

등가입력성형기를 이용한 크레인의 잔류진동 제어

박운환*, 이재원*, 노상현** 윤지섭***, 박병석***

Control of the Residual Vibration of Crane Using Equivalent Input Shaper

Un-Hwan Park*, Jae-Won Lee*, Sang-Hyun Noh**, Ji-Sup Yoon***, and Byung-Suk Park***

ABSTRACT

Input shaping is a method for reducing residual vibration in computer controlled machines. Vibration is eliminated by convolving a sequence of impulses, an input shaper, with a desired system command to produce a shaped input. This paper shows the shape of sensitivity curve of input shaper as impulse interval T and analysis of robustness for input shaper on the z -plane. And a method is presented for designing equivalent input shaper considering sampling time T_s . And then we applied equivalent input shaper to crane system.

Key Words : Equivalent Input Shaper (등가입력성형기), Sensitivity Curve(민감도 선도), Residual Vibration (잔류진동), Crane System(크레인 시스템)

1. 서론

일반 산업체에서는 무거운 물체를 이송하기 위해 크레인을 많이 사용한다. 크레인으로 물체를 이송할 때 이송물의 흔들림으로 인해 작업자의 안전을 위협하고 또한 작업 효율이 떨어지는 문제점이 발생한다. 특히 원자력 시설에서는 이송물의 안전이송은 절대적이기 때문에 크레인의 가감속을 매우 작게하고 주행속도 또한 매우 낮게 한다. 그러나 일반적인 산업시설에서는 생산성을 높이기 위해 가감속을 크게하고 주행속도를 크게 한다. 이 경우 이송물의 잔류진동이 크게 발생하며 이 잔류진동을 작게 하기 위하여 숙련된 작업자의 운전 능력에 의존한다. 그러므로 미숙련 작업자인 경우 안전사고가 일어날 수 있다. 따라서 안전사고 방지와 작업 효율을 높일 수 있는 알고리즘 개발이 활발히 진행

되고 있다. 본 논문에서는 입력성형기를 이용하여 크레인의 잔류진동을 제어하였다.

천정크레인의 이송물 흔들림 제어에 관한 논문은 많이 발표되었다. 이동철⁽¹⁾은 임의로 가해진 외란에 대해 단시간 진자의 진동을 억제하며 목표치 변경에 대해서도 오차없이 목표치에 추종하는 디지털 재설계법을 제안하였다. 윤지섭⁽²⁾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 제어를 설계하여 좋은 성능을 가지는 제어기를 제시하는 연구 논문들이 많이 발표되고 있다.

2001년 6월 25일 접수

* 영남대학교 기계공학부

** 대구공업대학교 자동차과

*** 한국원자력연구소

(3,4). 또한 Teo⁽⁵⁾는 입력성형기를 이용하여 크레인의 잔류진동을 제어하였다.

입력성형기법은 여러 개의 임펄스로 구성된 입력성형기에 기준입력을 컨벌루션하여 진동이 발생하지 않는 신호로 성형을 하는 기법이다. 입력성형기의 임펄스 크기와 시간은 시스템의 고유주파수와 감쇠비의 정보를 이용하여 구한다. 입력성형기법은 Smith⁽⁶⁾에 의해 Posicast 제어기법이란 이름으로 처음 소개되었다. Singer와 Seering⁽⁷⁾은 유연한 빔을 가진 로봇에 처음으로 적용하여 좋은 결과를 보여주었다. 또한 강인성을 추가하는 방법들을 제시하여 파라미터가 변하여도 잔류진동을 줄일수 있는 강인성이 큰 입력성형기를 제시하였다⁽⁸⁾. Singhose⁽⁹⁾는 입력성형기를 벡터 선도로 설계하는 방법을 제시하였다. Singer는 강인성을 증가시키는 방법으로서 임펄스 열을 늘렸으며 그 크기와 시간 간격은 미분 조건식을 추가하여 ZVD(Zero Vibration Derivative)형 입력성형기 설계방법을 제시하였다. 그러나 임펄스열을 늘리게 되면 시간지연이 늘어나게 되어 응답시간이 늦어진다. 따라서, 시간지연을 줄이면서 강인성을 증가시키는 방법으로 고유주파수 부근에서 어느 정도 진동을 허용하는 구속조건을 주어 민감도 선도가 Hump를 가지는 EI(Extra-Insensitive) 입력성형기가 제시되었다⁽¹⁰⁻¹²⁾. 입력성형기에 음의 크기를 가지는 임펄스가 존재하면 모터가 포화가 될 우려가 있으며 과도기적인 진동이 크다. 그러나 모터의 성능이 우수하면 음의 임펄스를 가지는 입력성형기를 사용하는 것이 좋다. 음의 임펄스를 가지면 임펄스의 간격이 작아진다. 따라서 시간지연을 줄일 수 있는 장점이 있다^(13,14).

