

입력성형기법에 의한 2축 천정크레인의 잔류진동 감소

박운환*, 이재원**, 노상현***

Reduction of Residual Vibration for 2 Axes Overhead Crane by Input Shaping

Un Hwan Park*, Jae Won Lee**, Sang-Hyun Noh***

ABSTRACT

Input shaping is a method for reducing residual vibration. Vibration is eliminated by convolving an input shaper, which is a sequence of impulses, with the desired system command. It has been applied to robot with a flexible manipulator. But it can be applied to the reduction of residual vibration for overhead crane. In this paper, input shaping shows good performance for anti-sway of overhead crane. In the z-domain, we designed an input shaper and calculated the sensitivity of it. If sensitivity is calculated in the z-domain, the shapes of sensitivity curves are expected easily. Accordingly, it is easy to design an input shaper in the z-domain.

We compared the response of a system with shaper to it without that. Also, we compared EI shaper to ZV shaper in view of robustness.

Key Words : Input shaping(입력성형기법), Residual Vibration(잔류 진동), 2 Axes Overhead Crane(2축 천정크레인), EI(Extra-Insensitive) Shaper(EI 입력성형기), z-domain(z-영역)

1. 서론

자동화 물류창고에서 또는 선착장에서 물건을 이송하기 위하여 천정크레인을 많이 사용한다. 천정크레인으로 물건을 이송하기 위해서는 이송할 때 흔들림이 적어야 되고 물건이 목표지점에 도착했을 때는 흔들림이 없어야 한다. 이러한 흔들림을 제어하는 데는 개회로 기법과 폐회로 기법으로 나눌 수 있다. 폐회로 기법은 흔들림을 측정하는 센서가 필요하고 현장에서 사용할 때 고장이 나면 작업이 중단되는 단점이 있는 반면에 개회로 기법은 센서가 필요없어 비용을 절감할 수 있고 현장에서 쉽게 사

용할 수 있다는 장점이 있다. 개회로 기법의 대부분은 Bang-Bang 기법이다. 본 논문에서는 Bang-Bang 기법의 한 방법인 입력성형기법을 사용하여 흔들림을 제어하였다. 입력성형기법이란 기준 입력을 진동이 발생하지 않는 입력으로 성형하는 방법이다. 임펄스 열로 구성된 입력성형기와 기준 입력을 컨볼루션하면 진동이 발생하지 않는 입력으로 성형이 되며 입력성형기는 시스템의 고유주파수와 감쇠비의 정보만으로 설계할 수 있다. 이 기법은 유연한 빔을 가진 로봇 끝점제어에 많이 사용되는 방법이지만, 본 논문에서는 입력성형기법을 이송물 진동이 발생하는 천정크레인에 적용하였다.

* 영남대학교 기계공학부 대학원
** 영남대학교 기계공학부
*** 대구공업대학 자동차과

Singer⁽¹⁾는 이 방법을 로봇에 처음 적용하였으며 구속조건을 증가시켜 입력성형기법을 더 발전시켰다. 그러나 입력성형기법은 개회로 기법이므로 시스템의 파라미터 변화에 대해 강인성이 작은 것이 단점이다. 그래서 강인성에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 강인성을 증가시키기 위해서는 임펄스열을 늘리는데 그 크기와 시간간격은 미분조건식을 추가하여 구하였다. 하지만 임펄스열을 늘리게 되면 시간지연이 늘어나게 되어 응답시간이 늦어진다. Singer와 Singhose⁽²⁾에 의해 시간지연을 줄이면서 강인성을 증가시키는 방법으로 고유주파수 부근에서 어느 정도 진동을 허용하는 구속조건을 주어 민감도 선도가 요철을 가지는 EI(Extra-Insensitive) 입력성형기가 제시되었다. EI 입력성형기를 설계하는 방법이 제안된 후로 많은 연구논문들이 발표되었으며 현재 입력성형기를 설계하는데 있어서 최적화 기법⁽³⁾까지 연구되고 있다. 또한 다중 모드의 진동제어에 관한 입력성형기법도 많이 나와있다. Hyde와 Seering⁽⁴⁾은 다중모드의 진동제어에 관한 입력성형기법을 제시하였으며 Magee와 Book⁽⁵⁾은 파라미터 변화에 적응하는 수정 입력성형기 설계기법도 제시하였다. 박운환^(6,7)은 z-영역에서 감쇠, 비감쇠 시스템에 대한 EI 입력성형기 설계방법을 제시하였다.

