

크레인의 정밀한 정지와 잔류진동 억제를 위한 개선된 입력 성형기법

An Improved Input Shaping Method for Precise Stopping and Residual Vibration Reduction of Cranes

배규현¹, 홍성욱^{2,✉}
Gyu-Hyun Bae¹ and Seong-Wook Hong^{2,✉}

¹ 금오공과대학교 기전공학과 대학원 (Graduate School, Department of Mechatronics, Kumoh National Institute of Technology)

² 금오공과대학교 기전공학과 (Department of Mechatronics, Kumoh National Institute of Technology)

✉ Corresponding author: swhong@kumoh.ac.kr, Tel: +82-54-478-7344

Manuscript received: 2013.1.23 / Revised: 2013.3.17 / Accepted: 2013.3.19

Industrial cranes are indispensable equipment in heavy industry. However, unwanted vibrations in cranes often cause accidents. Input shaping is widely accepted as a useful tool for removing residual vibration in cranes. A unity magnitude zero vibration (UMZV) input shaper is often used for cranes driven by on-off-type motors. However, although a UMZV input shaper minimizes residual vibration, the input shaper cannot prevent the crane from moving slightly further than expected from the original command. This paper describes an improved method of input shaping that can compensate for position inaccuracies, as well as remove the residual vibration of cranes. Experiments were performed to validate the proposed input-shaping method, illustrated through numerical simulations.

Key Words: Input Shaping Method (입력성형기법), Overhead Crane (천장형 크레인), Residual Vibration (잔류진동), Input Shaper (입력성형기)

1. 서론

크레인은 중량물을 편리하게 이동할 수 있는 유용한 장비이지만 중량물 이동 중 발생하는 잔류진동은 작업효율을 나쁘게 할 뿐만 아니라 안전에 심각한 위협이 되고 있다.^{1,2} 이 같은 문제를 개선하기 위해 지금까지 많이 사용되어온 잔류진동 제어기법은 되먹임제어 방식이다. 트롤리의 위치와 부하의 흔들림을 제어하기 위해 PID제어기를 이용하여 트롤리와 부하의 각각의 동특성에 기초한 보상기를 이용하여 제어하는 방식 등이 제안된 바 있다.³⁻⁶ 이 방법은 시스템의 특성에 따라 제어기를

설계해야 하며 되먹임을 위한 측정장치 및 제어장치를 추가적으로 장착해야 하므로 시스템이 복잡해지게 된다.

최근 입력성형기법을 적용하여 이와 같은 크레인의 잔류진동을 제거하는 방법이 도입되어 유용하게 활용되고 있다.⁷⁻¹⁵ 특히 산업체에 많이 도입되어 있는 저가형 크레인의 경우 On-off 형 모터를 채용하고 있는데 입력성형기법 중 UMZV (Unity Magnitude Zero Vibration)가 효과적이다.^{1,7} 일반적으로 입력성형기법은 시스템에 추가적인 하드웨어가 필요없어 간단하게 실현이 가능하며 기존의 크레인에 이 같은 기능을 할 수 있도록 상업화된 제품

이 유통되고 있다.¹ 그러나 이 같은 장점에도 불구하고 UMZV를 적용하는 경우, 크레인에 정지명령이 내려진 후 잔류진동의 상쇄를 위해 추가적인 운동이 발생하게 되어 목적하는 위치에 정지하는 것을 어렵게 하는 문제점이 있어 크레인 작업 능률이 나빠질 수 있다. 이러한 문제점에 관련하여 입력성형기법 적용 시 발생하는 위치결정 문제에 대한 연구는 있었으나 On-off 형 저가 크레인이 아닌 인버터형 크레인을 중심으로 ZV입력성형기법에 국한되어 시뮬레이션과 실험이 이루어졌다.¹⁰

본 연구에서는 가장 널리 사용되고 있는 저가의 천장형 크레인을 대상으로 입력성형기법을 적용함에 있어 정지위치명령 보상기능을 추가하여 사용자가 위치하고 싶어하는 곳에 정지할 수 있도록 정지기능을 강화한 입력성형기를 제안하였다. 이 방법은 기존의 UMZV를 보완하기 위해 임펄스의 개수를 늘리는 방식으로 구성되었으며 이론적인 해석을 통해 임펄스 시간간격을 최적으로 결정하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법을 검증하기 위해 시뮬레이션과 실험을 실시하였다.