한편, 시간영역에서 입력성형기를 설계하지 않고 이산시간에서 입력성형기를 설계하는 방법이 제시되었다. z-평면에서 입력성형기를 설계하는 것은 시스템의 극점을 상쇄할 수 있도록 성형기의 영점을 설계하는 것이다⁽¹⁵⁾. 그리고, 강인성을 증가시키는 것은 극점에 영점을 중첩하는 것과 같다는 것을 보였다. Tuttle⁽¹⁶⁾은 연속시간영역의 설계사양을 이산시간영역의 설계사양으로 변경하여 입력성형기를 설계하였다. 그리고, 임펄스가 모두 양이 되면서 가장 작은 임펄스 간격 T를 구하는 방법을 제시하였다. 박운환⁽¹⁷⁾은 z-평면에서 돌출(Hump)형 입력성형기를 설계하는 방법을 제시하였다.

본 논문에서는 민감도 선도를 z-평면에서 도식적으로 나타내었다. 이 방법은 z-평면에서의 영점

의 위치에 따라 민감도 선도의 형태를 알 수 있으므로 도식적으로 입력성형기를 설계할 수 있으며 입력성형기의 강인성을 쉽게 해석할 수 있다. 그리고 본 연구에서는 디지털 제어에서 사용하는 표본화 시간 T_s를 고려하여 등가입력성형기를 z-평면에서 설계하는 방법을 제시하였으며 그것을 이용하여 크레인에서 발생하는 잔류진동을 제어하였다. 입력성형기의 임펄스 간격이 T_s의 정수배가 되지 않는다면 입력성형기를 디지털 제어에서 정확하게 구현할 수 없다. 따라서 임펄스 간격을 T_s를 고려하여 설계하여야 한다. 등가입력성형기는 T_s를 고려하여 설계된 입력성형기로서 T_s를 고려하지 않고 설계된 입력성형기와 같은 성능을 나타내도록 한 입력성형기이다. 본문에서 표현된 z-변환의 표본화 시간 T는 입력성형기에서 임펄스 간격을 나타내며 실제로 디지털 제어에서 쓰이는 표본화 시간과는 다르다는 것을 명시한다. 따라서 디지털 제어에서 쓰이는 표본화 시간은 T_s로 나타낸다.

2. z-평면에서 입력성형기 설계

z-평면에서는 진동을 유발하는 시스템의 극점을 영점으로 상쇄시키는 원리를 이용하여 입력성형기를 설계한다. 2차 시스템에 대한 임펄스를 가했을 때 나타나는 잔류진동의 z-변환은 식(1)과 같다.

$$G(z) = \frac{1}{(1-p_1z^{-1})(1-p_1^*z^{-1})} \quad (1)$$

여기에서, $p_1 = Re^{j\theta}$, $p_1^* = Re^{-j\theta}$, $R = e^{-\zeta\omega_n T}$, $\theta = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2} T$ 이고 ω_n 은 비감쇠 고유주파수, ζ 는 감쇠비, T는 z-변환의 표본화 시간이다. 이러한 잔류진동을 없애기 위한 입력성형기의 영점은 식(2)와 같다.

$$H(z) = \frac{1}{K}(1-p_1z^{-1})(1-p_1^*z^{-1}) \quad (2)$$

$$= \frac{1}{K}[1-(p_1+p_1^*)z^{-1}+p_1p_1^*z^{-2}]$$

여기에서, K는 임펄스 크기를 모두 더한 것으로 임펄스 열의 크기들을 표준화시키기 위한 것이

다. 임펄스 크기들은 $z^{-i} (i=0, 1, 2)$ 의 계수들이다. 표본화 시간 T 에 따라 시스템의 극점과 입력성형기의 영점 위치는 z -평면에서 달라진다. 따라서 입력성형기의 임펄스의 크기도 달라진다. 표본화 시간 T 를 시스템 진동주기의 1/4보다 작게 하면 식(2)에서 $-(p_1 + p_1^*)$ 이 음의 크기를 가지게 된다. 이와 같이 임펄스의 크기가 양에서 음으로 부호가 변하게 되면 모터가 포화가 될 우려가 있으므로 임펄스가 음의 크기가 존재하는 경우는 피하도록 한다. 진동주기의 1/4보다 크게 하면 임펄스들이 모두 양의 크기이지만 임펄스 간격이 커져서 응답이 느려지므로 비효율적이다. 따라서 임펄스들이 모두 양의 크기이면서 가장 작은 임펄스 간격을 가지는 표본화 시간 T 는 진동주기의 1/4이다. 진동주기의 1/4인 경우는 $-(p_1 + p_1^*)$ 는 0이 되어 식(3)과 같이 표현 할 수 있다.