천정크레인의 이송물 흔들림 제어에 관한 논문은 많이 발표되었다. 이동철⁽⁸⁾은 임의로 가해진 외란에 대해 단시간 진자의 진동을 억제하며 목표치 변경에 대해서도 오차없이 목표치에 추종하는 디지털제어법을 제안하였다. 윤지섭⁽⁹⁾은 속도경로 폐회로 방식과 퍼지제어기를 사용하여 이송물 흔들림을 제어하였다. 이와 같이 트롤리만 움직이는 1축 천정크레인의 이송물 흔들림제어에 관한 논문은 이미 많이 발표되었다. 그러나 산업현장에서 트롤리만 움직이는 1축 천정크레인은 제한적으로 사용된다. 최근에는 거더와 트롤리를 같이 움직이는 2축 천정크레인에 대한 운동 방정식을 유도하고 여기에 대한 제어기를 설계하여 좋은 성능을 가지는 제어기를 제시하는 연구 논문들이 많이 발표되고 있다^(7,8).

본 논문에서는 현장에서 많이 사용하는 사다리꼴 속도 입력을 주는 방법과 입력성형기를 사용하여 성형된 입력을 주는 방법에 대해서 비교하며 또한 파라미터 변화에 대해 ZV(Zero Vibration) 입력성형기⁽⁶⁾를 적용했을 때와 EI 입력성형기⁽⁶⁾를 적

용하였을 때를 비교하고자 한다.

2. 입력성형기 설계

입력성형기는 시간 지연이 있는 여러개의 임펄스로 구성된 FIR(Finite-duration Impulse Response) 필터이다. 따라서 입력성형기의 설계는 임펄스의 간격과 크기를 구해내는 것이다. 본 논문에서 입력성형기를 설계하는 방법은 z-영역에서 입력성형기를 설계하는 방법을 사용한다. 이 방법은 진동이 발생하는 시스템의 극점을 입력성형필터의 영점으로 상쇄시키는 개념을 적용한 것이다. z 영역에서 표현할 때 표본화 시간은 진동주기의 반주기로 한다. 표본화 시간 T는 임펄스 간격과 같으며 디지털 제어에 나오는 표본화 시간 T_s 와는 다른 개념이다. 임펄스의 간격을 진동주기의 반주기보다 작게 하면 빠른 시간에 진동을 상쇄시킬 수 있지만 파라미터 변화에 강인성이 작아진다. 뿐만 아니라 임펄스들 중에 음의 크기를 가지는 임펄스가 존재하므로 물건을 이송할 때 생기는 과도기적인 진동이 크게 나타난다. 천정크레인으로 이송물을 목적지까지 운반할 때 이러한 과도기적인 진동이 크면 매우 위험할 수 있다.

z-영역에서 시스템의 극점을 상쇄시키는 입력성형필터의 일반식은 식(1)과 같다.

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

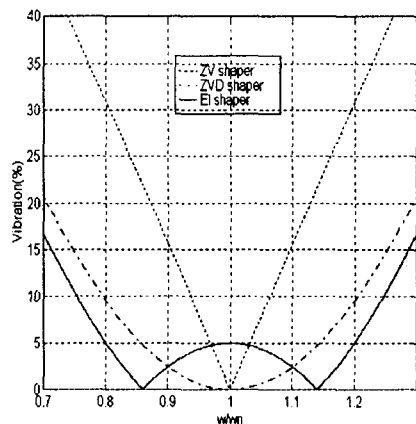


Fig. 1 Sensitivity curve of a shaping filter

$$\text{여기에서, } p = e^{(-\zeta\omega + j\omega_d)T} = -e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}}$$

