Z-영역에서 설계된 입력성형필터의 민감도 해석

Sensitivity Analysis of Input Shaping Filter Designed in the Z-domain

박 운 환, 이 재 원, 임 병 덕

(Un-Hwan Park, Jae-Won Lee and Byoung Duk Lim)

Abstract : To obtain high positioning accuracy for a long, flexible manipulator, residual vibration must be removed from the tip motion. But it is difficult to control the vibration of low frequency. There are open-loop and closed loop methods in the elimination of the residual vibration. We introduce input shaping technique has been used as a simple open-loop method of controlling the residual vibration of a flexible manipulator. Design of input shaper in the continuous time domain is complicated. This paper presents a new technique that designs input shaper in the z-domain and analyzes input shaping method in the z-domain. This technique is simple and easy to design input shaper.

Keywords : input shaping, residual vibration, sensitivity, z-domain

I. 서론

산업현장에서 로봇의 구조물이 가벼우면서 빠르게 응답하는 것을 목표로 한다. 가볍고 유연한 시스템은 빠르게 이동한 후에 반드시 잔류진동을 수반하므로 이러한 진동을 제어하는 것은 필수적이다. 잔류진동 제어에는 여러 가지 방법이 있는데 크게 폐회로 기법과 개회로 기법이 있다. 본 논문에서는 시스템 앞에 필터를 두어 시스템의 고유주파수를 자극하지 않도록 그 주파수의 성분을 차단하는 개회로 기법을 사용한다. 이 기법은 시스템의 고유주파수와 감쇠비를 가지고 임펄스 열을 생성하여 초기 입력과 컴벌루션 하여 사용한다. FIR필터라고 할 수 있는 임펄스 열로 초기 입력을 진동이 발생하지 않는 입력으로 성형하는 기법이다. 이러한 기법을 입력성형기법이라 하는데 크레인[1], 3차원 측정장치[2], 우주 항공분야[3] 등 다양하게 응용되고 있다

입력 성형기법은 Smith[4]에 의해 Posicast 제어기법이란 이름으로 처음 소개되었다. Singer와 Seering은 처음으로 이 기법을 유연한 구조물을 가지는 로봇에 적용하였으며 또한 강인성을 개선하기 위해 더 많은 구속조건을 주어 발전시켰다[5]. 강인성을 증가시키기 위해서는 임펄스 열을 늘리는데 그에 따라 시간지연이 커지게 된다. 시간지연을 줄이면서 강인성을 증가시키는 방법[6]도 제시되어 많은 연구가 발표되기 시작했다[7][8]. 이 기법은 시스템의 고유주파수에서 조금의 진동을 허용하고 그 진동주기내의 주파수 저지 대역대를 넓히는 방법이다. 그러나 이와 같이 시간상에서 입력성형기를 설계하면 난해한 수학적 접근방법이 필요하다. 그래서 Tuttle은 z-영역에서 진동이 발생하는 극점에 영점을 두어 진동을 상쇄하는 방법[9]을 제시하였다. 이 방법은 임펄스가 모두

양이 되는 가장 작은 임펄스 간격 T를 구하는 방법이다. 본 논문에서는 z-영역에서 설계한 Tuttle의 방법을 재정의하여 일반식을 만들었으며 연속시간에서 설계한 필터식과 동일하다는 것을 보였다. 또한 민감도 선도를 z-영역에서 계산할 수 있다는 것을 증명하였다