$$H(z) = \frac{1}{K} (1 + p_1 p_1^* z^{-2}) = A_0 + A_1 z^{-2} \quad (3)$$

시스템에 임펄스 입력 A_0 가 가해지면 진동이 발생한다. 이 진동을 없애기 위해서 반주기 후 감쇠된 진폭 A_1 만큼의 임펄스를 추가해주면 그 응답으로 인하여 진동이 상쇄되는 원리이다. 이와 같이 시스템의 고유주파수에서 잔류진동이 0이되고 2개의 임펄스로 구성된 입력성형기를 ZV (Zero-Vibration) 입력성형기라고 한다. 여기에 영점을 더 추가하면 ZVD 입력성형기가 된다. 영점이 더 추가되면 Fig. 1에서 보는바와 같이 주파수 저지대 역대가 넓어져서 강인성이 증가하게 된다. 영점들이 추가된 ZVDⁿ⁻¹ 입력성형기의 일반식은 식(4)와 같이 된다.

$$H(z) = \frac{1}{K} [1 - (p_1 + p_1^*)z^{-1} + p_1 p_1^* z^{-2}]^n \quad (4)$$

여기에서 n 은 강인성을 증가시키는 차수이다. 이 때 표본화 시간 T 가 진동주기의 1/4이므로 $z^{-1}, z^{-3}, \dots, z^{-(2n-1)}$ 의 계수가 0이 된다. 따라서 임펄스 간격은 표본화 시간 T 의 2배인 진동주기의 반주기가 된다. 그러나 표본화 시간 T 가 진동주기의 1/4이 아니면 $-(p_1 + p_1^*)$ 이 0이 되지 않으므로

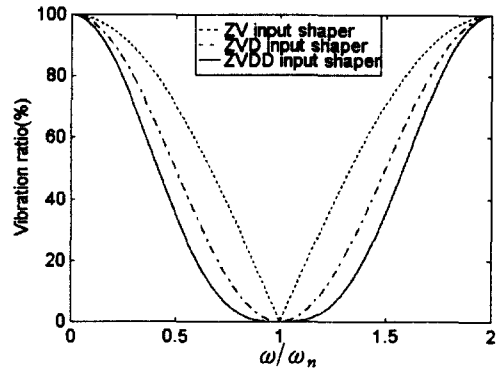


Fig. 1 Sensitivity curves of ZV, ZVD and ZVDD(ZVD²) input shaper.

임펄스 간격은 표본화 시간 T 가 된다. 이와 같이 입력성형기는 여러 개의 임펄스로 구성된 FIR(Finite-duration Impulse Response) 필터와 같다.

3. 민감도 선도

3.1 민감도 정의

민감도 선도는 시스템 주파수 변화에 따라 잔류진동의 크기가 얼마나 변하는가를 나타내는 선도이다. 측정된 주파수와 실제 시스템 주파수와의 오차에 대한 잔류진동 크기를 알 수 있으므로 모델링 에러에 대한 강인성을 예측할 수 있다. z -평면에서 민감도($V(\%)$) 계산은 식(5)와 같이 입력성형기 식으로부터 구할 수 있다.

$$V(\%) = |H(z)z^{2m}| \times 100 \quad (5)$$

여기에서 입력성형기를 사용하였을 때 잔류진동은 마지막 임펄스가 가해지고 난 다음에 나타나므로 입력성형기의 영점 차수만큼 z^{2n} 을 필터의 식에 곱하여 크기를 구해야 한다.

식(5)를 z -평면에서 도식적으로 설명하면 입력성형기의 영점들에서 각 주파수의 극점간의 거리의 곱들로 나타난다. 예를 들어 ZV 입력성형기인 경우는 Fig. 2와 같이 입력성형기의 영점들과 극점간의 거리인 $|(1 - pz^{-1})z|$ 와 $|(1 - p^*z^{-1})z|$ 를 서로 곱한 것이다. 이것을 각 주파수에 대해서 선도로 나타내면 Fig. 1과 같은 민감도 선도가 된다.

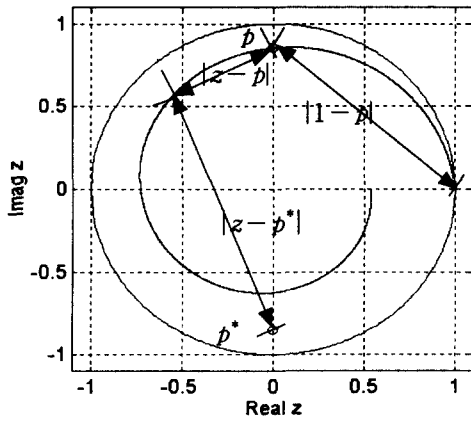


Fig. 2 Magnitude of $|(1-pz^{-1})(1-p^*z^{-1})z^2|$ for ZV input shaper in the z -domain when T is $\pi/2\omega_d$.