$$T = \frac{\pi}{\omega_d} \text{ (진동주기의 반주기)}$$

$$K = (1-p)^n, \text{ n=임펄스 개수-1}$$

n은 강인성을 증가시키는 차수가 되며, K로 나누어 주는 것은 필터에 의해 성형된 입력의 크기를 기준입력의 크기와 같게 해주기 위해서이다. 이와 같은 ZVD^{n-1} (Zero Vibration Derivative) 입력성형 필터는 임펄스 열이 늘어나면 Fig. 1과 같이 저지 대역대가 넓어져서 시스템의 파라미터 변화에 강인한 특성을 가지지만 시간지연이 커지는 단점이 있다. 그래서 시간지연이 크지 않으면서 강인성을 증가시킨 EI 입력성형필터가 제시되었다. Singer와 Singhose의 EI 입력성형필터 설계 방법은 연속시간 상에서 비선형 연립방정식을 풀어 임펄스의 크기와 시간간격을 구하므로 해를 구하기가 매우 복잡하다. 그러나 z-영역에서 설계하면 비선형 연립방정식을 풀지 않고도 EI 입력성형기를 설계할 수 있다. z-영역에서 EI 입력성형기의 설계방법은 영점을 시스템의 고유주파수에 위치시키는 것이 아니라 부근에 위치시켜 고유주파수에서 잔류진동을 어느정도 (5%) 허용하면서 그 허용범위 내에서 주파수 저지 대역대를 넓게 한 것이다. z-영역에서 1개의 hump를 가지는 EI 입력성형필터 $H(z)$ 는 식(2)와 같다.

$$H(z) = \frac{1}{K} \{ (1 - p_{lo}z^{-1})(1 - p_{hi}z^{-1}) \} \quad (2)$$

여기에서,

$$K = 1 - (p_{lo} + p_{hi}) + p_{lo}p_{hi}$$

$$p_{lo} = R_{lo} e^{j\theta}, \quad p_{hi} = R_{hi} e^{j\theta}$$

$$R_{lo} = e^{-\zeta\omega_n T}, \quad \theta = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2} T$$

$$R_{hi} = e^{-\zeta\omega_n T}, \quad \theta = \omega_{hi} \sqrt{1-\zeta^2} T$$

5%에 대한 EI 입력성형필터 $H(z)$ 의 영점 위치는 다음과 같다.

$$\omega_{lo}, \omega_{hi} = \omega_n \mp \Delta\omega \quad (3)$$

여기에서, $\Delta\omega/\omega_n = 0.14$

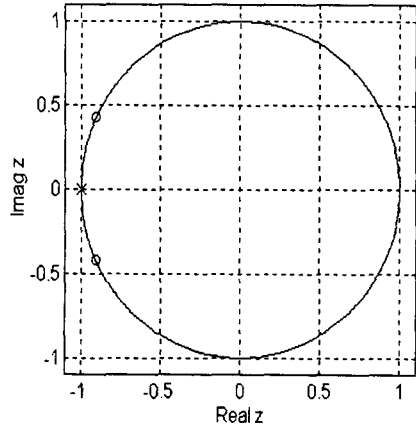


Fig. 2 Location of zeros of EI shaper and a pole of the system

Fig. 2는 z-영역에서 시스템의 극점과 EI 입력성형필터의 영점 위치를 나타낸 것이다. 극점이 음의 실수 선상에 위치하는 것은 표본화 시간을 진동주기의 반주기로 하여 표현하였기 때문이다. Hump 1개를 가지며 시스템의 극점 주파수에서 5%의 잔류진동이 나타나는 EI 입력성형필터의 영점은 Fig. 2와 같이 두 개이며 민감도 선도는 Fig. 1과 같다.