II. 기존의 입력성형기법

일반적인 개루프 시스템은 그림 1과 같다. 여기에서 $R(s)$ 는 기준 계단입력이며, $H(s)$ 는 입력성형기이며, $G(s)$ 는 진동 시스템이며, $Y(s)$ 는 출력이다. 계단입력은 가속도의 크기가 크므로 많은 진동을 야기시킨다. 본 연구에서 제시한 입력성형기법은 입력이 시스템 주파수 성분을 자극하지 않도록 시스템의 고유주파수나 감쇠비와 같은 시스템의 진동 특성치를 고려하여 필터 $H(s)$ 를 설계하는 것이다. 이 원리를 간단히 설명하면 그림 2와 같다. 그림 2에서 보는 바와 같이 시스템에 임펄스 입력 A_0 가 가해지면 진동이 발생한다. 이 진동을 없애기 위해서 반 주기후 감쇠된 진폭 A_1 만큼의 임펄스를 추가해주면 그 응답으로 인하여 진동이 상쇄된다. 이 방법은 초기의 계단입력을 그림 1과 같이 2개의 임펄스 열에 의해 2단계의 계단입력으로 바꾸어주는 것과 같다. 이와 같이 입력성형

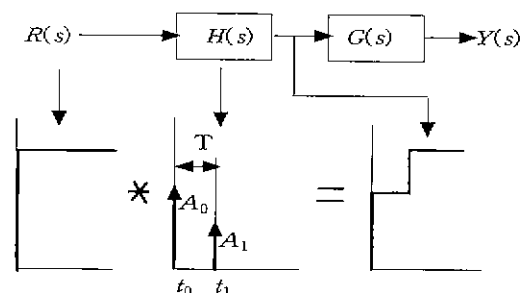


그림 1. 입력성형기를 가진 개회로 시스템.
Fig. 1. Open-loop system with input shaper.

접수일자 : 1999. 2. 1., 수정완료 : 1999. 8. 17

박운환 : 영남대학교 기계공학부 대학원생

이재원, 임병덕 : 영남대학교 기계공학부

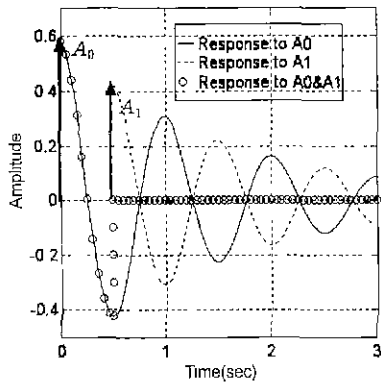


그림 2 두 개의 임펄스를 사용한 진동 상쇄.
Fig. 2. Vibration cancellation using two impulses.

필터를 설계하는 것은 임펄스 열의 크기와 시간 간격을 구하는 것이다. 예를 들어 2개의 임펄스열로 구성된 ZV (Zero Vibration)[5][8] 입력성형필터를 설계해보자 ZV 입력성형필터의 설계는 그림 1에서 보는 바와 같이 4개의 미지수 t_0, t_1, A_0, A_1 를 구하는 것이다.

(1)은 여러 개의 임펄스가 가해졌을 때 시스템에 나타나는 잔류진동의 크기를 구하는 식이다.

$$V(\omega, \zeta) = e^{-\zeta\omega t} \sqrt{V_1^2 + V_2^2} \quad (1)$$

여기서,

$$V_1 = \sum_{i=0}^n A_i e^{\zeta\omega t_i} \cos(\omega t_i \sqrt{1-\zeta^2})$$

$$V_2 = \sum_{i=0}^n A_i e^{\zeta\omega t_i} \sin(\omega t_i \sqrt{1-\zeta^2})$$

ω : 주파수, ζ : 감쇠비

n : 임펄스 개수 -1, A_i : i 번째 임펄스의 크기
 t_i : i 번째 임펄스가 가해지는 시간

잔류진동이란 여러 개의 임펄스가 가해질 때 마지막 임펄스를 가한 후에 나타나는 진동을 말한다. 시스템의 고유주파수 ω_n 에서 잔류진동의 크기(V)인 (1)이 0이 되어야 한다는 조건에서 $n=1$ 일 때 2개의 (2),(3)이 나온다.