3.2 T에 따른 민감도 선도의 형태

z -변환의 표본화 시간 T 의 여러 가지 경우에 대한 민감도 선도의 모양을 알아보기로 한다. z -평면에서 민감도는 영점에서 $e^{-\zeta\omega T + j\omega T}$ 까지 거리의 백분율이다. 이 때 ω 를 변화시키면서 그 주파수에 대한 민감도를 나타내면 민감도 선도가 된다. 예를 들어 시스템의 고유주파수가 1Hz이고 감쇠비는 0인 경우에 대해서 설명하도록 한다.

Fig. 3은 표본화 시간 T 가 0.125s, 0.25s, 0.375s, 0.5s인 경우에 대해 영점의 위치를 나타낸 것이다.

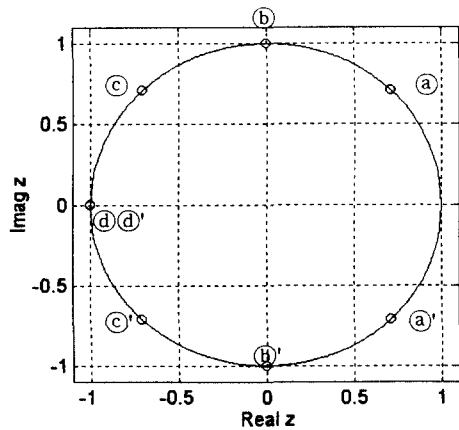
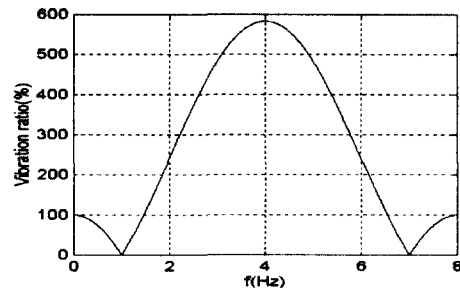
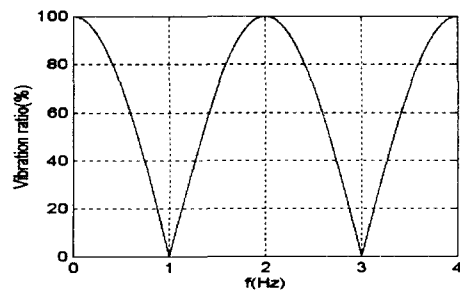


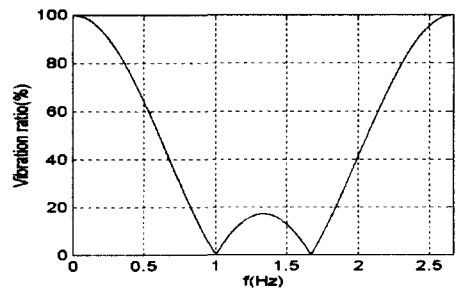
Fig. 3 Zero locations for $T=0.125s, 0.25s, 0.375s, 0.5s$ in the z -domain.



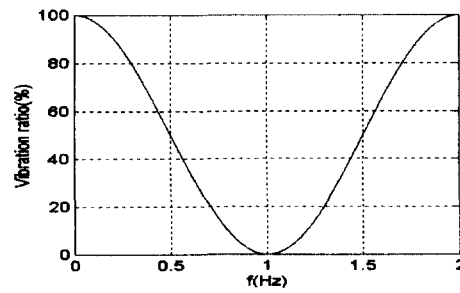
(a) $T=0.125s$



(b) $T=0.25s$



(c) $T=0.375s$



(d) $T=0.5s$

Fig. 4 Sensitivity curves for $T=0.125s, 0.25s, 0.375s, 0.5s$.

Fig. 3에서 영점 ㉑와 ㉒'는 표본화 시간 T 가 0.125s, ㉓와 ㉔'는 표본화 시간 T 가 0.25s, ㉕와 ㉖'는 표본화 시간 T 가 0.375s, ㉗와 ㉘'는 표본화 시간 T 가 0.5s이다. 이렇게 나타낸 이유는 $0 < T < \pi/2\omega_n$,

$T = \pi/2\omega_n$, $\pi/2\omega_n < T < \pi/\omega_n$, $T = \pi/\omega_n$ 인 경우에 대해 설명하기 위해서이다.