민감도 선도란 시스템 주파수 변화에 따라 잔류진동의 크기가 얼마나 변하는가를 나타내는 선도이다. 이를 달리 표현하면 식(4)와 같이 입력성형필터를 사용하지 않았을 때 나타나는 잔류진동 크기 (A_n)와 필터를 사용하였을 때 나타나는 잔류진동 크기 (A_f)의 비이다. z-영역에서 민감도를 나타내는 식은 식(4)와 같다⁽⁷⁾.

$$V_z(\%) = \frac{A_f}{A_n} \times 100 = \frac{|H(z)z^n||G(z)|}{|G(z)|} \times 100 \quad (4)$$

잔류진동은 주파수에서 두 영점까지 거리를 곱하여서 전체 크기 K로 나누면 구할 수 있는데 각 주파수에 대해 구한 잔류진동을 그래프로 나타내면 Fig. 1과 같은 민감도 선도가 된다. 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 같

은 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 구해야한다. ZVD^{n-1} 입력성형필터의 영점은 시스템의 극점 주파수와 같은 위치에 있기 때문에 극점과 영점의 거리는 0이다. 따라서 Fig. 1과 같이 ZVD^{n-1} 입력성형필터는 시스템의 극점 주파수에서 잔류진동이 0이다. 그러나 EI 입력성형필터는 Fig. 2와 같이 영점들이 시스템의 극점 주파수와 같은 위치가 아니므로 시스템 극점 주파수에서 진동이 존재한다. 시스템의 극점 주파수에서 허용할 수 있는 잔류진동(여기에서 5%)을 주어 그에 맞도록 영점을 위치시키면 ZVD^{n-1} 입력성형필터보다 저지 대역대가 더 넓어진다. 이와 같이 입력성형기를 z -영역에서 설계하면 영점의 위치에 따라 민감도 선도를 예측할 수 있어 여러형태의 입력성형기를 쉽게 설계할 수 있다.

3. 시뮬레이션

Fig. 3은 2축 크레인 시스템을 나타낸다. Fig. 3에 나타난 것과 같이 독립변수는 대차의 변위 x, y 와 로프의 각도 θ_x, θ_y 이며 운동 방정식은 식 (5),(6),(7),(8)와 같다.

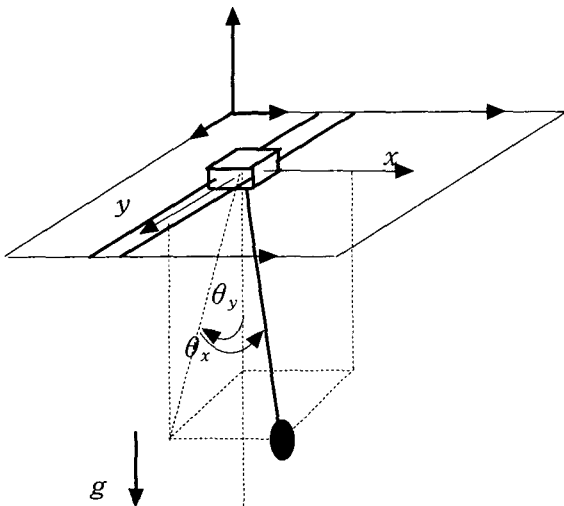


Fig. 3 2 axes crane system

$$(M_x + m)\ddot{x} - ml \sin \theta_x \cos \theta_y \ddot{\theta}_y - ml \sin \theta_x \sin \theta_y \ddot{\theta}_y - 2ml \cos \theta_x \sin \theta_y \dot{\theta}_x \dot{\theta}_y - ml \sin \theta_x \cos \theta_y \dot{\theta}_x^2 + ml \cos \theta_x \cos \theta_y \dot{\theta}_x^2 = f_x \quad (5)$$

$$(M_y + m)\ddot{y} - ml \sin \theta_y \ddot{\theta}_x^2 + ml \cos \theta_y \ddot{\theta}_y = f_y \quad (6)$$

$$\cos \theta_x \ddot{x} + l \cos \theta_y \dot{\theta}_x - 2l \sin \theta_y \dot{\theta}_x \dot{\theta}_y + g \sin \theta_x = 0 \quad (7)$$

$$l \ddot{\theta}_y - \sin \theta_x \sin \theta_y \ddot{x} + \cos \theta_y \ddot{y} + l \cos \theta_y \sin \theta_y \dot{\theta}_x^2 + g \cos \theta_x \sin \theta_y = 0 \quad (8)$$