$$V_1 = \sum_{i=0}^1 A_i e^{\zeta\omega t_i} \cos(\omega_n t_i \sqrt{1-\zeta^2}) = 0 \quad (2)$$

$$V_2 = \sum_{i=0}^1 A_i e^{\zeta\omega t_i} \sin(\omega_n t_i \sqrt{1-\zeta^2}) = 0 \quad (3)$$

초기 임펄스의 시간이라는 조건과 초기 입력을 변화시키지 않도록 하기 위하여

$$\sum_{i=0}^1 A_i = 1 \quad (5)$$

인 조건식을 합하여 식 4개의 해를 구해야 한다. 하지만,

$$t_0 = 0 \quad (4)$$

그림 3에서 보는바와 같이 ZV 입력성형필터의 민감도 선도는 설계된 시스템 고유주파수에서 잔류진동이 0이 되고 그 외에 주파수에서는 잔류진동이 급격히 증가한다. 이러한 경향을 줄이기 위해 주파수에 대한 (2)와 (3)

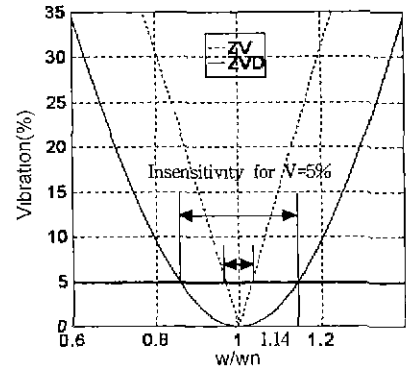


그림 3 민감도 선도 ZV, ZVD 입력성형기 ($\zeta=0$).
Fig. 3. Sensitivity curves for the ZV, ZVD input shaper ($\zeta=0$)

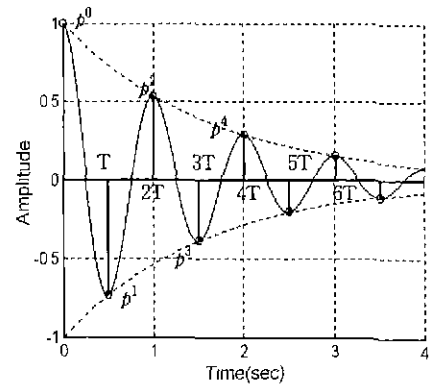


그림 4. 이산시간에서 진동시스템의 표현.
Fig. 4. Representation of vibration system in the discrete-time domain ($T_s = \frac{\pi}{\omega_d}$)

의 미분식을 0으로 하는 (6)과 (7)을 추가하여 ZVD (Zero Vibration Derivative)필터를 설계하면 그림 3과 같이 고유주파수 부근에서의 주파수 변동에 대한 잔류진동의 변동률이 줄어들게 되어 주파수변동에 대한 강인성이 증가하게 된다 이 경우에 임펄스는 3개가 되므로 n 은 2가 되며 미지수는 $t_0, t_1, t_2, A_0, A_1, A_2$ 이고 (2),(3), (4), (5)와 (6), (7)에서 해를 구할 수 있다.[5]

$$0 = \frac{d}{d\omega} V_1 \quad (6)$$

$$0 = \frac{d}{d\omega} V_2 \quad (7)$$

이렇게 연속시간상에서 입력성형필터를 설계하면 비선형 연립방정식을 풀어야 하므로 복잡하다 또한 여러 개의 임펄스 열로 구성된 입력성형필터들은 잔류진동의 크기를 계속해서 미분하여 조건식을 추가하므로 해를 구하기가 상당히 어렵다. 그러나 z-영역에서는 이보다 간편하게 입력성형필터를 설계할 수 있다

III. z-영역에서 입력성형기 설계

Tuttle의 방법은 2차 진동 시스템의 극점을 2개의 공액복소수의 영점으로 상쇄시키는 것으로서 일반식은 (8)과 같다.

$$H(z) = \frac{1}{K} \{ (1 - p_1 z^{-1})(1 - p_1^* z^{-1}) \}^n$$

$$= \frac{1}{K} \{ 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{2n} z^{-2n} \} \quad (8)$$