표본화 시간 T 가 $0 < T < \pi/2\omega_n$ 인 경우는 Fig. 3에서 1, 4분면에 영점이 위치한다. 표본화 시간 T 가 0.125s일 때 영점은 Fig. 3의 ㉑와 ㉒'이다. 민감도 선도는 Fig. 4(a)와 같다. 영점을 둔 1Hz의 주파수에서는 잔류진동이 발생하지 않지만 입력성형기를 사용하지 않았을 때 보다 잔류진동이 더 크게 나오는 주파수 영역이 존재한다. 이 영역은 Fig. 4(a)에서 잔류진동 크기비가 100% 이상이 되는 주파수 영역이다. 또한 임펄스 열중에서 음의 크기가 되는 임펄스가 존재하므로 시스템이 포화가 될 우려가 있다. Fig. 3의 z-평면에서 (-1, 0)인 지점인 임계 주파수 4Hz에서는 영점과 거리가 가장 멀리 있으므로 잔류진동의 크기가 최대가 된다.

표본화 시간 T 가 $\pi/2\omega_n$ 인 0.25s 경우에 입력성형기의 영점은 Fig. 3의 ㉓와 ㉔'와 같이 허수 축에 존재한다. 이와 같이 진동 주기의 1/4로 하여 영점 두 개를 두어 필터를 설계한 것은 진동 주기의 반 주기로 하여 영점 한 개를 두어 필터를 설계한 것과 같다⁽¹⁷⁾. 임펄스 열이 모두 양의 크기이면서 가장 빠른 표본화 시간이다. 민감도 선도는 Fig. 4(b)이며 Fig. 1의 ZV 입력성형기의 민감도 선도와 같다. Fig. 3의 z-평면에서 (-1, 0)인 임계주파수 2Hz는 영점에서 거리가 주파수 0인 (0, 1)과 거리가 같기 때문에 잔류진동의 크기비는 100%로 서로 같다. Fig.3.3의 z-평면에서 (-1, 0)의 주파수는 표본화 시간에 따라 다르므로 표본화 시간 T 가 0.125s인 경우는 4Hz이고 0.25s인 경우는 2Hz가 되는 것이다. 잔류진동 크기비가 100%란 의미는 입력성형기를 사용하지 않을 때 나타나는 잔류진동의 크기와 같다는 것을 의미한다. 따라서 이와 같이 1Hz 시스템이라고 가정하고 표본화 시간을 진동주기의 1/4로 하여 설계된 입력성형기를 2Hz 시스템에 사용한다면 잔류진동 크기는 1Hz 시스템에 입력성형기를 사용하지 않을 때 나타나는 잔류진동과 서로 같다.

표본화 시간 T 가 $\pi/2\omega_n < T < \pi/\omega_n$ 인 경우의 영점은 Fig. 3에서 2,3분면에 나타난다. 예를 들어 표

본화 시간 T 가 0.375s일때 영점은 Fig. 3의 ㉕와 ㉖'이다. ㉕지점이 1Hz가 되므로 임계 주파수인 (-1, 0)인 지점은 1.33Hz가 된다. ㉕지점에서 잔류진동이 0이 되고 단위원을 따라 점점 멀어져서 (-1, 0)지점에서 다시 ㉕'지점에 가까워지므로 임계 주파수인 1.33Hz에서 볼록한 형태의 민감도 선도가 된다는 것을 알 수 있다. 따라서 Fig. 4(c)에서 임계 주파수 1.33Hz인 지점에서 잔류진동의 크기가 지역 최대란 것을 알 수 있다. 이러한 형태는 돌출형 민감도 선도이다.

표본화 시간 T 가 $\pi/2\omega_n$ 인 0.5s일 때 영점은 Fig. 3에서 ㉗와 ㉘'이다. 이 경우는 표본화 시간 T 를 시스템 진동 주기의 반주기로 하고 영점 두 개를 임계 주파수에 둔 ZVD 입력성형기 식과 같다. Fig. 4(d)에서 임계 주파수 1Hz인 (-1, 0)지점에서 잔류진동의 크기가 전역 최소점이 된다.

이와 같이 z-평면에서 민감도를 계산하면 민감도 선도의 형태를 쉽게 예측할 수 있으므로 여러 형태의 민감도 선도를 가지는 입력성형기의 설계가 용이하다.

4. 등가입력성형기 설계

A_0, A_1 은 디지털 서보의 표본화 시간 T_s 를 고려하지 않고 설계한 입력성형기의 임펄스 열들이다. 그러나 임펄스 A_1 은 디지털 서보의 T_s 로는 구현을 할 수 없다.