2. 천장형 크레인 및 입력성형기법

2.1 천장형 크레인

Fig. 1은 전형적인 천장형 크레인을 보여주고 있다. 주행(Travel)과 횡단(Traverse)의 두 직교 축방향 이동이 가능하도록 구성된다. 횡단보 상에서 이동하는 물체를 트롤리(Trolley)라고 하며 이 곳에 호이스트(Hoist)가 설치된다. 크레인의 이동명령은 통상 펜던트(Pendent)라고 불리는 입력장치를 이용해 작업자가 직접 버튼입력을 하는 방식으로 가해진다.

크레인 작업은 궁극적으로 대상 중량물(Payload)을 원하는 곳에 위치시키는 것이 목적이지만 운동명령을 직접 달성하는 것은 트롤리이며 대상물과 트롤리 사이는 와이어로 연결됨으로서 상대운동이 발생한다. 특히 트롤리의 변속은 대상물에 진동을 발생시키게 되며 작업효율과 안정성을 나쁘게 한다.

2.2 UMZV 입력성형기

On-off 모터형 크레인의 진동을 저감하는데 적용 가능한 입력성형기는 UMZV (Unity Magnitude Zero Vibration) 성형기⁷이다. UMZV 입력성형기는 3개의 단위크기 임펄스, 즉 두개의 1과 한 개의 -1

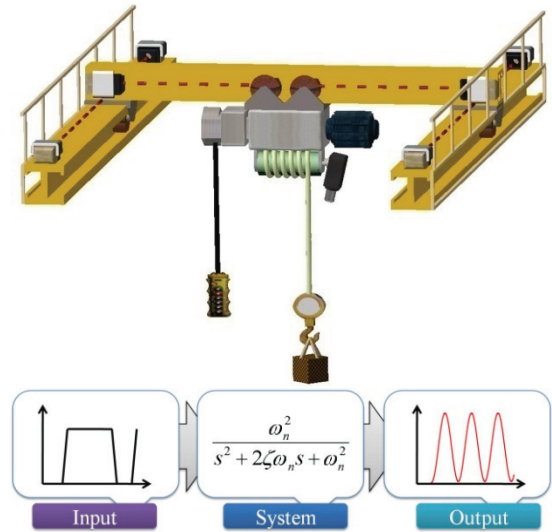


Fig. 1 Schematic diagram of overhead crane system

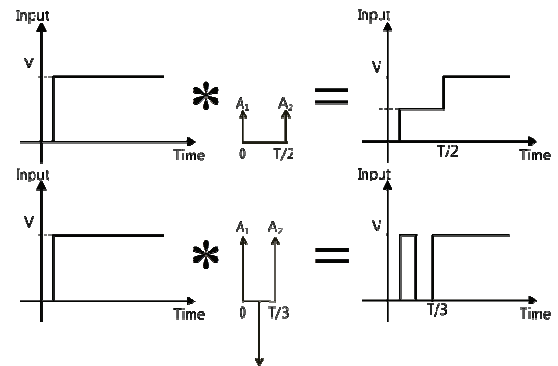


Fig. 2 Input shaping process

인 임펄스로 구성된다. Fig. 2는 UMZV 입력성형기를 이용하여 계단입력을 성형하는 과정을 보여주고 있다. UMZV 입력성형기의 지속시간은 진동 주기(T)의 1/3로서 전체적으로 T/3의 시간지연을 일으키게 된다. 일반적으로 널리 사용되는 ZV (Zero Vibration) 입력성형기⁷의 경우 T/2인 지속시간을 가져 UMZV 입력성형기가 지속시간이 감소하는 이점이 있으나 급격한 속도변화가 필요하므로 좀 더 큰 용량의 모터가 요구된다.

3. 정밀 정지위치결정 입력성형기

3.1 제안된 입력성형기

펜던트를 통해 크레인에 모터 운동명령이 가해

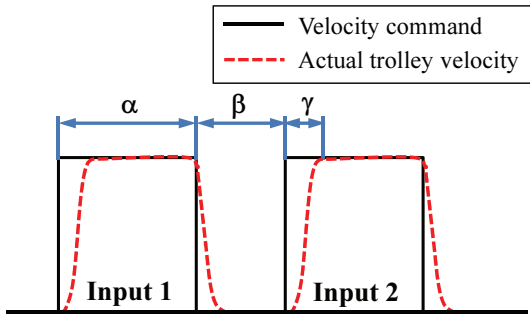


Fig. 3 Comparison of command profile(solid) and trolley velocity profile(dashed)