여기서,

$$p_1 = R e^{j\theta}, \quad p_1^* = e^{-j\theta}$$

$$R = e^{-\xi\omega T}, \quad \theta = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} T$$

$$K = 1 + a_1 + a_2 + \dots + a_{2n}$$

n 강인성 차수

이 때 a_1, a_2, \dots, a_{2n} 를 시간 T 에 대해 그래프를 그려서 모두 양이 되는 시간 T 를 구해낸다. 이때 a_1, a_2, \dots, a_{2n} 는 T 에 대한 함수이므로 모두 구할 수 있다. Tuttle이 사용한 일반식으로 구해보면 T 는 항상 진동주기의 1/4 주기이며 a_{2n-1} 은 0이 나온다. 따라서 a_1, a_2, \dots, a_{2n} 을 그래프로 그려서 T 를 구할 이유는 없다. 그리고 $a_{2m-1} (m=1, 2, \dots, n)$ 이 0이기 때문에 실제 임펄스 간의 간격은 진동주기의 반주기이다. 따라서 본 논문에서 제시하는 방법은 입력성형기법의 원리에서 설명했듯이 시간 T 를 진동주기의 반주기로 정하여 임펄스 열의 크기를 구해내는 방법이다. 표본화 시간 T 를 진동주기의 반주기로 하여 시스템의 진동을 이산 시간에서 나타내면 그림 4와 같으며 이것은 (9)와 같이 표현된다.

$$g[n] = p^n \quad (9)$$

여기서, $p = e^{(-\xi\omega + j\omega_n)T} = -e^{\frac{-\xi\omega T}{\sqrt{1-\xi^2}}}$

$$G(z) = \sum_{n=0}^{\infty} g[n]z^{-n} = \frac{1}{1 - pz^{-1}} \quad (10)$$

(9)를 z -변환 하면 진동 시스템은 (10)과 같이 한개의 극점을 가지는 전달함수로 표현된다. 이것을 z -영역에서 표시하면 그림 5와 같이 된다. 이 때 입력성형필터식은 시스템의 진동 극점과 같은 위치에 영점을 두는 식이다. 이는 입력성형필터의 영점으로 시스템의 극점을 상쇄시키는 것으로써 입력성형필터 $H(z)$ 는 (11)과 같다. 이 때 K 로 나누어주는 것은 입력성형필터에 들어가는 계단 입력의 크기를 변화시키지 않기 위한 것이다.

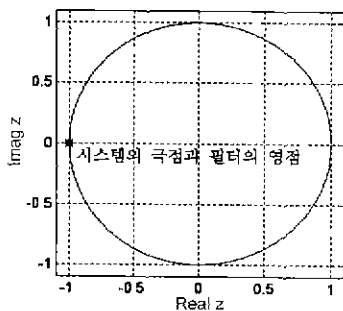


그림 5. z -영역에서 시스템의 극점과 입력성형기의 영점.
Fig. 5. Pole of system and zero of input shaper in the z -domain.

— A_0 에 의한 진동 - - - A_1 에 의한 진동

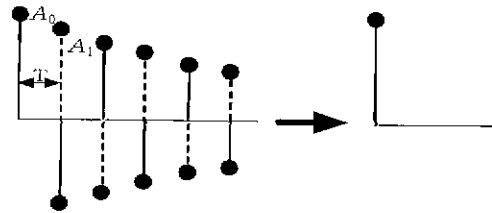


그림 6. 이산시간에서 진동의 상쇄.
Fig. 6. Cancellation of vibration in the discrete-time domain.