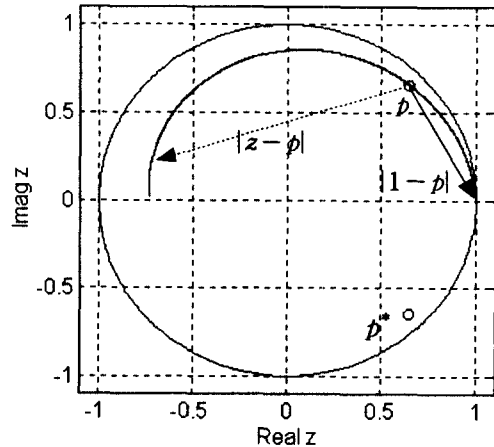
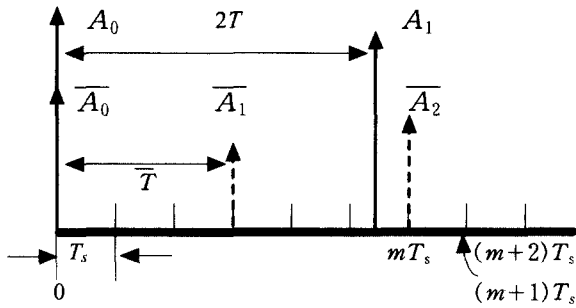


Fig. 5 Magnitude of $H(z)$ when T is $\pi/4\omega_d$ in the z-domain ($\zeta=0.1$).



여기에서, \bar{T} : 변화된 임펄스 간격
 Fig. 6 Changing two impulses into three impulses located at the sampled points.

$\bar{A}_0, \bar{A}_1, \bar{A}_2$ 는 디지털 서보의 표본화 시간 T_s 를 고려한 입력성형기의 임펄스들이다. 마지막 임펄스 A_1 다음의 표본 시간 $m, m+1, \dots, m+(2n-1)$ 중에서 $2n$ 으로 나누어 몫이 정수가 되는 값을 찾는다. 이 때 그 몫에 T_s 를 곱하여서 표본화 시간으로 다시 정하여 입력성형기를 설계한다. Fig. 6에서는 n 이 1이므로 6인 m 이 2로 나누어 정수가 되는 값이다. 따라서 mT_s 를 z-변환의 표본화 시간으로 정의하고 입력성형기를 식(4)와 같이 설계한다. 그러면 Fig. 6과 같이 3개의 임펄스가 된다. 디지털 서보의 표본화 시간 T_s 로 임펄스 간격을 구현할 수 있는 최소의 T 를 구하여 재설계를 하는 것이다.

5. 실험

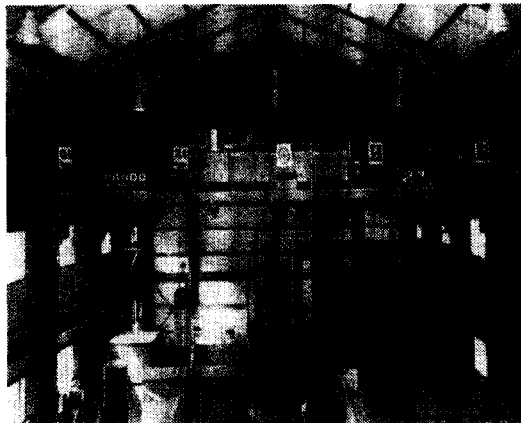


Fig. 7 Crane system

원자력 연구소에서 개발된 크레인 장치를 이용하여 실험하였으며 실험장치는 Fig. 7과 같다. 2축 크레인이지만 실험은 한 방향으로만 하였다. 크레인의 특성은 Table 1과 같다.

Fig. 8은 T_s 를 고려하지 않고 설계한 ZVD 입력성형기와 T_s 를 고려하여 설계한 ZVD 입력성형기의 임펄스 열들을 나타낸 것이다. 이 때 설계주파수는 0.22Hz이고 T_s 는 0.1s이다. ZVD 입력성형기는 n 이 2이므로 임펄스는 3개가 되며 임펄스 간격은 진동주기의 반주기인 2.27s이다. 그러나 T_s 로는 이것을 구현할 수 없다. 따라서 등가입력성형기를 설계하여야 한다. 마지막 임펄스 시간은 4.54s이다. $m+2$ 인 48이 4로 나누어 정수가 되는 값이다. 몫은 12가 되며 1.2s를 표본화 시간 T 로 정의하여 등가입력성형기를 설계한다. T_s 를 고려하지 않고 T 를 진동주기의 1/4로 하였을 때 임펄스 개수는 $n+1$ 이다. 그러나 등가입력성형기를 설계하기 위해 1/4보다 크게 하면 임펄스 개수는 $2n+1$ 로 증가하게 된다. 그 이유는 식(2)에서 $-(p_1 + p_1^*)$ 이 0이 되지 않기 때문이다. 이와 같이 입력성형기를 설계하면 Fig. 9와 영점의 위치는 허수 축에서 2,3분면으로 이동하는데 그 이유는 T 가 증가되었기 때문이다.