$\theta_x, \theta_y, \dot{\theta}_x, \dot{\theta}_y \approx 0$ 이라는 가정을 하여 이 식들을 선형화 하면 식(9),(10),(11),(12)와 같이 된다.

$$(M_x + m)\ddot{x} + ml \ddot{\theta}_x = f_x \quad (9)$$

$$l \ddot{\theta}_x + \ddot{x} + g \theta_x = 0 \quad (10)$$

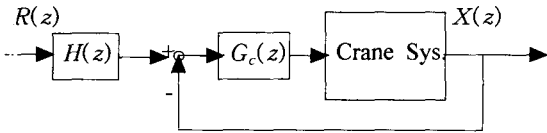
$$(M_y + m)\ddot{y} + ml \ddot{\theta}_y = f_y \quad (11)$$

$$l \ddot{\theta}_y + \ddot{y} + g \theta_y = 0 \quad (12)$$

Table 1 The properties of crane system

대차 질량 (거더: M_x , 트롤리: M_y)	10000kg, 2000kg
이송물의 질량 (m)	7000kg
로프의 길이 (l)	2.5m
로프의 진동수 (ω_n)	0.3153Hz
모터의 최대 속도 (v_{max})	0.525m/s
모터의 최대 가속도 (a_{max})	0.105/m ²

이 식들에서, x, y 방향이 서로 독립적으로 나타난다. 따라서 로프의 x, y 축 방향의 진동을 없애기 위해 x, y 축 방향에 독립적으로 입력성형기를 적용하기로 한다. 비선형 미분방정식들은 Runge-Kutta 방법으로 해를 구하여 시뮬레이션 하였다. Fig. 4는 2축 천정크레인의 이송물 진동을 제어하는 블록선도이다. 거더와 트롤리의 위치제어는 PD 제어를 사용하였으며 이송물의 진동 제어는 입력성형필터 $H(z)$ 를 사용하였다. 천정크레인 시



여기에서,

$R(z)$: 기준입력, $X(z)$: 대차의 위치,
 $H(z)$: 입력성형필터, $G_c(z)$: 대차 제어기

Fig. 4 Block diagram

시스템은 Table. 1에 잘 나타나 있으며 이송물의 목표 지점은 X 방향 8m, Y 방향 4m로 하고 이송 경로 계획은 Fig. 5와 같은 사다리꼴 속도 패턴으로 하였다. Fig. 6과 Fig. 7은 사다리꼴 속도를 가속도 형태로 변화시켜 ZV 입력성형필터와 EI 입력성형필터로 성형시킨 입력이다.

Fig. 6과 Fig. 7에서 보듯이 계단 입력의 간격은 진동 주기의 반주기(1.58s)이다. Fig. 8과 Fig. 9는 경로계획을 사다리꼴 속도로 하였을 때와 ZV 입력성형기를 사용하였을 때 나타나는 이송물의 흔들림이다. 입력성형기법을 사용하였을 때 과도기적인 진동이 많이 줄었으며 목표지점에 도착했을 때 잔류진동은 크게 감소되었다. Fig. 10과 Fig. 11은 ZV 입력성형기와 EI 입력성형기를 사용하였을 때 나타나는 이송물 흔들림이다. EI 입력성형기는 고유주파수에서 어느정도 진동을 허용한다. 따라서 ZV 입력성형기를 사용하였을 때 보다 이송물의 진동이 크게 나타난다. 이송물 진동의 고유주파수는 로프 길이에 대한 함수이므로 시스템의 특성 변화에 대한 이송물 흔들림을 알아보기 위해 로프 길이를 변화시켜 보았다. Fig. 12와 Fig. 13은 로프 길이를 1.9m로 하였을 때 변화에 대해서 ZV 입력성형기와 EI 입력성형기를 비교한 것이다. Fig. 12와 Fig. 13을 보면 잔류진동 측면에서 EI 입력성형기가 시스템의 특성 변화에 더 강인하다는 것을 알 수 있다. 이와 같이 물건을 이송할 때 장애물을 피하기 위하여 로프의 길이를 변화시키는 경우에 대해 EI 입력성형기를 사용한다면 잔류진동을 많이 유발하지 않으면서 물건을 목표지점까지 이송할 수 있다.