$$H(z) = \frac{1}{K} (1 - pz^{-1}) = A_0 + A_1 z^{-1} \quad (11)$$

여기서, $K = 1 - p, A_0 = \frac{1}{1 - p}, A_1 = \frac{-p}{1 - p}$

이산시간에서 입력성형기법의 원리를 설명하면 그림 6과 같이 시간지연을 둔 두 번째 임펄스 A_1 의 진동에 의해 임펄스 A_0 에 의한 진동이 상쇄되므로 마지막 목표치에 도달할 때는 진동이 서로 상쇄되어 잔류진동이 나타나지 않는다. (11)의 입력성형필터는 연속시간에서 설계한 ZV 필터식과 동일하다. 연속시간에서 잔류진동의 크기 미분식을 추가하여 강인성을 높이는 ZVD 필터 설계 방법은 이산시간에서 보면 $(1 - pz^{-1})$ 의 영점을 하나 더 추가하는 것과 같다. 연속시간상에서 강인성을 높이기 위해 계속해서 잔류진동의 크기 미분식을 추가하여 임펄스를 늘리는 것은 z -영역에서 영점을 추가하는 것과 같으므로 ZVD^n 입력성형필터의 일반식은 (12)와 같다 따라서 z -영역에서 설계는 비선형 연립방정식을 풀어야 하는 연속시간상 설계방법보다 쉽다는 것을 알 수 있다. 여기에서 사용하는 표본화 시간 T 는 임펄스 간격이며 디지털 서보 제어기에서 사용하는 표본화 시간과 다르다는 것을 명시한다.

$$H(z) = \frac{1}{K} (1 - pz^{-1})^n \quad (12)$$

여기서,

$K \cdot z^{-k} (k=0, 1, \dots, n)$ 의 계수들을 모두 더한 크기
 n : 임펄스의 개수-1(강인성 차수)

시스템의 실제 고유 주파수가 측정된 고유 주파수와 같을 때는 (10)처럼 표시할 수 있으나 다를 때는 (10)으로 표현되지 않고 두 개의 공액 복소수의 극점으로 표현된다. 그렇게 되면 진동이 상쇄되지 않고 잔류 진동이 발생하게 된다. 그 때 나타나는 진동의 크기는 민감도 선도에서 설명하기로 한다.

IV. 민감도 선도

민감도 선도란 시스템 주파수 변화에 따라 잔류진동의 크기가 얼마나 변하는가를 나타내는 선도이다. 이를 달리 표현하면 (13)과 같이 입력성형필터를 사용하지 않았을 때 나타나는 잔류진동 크기(A_n)와 필터를 사용한

였을 때 나타나는 잔류진동 크기(A_f)의 비이다.

$$V_f(\%) = \frac{A_f}{A_n} \times 100 = V \times 100 \quad (13)$$

연속시간상에서 민감도($V_f(\%)$) 계산을 할 때 A_n 은 1이 되므로 A_f 를 (1)을 이용하여 구한다. z -영역에서 민감도($V_z(\%)$) 계산은 (14)와 같이 필터식으로부터

$$\begin{aligned} V_z(\%) &= \frac{A_f}{A_n} \times 100 = \frac{|H(z)z^n||G(z)|}{|G(z)|} \times 100 \\ &= |H(z)z^n| \times 100 \end{aligned} \quad (14)$$

여기서,

n : 영점의 차수 (= 임펄스의 개수 - 1)

구할 수 있다. 필터를 사용하지 않았을 때 임펄스의 잔류진동은 시간 0에서 나타난다. 그러나 필터를 사용하였을 때 잔류진동은 마지막 임펄스가 가해지고 난 다음 나타난다. 따라서 그 시간대의 잔류진동을 시간 0으로 옮겨서 같은 시간대에서 잔류진동의 크기를 비교해야 한다. z^{-n} 은 이산시간에서 nT 만큼 지연한다는 의미이므로 지연된 시간을 0으로 옮기기 위해서는 필터의 영점 차수만큼 z^n 을 필터의 식에 곱하여 크기를 구해야 한다.