Table 1 The properties of crane system

대차 질량	2000 kg
이송물의 질량	500 kg
로프의 길이	5 m
로프의 진동수	0.22 Hz

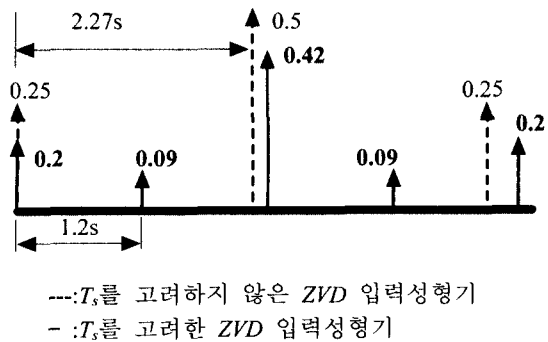


Fig. 8 Impulses of ZVD input shaper considering T_s and without considering T_s .

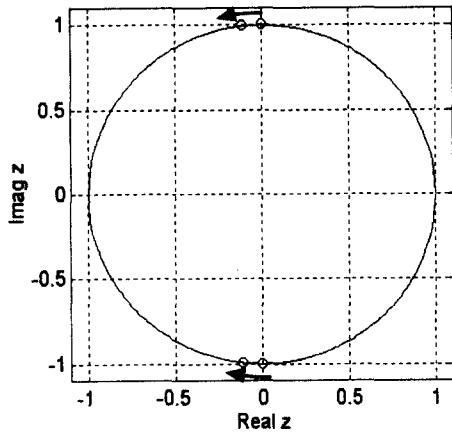


Fig. 9 Changing of zeros of equivalent input shaper.

입력은 산업현장에서 일반적으로 사용하는 사다리꼴 속도 입력으로 하였다. 크레인에 사용되는 모터는 AC 모터이며 모터 제어는 제어성능이 우수한 벡터 인버터를 사용하였다. 이 때 트롤리의 출력속도는 Fig. 10과 같으며 입력한 속도와 출력 속도는 거의 같게 나온다. 가속과 감속은 3s로 하였으며 최대 가속도는 $0.1m/s^2$ 이다. 등속은 17s, 최대속도는 $0.3m/s$ 이며 이송거리는 6m이다. 이 때의 가속도는 Fig. 11의 점선과 같다. Fig. 11의 실선은 입력 성형기와 컨볼루션 하였을 때 나오는 가속도 입력 신호이다. 이 때 사용된 입력성형기는 ZVD 등가입력성형기를 사용하였다. 이와 같이 가속도를 여러 개의 계단으로 나누어 크레인 시스템에 입력을 가하면 잔류진동이 발생하지 않는다. Fig. 12는 입력 성형기를 사용하였을 때와 사다리꼴 속도 입력을 주었을 때 나타나는 잔류진동을 나타낸 것이다. Fig. 12에서 보는 바와 같이 사다리꼴 속도 입력을 주었을 때 나타나는 잔류진동은 매우 크게 나타나지만 등가입력성형기를 사용하였을 때는 잔류진동이 거의 나타나지 않는다.

6. 결론

본 논문에서는 z-평면에서 민감도를 도식적으로 나타내고 그것을 이용하여 여러 가지 민감도 선도의 형태를 제시하였다. 그리고 본 논문에서는 z-평면에서 디지털 제어의 표본화 시간 T_s 를 고려하여

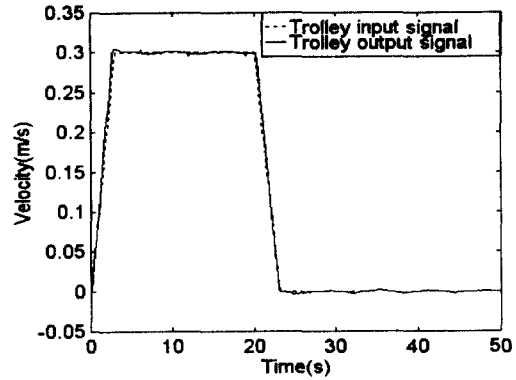


Fig. 10 Input and output signal of motor.

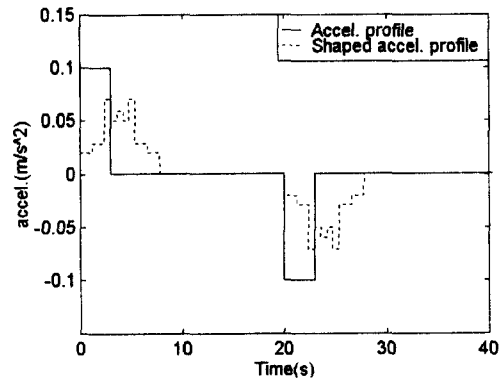


Fig. 11 Shaped acceleration and acceleration signal of motor.