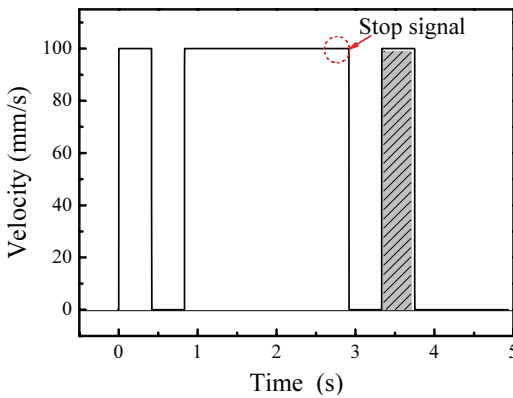


Fig. 4 UMZV shaped trolley velocity profile and stop signal

질 때 트롤리(Trolley)가 그 입력에 그대로 동기해서 운동하는 것은 불가능하다. 모터 및 트롤리의 동적 특성에 따라 트롤리는 가속 또는 감속운동 구간이 존재하기 때문이다. Fig. 3에는 시스템에 가해지는 입력명령과 실제 발생하는 속도프로파일을 비교해서 보여주고 있다. 펄스형태 입력명령이 연속해서 두 개가 가해지는 경우이다. 그림의 입력 속도프로파일에서 가감속이 이루어지는 구간을 α , β , γ 로 구분하여 표현하였다. α 는 첫째 입력의 전체 시간, β 는 두 입력간의 시간간격, 그리고 γ 는 시스템의 특성에 의해 결정되는 가감속 시간이다. 만약 α 가 γ 보다 작다면 감속이 완전히 이루어지기 전에 가속하므로 입력성형의 적용이 불가능한 경우이고, β 가 γ 보다 작다면 가속이 이루어지기 전 감속이 발생하므로 이 또한 불가능하다. 따라서 입력시간과 두 개의 입력 간 시간간격은 가감속 시간보다 커야 하며 이 같은 조건이 만족된다고 가정한다.

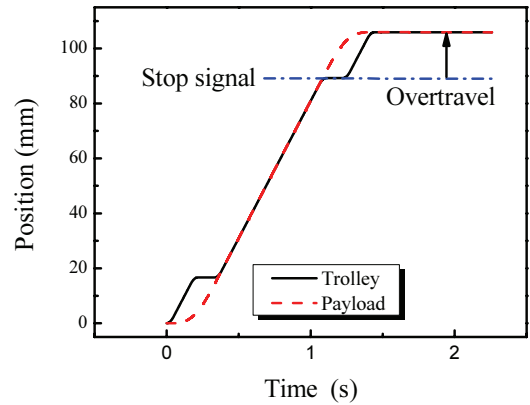


Fig. 5 Illustration of over-travel by UMZV input shaping

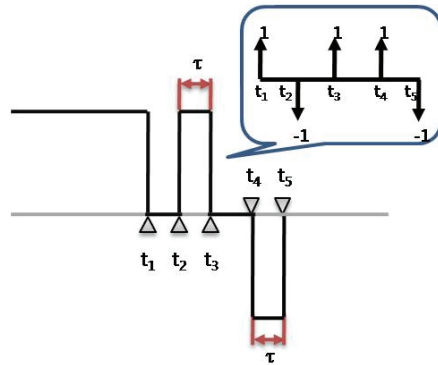


Fig. 6 Proposed input shaper and a shaped command profile for stopping

UMZV 성형기를 적용한 입력속도프로파일을 Fig. 4에 예시하였다. 그림에서 표시한 것과 같이 정지신호 이후 입력성형에 의하여 입력이 추가되는 것을 볼 수 있다.

이와 같이 정지신호가 발생한 위치와 실제로 입력성형이 이루어진 후에 정지된 위치를 비교하여보면 Fig. 5와 같다. 그림에서 보여지는 것과 같이 입력성형으로 인하여 희망정지위치로부터 벗어나 추가이동이 발생하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 이를 해결하기 위하여 원하는 정지위치로 회귀하는 역방향 입력을 인가할 수 있도록 개선된 입력성형기를 제안하였다.

새롭게 제안한 입력성형기는 UMZV 입력성형기를 기본으로 두고 역방향 임펄스를 추가하여 Fig. 6과 같이 5개의 임펄스로 구성하였다. 정지명령이 가해진 위치로의 회귀를 위해서 임펄스의 시간 t_2 와 t_3 의 차이와 t_4 와 t_5 의 차이는 같아야 한다.

정지위치로 돌아가기 위해서는 동일한 크기의 역 방향 명령이 필요하기 때문이다. 이 시간 차이를 τ 로 표현하여 설계변수로 두었다.