이 때 (15)의 관계식을 이용하여 시스템의 고유주파수 ω 를 변화시키면서 그 주파수에 대한 $|H(z)z^n|$ 을 계산하면 된다.

$$z = e^{sT} \quad (15)$$

여기서, $s = -\zeta\omega + j\omega\sqrt{1-\zeta^2}$

감쇠비가 0인 경우에 $|H(z)z^n|$ 은 $e^{j\omega T}$ 의 선상(단위 원)에서 영점까지 거리를 구해 전체크기인 K 로 나누어 구한다. 따라서 그림 3과 같이 고유주파수에 대해 서로 대칭이 된다. 감쇠비가 0이 아닌 경우에는 그림 7에서 보듯이 $e^{-\zeta\omega T + j\omega\sqrt{1-\zeta^2}T}$ 의 선상(나선형)에서 영점까지 거리를 구해 K 로 나눈다. 그러므로 그림 8과 같이 시스템

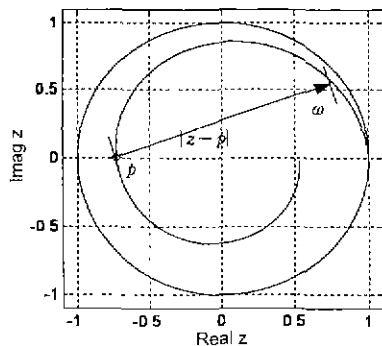


그림 7. z -영역에서 ZV 입력성형기의 $|(1-pz^{-1})z|$ 계산($T_s = \frac{\pi}{\omega_d}$).

Fig. 7. Calculation of $|(1-pz^{-1})z|$ for ZV input shaper in the z -domain ($T_s = \frac{\pi}{\omega_d}$).

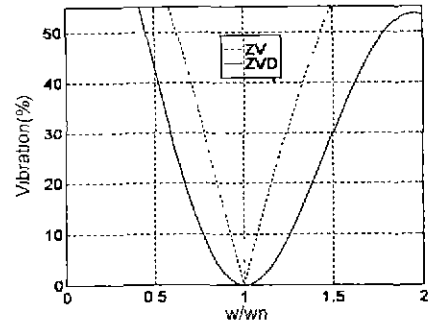


그림 8. ZV, ZVD 입력성형기의 민감도 선도 ($\zeta = 0.1$).
Fig. 8. Sensitivity curves for the ZV, ZVD input shaper ($\zeta = 0.1$).

의 고유주파수에 대해서 대칭이 되지 않는다. 입력성형기법에서 민감도 선도를 계산하기 위해 사용하는 필터의 크기는 시스템의 고유주파수 뿐만 아니라 감쇠비까지 모두 고려해야만 잔류진동의 크기를 알 수 있으므로 (15)의 관계식을 이용한다.

신호처리에서 사용되는 필터의 크기는 (16)의 관계식을 이용한다.

$$z = e^{sT} \quad (16)$$

여기서, $s = j\omega$

신호처리에서 FIR필터의 크기는 단위원에서 영점까지 거리가 되며 또한 표준적인 대역저지 필터 설계는 주파수만 고려하므로 필터의 영점은 단위원상에 존재한다. 따라서 이러한 필터들은 감쇠비가 있는 시스템에서는 제 어기로서 사용할 수 없다. 그림 3과 그림 8은 고유 주파수가 4Hz이고 감쇠비가 0인 경우와 0.1인 경우에 대해 ZV, ZVD 입력성형필터를 설계하여 (14)와 같이 민감도를 계산한 것이다. 이 결과들은 연속시간에서 계산한 결과와 일치한다. z -영역에서 민감도 선도를 계산하는 (1)이 서로 같다는 것을 수학적으로 증명하면 다음과 같다. $|H(z)z^n|$ 을 (15)의 관계식을 이용하여 표현하면 (17)과 같다.

$$\begin{aligned} &|A_0 e^{-\zeta\omega nT} e^{j\omega\sqrt{1-\zeta^2}nT} + A_1 e^{-\zeta\omega(n-1)T} e^{j\omega\sqrt{1-\zeta^2}(n-1)T} \\ &+ \dots + A_n| \end{aligned} \quad (17)$$