Fig. 14와 Fig. 15는 이송물 질량 변화에 대해 EI 입력성형기를 사용한 경우이다. 이송물의 질량변화에 대한 잔류진동은 큰 변화가 없다. 입력성형기법

을 적용하였을 때 발생하는 잔류진동은 주파수의 함수이기 때문이다.

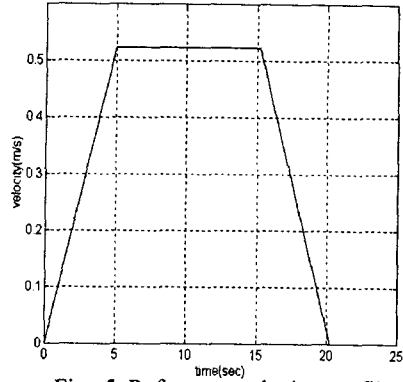
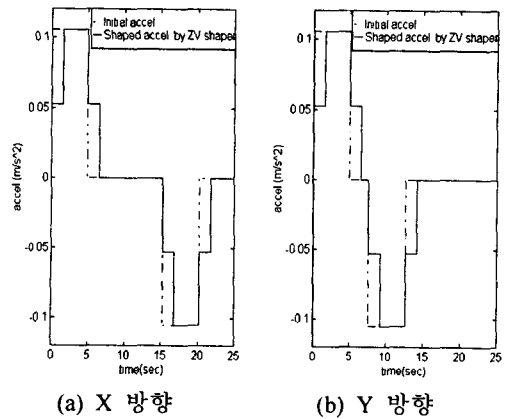
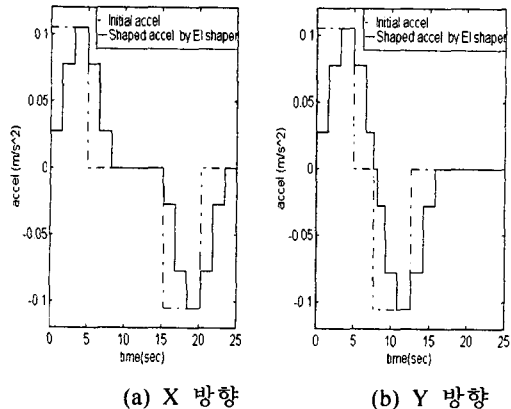


Fig. 5 Reference velocity profile



(a) X 방향 (b) Y 방향
 Fig. 6 Initial accel. and shaped accel. by ZV shaper



(a) X 방향 (b) Y 방향
 Fig. 7 Initial accel. and shaped accel. by EI shaper

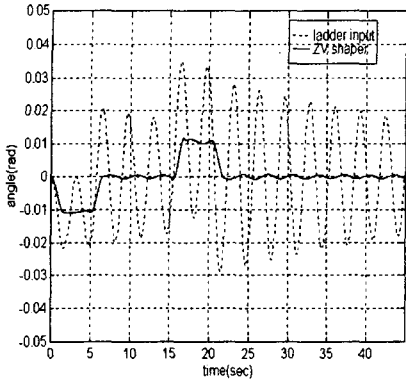


Fig. 8 Swing angle θ_x of the rope for crane without shaper and with ZV shaper ($l=2.5m$)

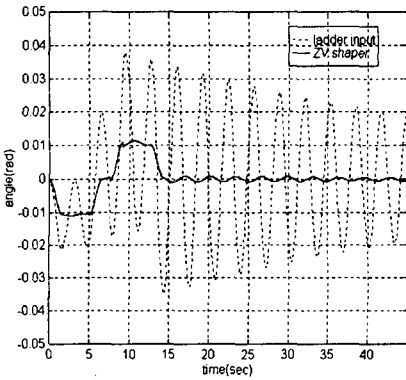


Fig. 9 Swing angle θ_y of the rope for crane without shaper and with ZV shaper ($l=2.5m$)