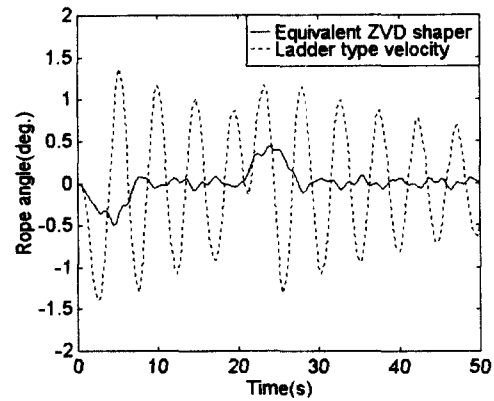


Fig. 12 Time response of rope angle of crane system with and without equivalent ZVD shaper.

설계된 등가입력성형기를 크레인 시스템에 적용하였다. 입력성형기를 사용하지 않고 사다리꼴 속도 입력만을 가했을 때는 잔류진동이 크게 나타났지만 등가입력성형기를 사용하였을 때는 잔류진동이 거의 나타나지 않았다. 본 논문에서 제시한 z-평면에서 등가입력성형기 설계방법은 표본화 시간 T_s 를 고려하여 임펄스 간격을 재조정하는 방법이다. 실제 산업현장에서 적용할 때 이와 같은 등가입력성형기를 사용하여야 한다.

참고문헌

1. 이동철, 신민생, 하주식, 김상봉, "디지털재설계법에 의한 크레인계의 제어," 대한기계학회논문집, 제16권 제1호, pp. 41~52, 1992.
2. 윤지섭, 강이석, "천정크레인의 무진동/위치 제어기 개발에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제19권 제6호, pp. 1391~1401, 1995.
3. 이종규, 이상룡, "부분상태 궤환제어를 이용한 비선형 천정크레인의 진자각 제어," 대한기계학회논문집(A), 제21권 제6호, pp. 907-917, 1997.
4. 이호훈, 조성근, "2차원 천정크레인의 위치 및 이송물의 흔들림 제어," 대한기계학회논문집(A), 제21권 제10호, pp. 1683-1693, 1997.
5. Teo, C. L., Ong, C. J. and Xu, M., "Pulse Input sequences for Residual Vibration Reduction," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 211(2), pp. 157-177, 1998.
6. Tallman and Smith, "Analog Study of Dead-Beat Posicast Control", *IRE Transactions on Automatic Control*, Vol. AC-3, pp. 14-23, 1958.
7. Singer, N. C. and Seering, W. P., "Experimental Verification of Command Shaping Methods for Controlling Residual Vibration in Flexible Robots," *Proceedings of the American Control Conference*, pp. 1738-1744, 1989.
8. Singer, N. C. and Seering, W. P., "Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration", *ASME, Journal of Dynamic System, Measurement and Control*, Vol. 112, pp. 76-82, 1990.
9. Singhose, W. E., "A Vector Diagram Approach to Shaping Inputs for Vibration Reduction," MIT Artificial Intelligence Lab. Memo No. 1223.
10. Singhose, W. E. and Singer, N. C., "Extra-Insensitivity Input Shapers for Controlling Flexible Spacecraft," *Guidance, Control, and Dynamics* Vol. 19. No. 2, pp. 385-391, 1996.
11. Porter, L. J., Singhose, W. E., Tuttle, T. D. and Singer, N. C., "Vibration Reduction Using Multi-Hump Input Shapers," *ASME, Journal of Dynamic System, Measurement and Control*, Vol. 119, pp. 320-326, 1997.
12. Singhose, W. E. and Singer, N. C., "Initial Investigations into the Effects of Input Shaping on Trajectory Following," *Proceedings of the American Control Conference*, Baltimore, MD, Vol. 3, pp. 2526-2532, 1994.
13. Singhose, W. E., Seering, W. P. and Singer, N. C., "Time-Optimal Negative Input Shapers," *ASME*, Vol. 119, pp. 198-205, 1997.
14. Rappole, B. W., Singer, N. C. and Seering, W. P., "Input Shaping With Negative Sequences for Reducing Vibrations in Flexible Structures," *Proceedings of the American Control Conference*, San Francisco, CA, Vol. 3, pp. 2695-2699, 1993.
15. Murphy, B. R. and Ichiro Watanbe, "Digital Shaping Filters for Reducing Machine Vibration," *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol. 8, No. 2, pp. 285-289, 1992.
16. Tuttle, T. D. and Seering, W. P., "A Zero-placement Technique for Designing Shaped Inputs to Suppress Multiple-mode Vibration," *Proceedings of the American Control Conference*, pp. 2533-2537, 1994.
17. Park, U. H., Lee, J. W., Lim, B. D. and Sung, Y. G., "Design and Sensitivity Analysis of Input Shaping Filter in the Z-plane," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 243, No. 1, pp. 157-171, 2001.