여기에서 nT 는 (1)에서 t_n 과 같다. 따라서 (17)은 (18)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} &|A_0 e^{-\zeta\omega t_n} e^{j\omega t_n} + A_1 e^{-\zeta\omega t_{n-1}} e^{j\omega t_{n-1}} + \dots \\ &+ A_n e^{-\zeta\omega t_0} e^{j\omega t_0}| \end{aligned} \quad (18)$$

또 (1)은 (19)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} &|A_0 e^{-\zeta\omega t_n} e^{j\omega t_0} + A_1 e^{-\zeta\omega t_{n-1}} e^{j\omega t_1} + \dots + \\ &A_n e^{-\zeta\omega t_0} e^{j\omega t_n}| \end{aligned} \quad (19)$$

(18)과 (19)는 서로 같으므로 연속시간상에서 민감도를 계산하는 것과 z -영역에서 민감도를 계산하는 것은 서로 같다는 것을 알 수 있다.

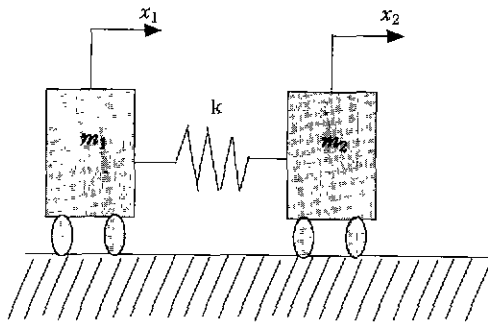


그림 9. 2개의 질량과 스프링 시스템.
Fig. 9. Two masses and spring system.

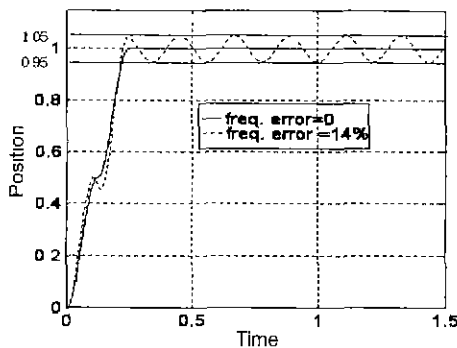


그림 10. 14% 주파수 오차에 대한 ZVD 입력성형기의 시간 응답(V=5%).
Fig. 10. Time response with ZVD shaper for frequency error 14%(V=5%).

V. 시뮬레이션

ZVD 입력성형기의 성능과 민감도 선도가 일치하는지를 확인하기 위하여 Fig. 9와 같이 2개의 질량을 1개의 스프링에 연결하여 한물체(m_1)를 위치 이동 시켜보았다 이 때 질량은 1kg, 스프링 상수(k)는 632N/m이고 감쇠비는 0이다 실제 시스템의 고유주파수와 필터의 차단 주파수가 정확하게 일치하였을 때 그림 10에서 보듯이 x_2 의 잔류 진동이 없다 실제 시스템의 고유주파수가 14% 오차(k=827N/m)가 있도록 하면 그림 3의 민감도 선도에서 보듯이 주파수 오차가 14%일 때 5%의 진동이 나타나는데 시뮬레이션을 해 본 결과 그림 10과 같이 x_2 의 잔류진동이 5%이다. 이와 같이 민감도 선도를 보면 주파수 변화에 따른 잔류 진동의 크기를 알 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서 연속시간상에서 1설계한 ZVDⁿ(n:임펄스 개수-2) 입력성형필터와 z-영역에서 설계한 필터는 서로

같다는 것을 보였다. 연속시간상에서 설계하면 상당히 복잡한 비선형 연립방정식을 풀어야 하지만 z-영역에서는 쉽게 필터를 설계 할 수 있다. 또한 민감도 선도도 z-영역에서도 계산할 수 있다는 것을 증명하였다. z-영역에서 민감도는 영점까지의 거리이므로 영점의 위치에 따라 민감도 선도를 예측할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 다른 형태의 민감도 선도를 가지는 입력성형기도 쉽게 설계가 가능하다.