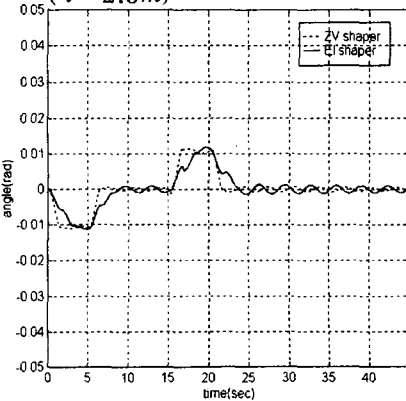


Fig. 10 Swing angle θ_x of the rope for crane with ZV and EI shaper ($l=2.5m$)

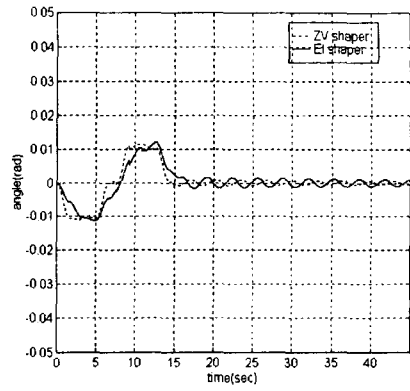


Fig. 11 Swing angle θ_y of the rope for crane with ZV and EI shaper ($l=2.5m$)

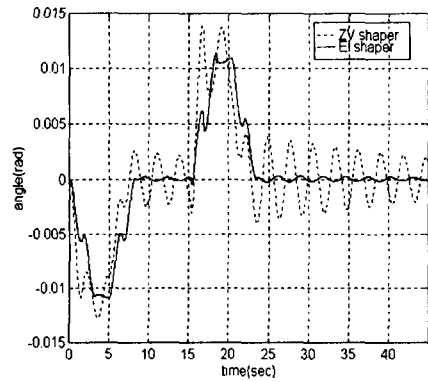


Fig. 12 Swing angle θ_x of the rope for ZV shaper and EI shaper with modeling error 15% ($l=1.9m$)

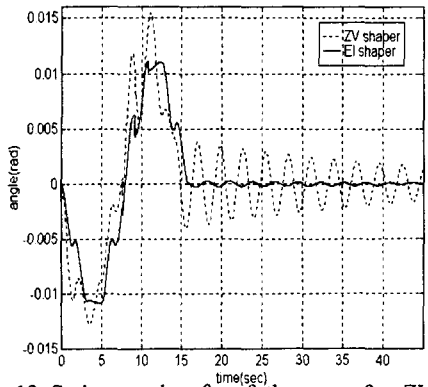


Fig. 13 Swing angle θ_y of the rope for ZV shaper and EI shaper with modeling error 15% ($l=1.9m$)

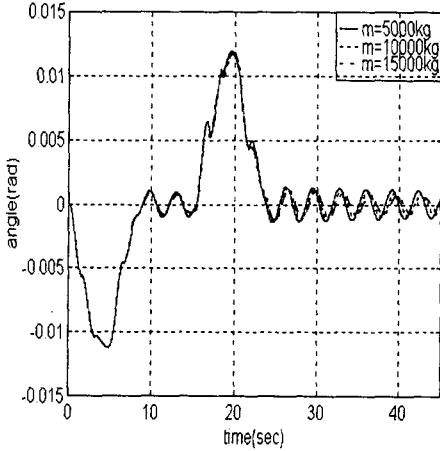


Fig. 14 Swing angle θ_x of the rope for a change of the mass ($l=2.5m$)

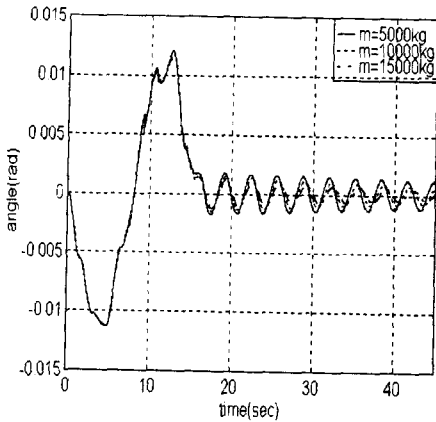


Fig. 15 Swing angle θ_y of the rope for a change of the mass ($l=2.5m$)

4. 결론

입력성형기법은 유연한 구조물을 가지는 로봇 끝집 제어에 많이 이용되어 왔지만 크레인 이송물의 흔들림 제어에도 좋은 성능을 나타내었다. 본 논문에서는 입력성형기법을 2축 천정크레인에 적용할 수 있다는 것을 보여 주었으며 또한 EI 입력성형기법은 ZV 입력성형기법보다 시스템 변화에

대해 강인하다는 것을 보였다. 강인성이 큰 EI 입력성형기를 사용한다면 로프의 길이를 변화하여도 잔류진동이 크게 일어나지 않으면서 물건을 목적지까지 이송시킬 수 있다. 이송물의 고유주파수만 알면 적용할 수 있으므로 현장에서 쉽게 사용할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 임펄스 간격 T 가 T_s 의 상수배가 되지 않을 경우는 $H(z)$ 를 구현할 수 없다. 본문의 내용은 입력성형기의 임펄스의 간격 T 를 T_s 로 구현할 수 있다고 가정하였을 경우이다. 구현할 수 없는 경우에 대해서 Murphy는 T_s 에 맞도록 등가 입력성형기 설계방법을 제시하였다⁽¹²⁾. 이 방법은 연속시간에서 재설계한 방법이다.

현재 z-영역에서 등가 입력성형기 설계방법에 대한 연구가 진행되고 있다.

참고문헌

1. 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.
2. W.E. Singhose, N.C. Singer, "Extra-Insensitivity Input Shapers for Controlling Flexible Space craft," Guidance, Control, and Dynamics Vol. 19. No. 2, pp. 385-391, March-April, 1996.
3. D.P. Magee, W.J. Book, "Optimal Filtering to Minimize the Elastic Behavior in Serial Link Manipulators," American Control Conference, Philadelphia, Pennsylvania, pp. 2637-2642, June, 1998.
4. J.M. Hyde, W.P. Seering, "Using Input Command Pre-Shaping to Suppress Multiple Mode Vibration," IEEE International Conference on Robotics and Automation Sacramento, California, pp. 2604-2609, April, 1991.
5. D.P. Magee, Wayne J. Book, "Implementing Modified Command Filtering to Eliminate Multiple Modes of Vibration," American Control Conference San Francisco, California, pp. 2700-2704, June, 1993.
6. 박운환, 이재원, 임병덕, 주해호, z-영역에서 강인한 입력성형필터의 설계, 한국정밀공학회지, 제16권 제4호, pp. 155-162, 1999.

7. 박운환, 이재원, 임병덕, 요철형 민감도를 가진 입력성형기의 Z-영역상의 설계, 대한기계학회 논문집(A), 제23권 제9호, pp. 1615~1621, 1999.
8. 이동철, 신민생, 하주식, 김상봉, 디지털재설계법에 의한 크레인계의 제어, 대한기계학회논문집, 제16권 제1호, pp. 41~52, 1992.
9. 윤지섭, 강이석, 천정크레인의 무진동/위치 제어기 개발에 관한 연구, 대한기계학회논문집, 제19권 제6호, pp. 1391~1401, 1995.
10. 이종규, 이상룡, 부분상태 궤환제어를 이용한 비선형 천정크레인의 진자각 제어, 대한기계학회논문집(A), 제21권 제6호, pp. 907-917, 1997.
11. 이호훈, 조성근, 2차원 천정크레인의 위치 및 이송물의 흔들림제어, 대한기계학회논문집(A), 제21권 제10호, pp. 1683-1693, 1997.
12. Brett R. Murphy, Ichiro Watanbe, "Digital Shaping Filters for Reducing Machine Vibration," IEEE Transaction on Robotics and Automation, Vol 8, No. 2, pp. 285-289, 1992.