ZVDⁿ 입력성형기는 강인성이 증가할수록 민감도 선도에서 저지 대역폭이 넓어지지만 응답이 느려지는 단점이 있다. 따라서 향후에는 응답이 느리지 않으면서 폭이 넓은 민감도 선도를 가지는 입력성형기[6]를 z-영역상에서 설계하고자 한다.

참고문헌

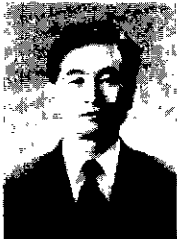
- [1] W. E. Singhose, L. J. Porter, W. P. Seering, "Input shaped control of a planar gantry crane with hoisting", *American Control Conference*, New Mexico June, 1997.
- [2] W. E. Singhose, W. P. Seering, N. C. Singer, "Improving repeatability of coordinate measuring machines with shaped command signals", *Precision Engineering*, vol 18, pp. 138-146, 1996
- [3] A. K. Banerjee, "Minimum time fuel efficient maneuver of vibration amplitude constraints", *AAS*, 1995.
- [4] Tallman, Smith, "Analog study of dead-beat posicast control". *IRE Trans. Automatic Control*, vol. AC-3, pp. 14-23. 1958.
- [5] N. C. Singer, W. P. Seering. "Preshaping command inputs to reduce system vibration", *ASME Journal of Dynamic System, Measurement and Control*, vol. 112, pp. 76-82 1990.
- [6] W. E. Singhose, N. C. Singer, "Extra-insensitivity input shapers for controlling flexible space craft". *Guidance, Control, and Dynamics*, vol 19, no 2, March-April, 1996.
- [7] L. J Porter, W. E. Singhose, T. D Tuttle, N. C. Singer. "Vibration reduction using multi-hump input shapers", *ASME*, vol. 119, June, pp. 320-326, 1997.
- [8] W. E Singhose, W. P Seering, N. C. Singer, "Time-optimal negative input shapers", *ASME*, vol. 119, pp. 198-205, 1997
- [9] T. D. Tuttle, W. P Seering, "A zero-placement technique for designing shaped inputs to suppress multiple-mode vibration", *American Control Conference*, pp. 2533-2537, 1994.



박 운 환

1968년 7월 10일생. 1996년 영남대학교 기계공학과[학사], 1998년 영남대학교 기계공학과[석사], 1998년-현재영남대학교 기계공학과[박사과정], 1999년-현재 대구공업대학 자동차과 겸임교수. 관심분야는 입력성형기 설계와 유연구조물의 진동해석 및 제어.

조물의 진동해석 및 제어.



임 병 톡

1977년 서울대학교 기계공학과[학사], 1979년 한국과학기술원 기계공학과[석사], 1987년 한국과학기술원 기계공학과[박사], 1985년-1993년 한국표준과학연구원 책임 연구원, 1990년-1992년 영국 Southampton 대학교, Institute

of Sound and Vibration Research 객원 연구원, 1993년-현재 영남대학교 기계공학과 부교수. 관심분야는 소음, 진동 및 신호처리.



이 재 원

1956년 4월 14일생. 1979년 서울대학교 기계공학과[학사], 1981년 한국과학기술원 기계공학과[석사], 1990년 미국 Georgia Institute of Technology 기계공학과[박사], 1982-1984년 대우중공업 기술연구소 용접로봇 개발실, 대리,

1989-1991년 미국 NASA, Marshall Space Flight Center, 연구원, 1991-현재 영남대학교 기계공학과 부교수. 관심분야는 유연구조물의 진동해석 및 제어. 비전센서와 로봇을 이용한 3D가공.