입력성형에 의한 응답지연을 줄일 수 있도록 동일한 입력성형 조건에서 입력성형기에 의한 지속시간이 최소로 되는 입력성형기를 채택하는 것이 요구된다. 따라서 마지막 다섯 번째 임펄스의 시간 $t_5(t_4+\tau)$ 가 최소가 되는 것이 바람직하다.

3.2 입력성형기 설계

입력성형기는 일반적으로 시간에 대한 여러 개여 임펄스 열로 표현되며,⁶ 앞에서 설정한 입력성형기의 시간변수를 대입하여 입력성형기를 시간영역에서 표현하면 식(1) 과 같다.

$$i(t) = \delta(t-t_1) - \delta(t-t_2) + \delta(t-t_2-\tau) + \delta(t-t_4) - \delta(t-t_4-\tau) \quad (1)$$

식(1)을 라플라스 영역으로 변환하면 다음 식과 같다.

$$I(s) = 1 - e^{-st_2} + e^{-s(t_2+\tau)} + e^{-st_4} - e^{-s(t_4+\tau)} \quad (2)$$

여기서, $0 < t_2 < t_4$, $\tau > 0$ 로 가정한다.

입력성형기 조건을 만족하기 위해 식(2)는 다음과 같이, 시스템 극점을 영점으로 가져야 한다.

$$I(s_0) = 1 - e^{-s_0 t_2} + e^{-s_0(t_2+\tau)} + e^{-s_0 t_4} - e^{-s_0(t_4+\tau)} = 0 \quad (3)$$

여기서 크레인의 주된 모드를 1개로 가정하고 시스템 극점을 다음과 같이 표현한다.

$$s_0 = \sigma \pm j\omega = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$$

크레인의 경우는 감쇠에 의한 영향이 거의 없으므로 $s_0 = j\omega_n = j2\pi f_n$ 로 두도록 한다. 이를 식(3)에 대입하고 실수부와 허수부로 분리해서 표현하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} &1 - \cos(\omega_n t_2) + \cos(\omega_n(t_2 + \tau)) \\ &+ \cos(\omega_n t_4) - \cos(\omega_n(t_4 + \tau)) = 0 \\ &\sin(\omega_n t_2) - \sin(\omega_n(t_2 + \tau)) \\ &- \sin(\omega_n t_4) + \sin(\omega_n(t_4 + \tau)) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

식(4)에서 미지변수는 t_2 , t_4 와 τ 이다. 식이 2개이므로 τ 를 일정한 값으로 가정하여 t_2 , t_4 를 구한

다. 식(4)을 다시 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\cos(\omega_n t_2) - \cos(\omega_n t_4) = \frac{1}{2} \quad (5)$$

$$\sin(\omega_n t_2) - \sin(\omega_n t_4) = \frac{\sin(\omega_n \tau)}{2 - 2\cos(\omega_n \tau)} \quad (6)$$

식(5), (6)을 이용하여 주어진 고유진동수에서 t_2 와 t_4 를 구할 수 있으나 τ 가 확정되어 있지 않으므로 이 식을 만족하는 해는 무수히 많다. 식(6)에서 다음과 같은 τ 에 대한 제한조건을 얻을 수 있다.

$$\left| \frac{\sin(\omega_n \tau)}{2 - 2\cos(\omega_n \tau)} \right| \leq 2 \quad (7)$$

식(7)을 만족시킬 수 있는 τ 의 범위는 다음과 같다.

$$\frac{T}{12.5} < \tau < \frac{T}{6} \quad (8)$$

여기서 T는 고유진동주기를 의미한다. 따라서 실제 의미를 갖는 τ 값은 제한된다.

3.3 τ 의 변화에 따른 특성 검토

수정된 입력성형기 설계 시 τ 에 따른 해의 존재 조건을 얻었다. Fig. 7에는 식(5),(6)으로부터 τ 를 변화시키며 구해진 입력성형기 특성치, t_2 와 t_4 의 해를 도시하였다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 동일한 τ 에서 각각 두 쌍씩의 해가 존재함을 알 수 있다. 이를 각각 긴 지속시간(Fig. 7(a))과 짧은 지속시간(Fig. 7(b))로 구분해서 나타내었다. 가로축은 시간을 주기로 나눈 무차원 값으로 표시하였다.

Fig. 7(a)에서는 τ 가 작을수록 입력성형기의 지속시간이 작아지는 반면, Fig. 7(b)는 반대로 τ 가 커질수록 지속시간이 짧아지며 전체적으로도 지속시간이 짧다는 장점이 있다. 입력성형의 전체시간이 최소화되므로 Fig. 7(b)의 해를 사용하는 것이 바람직하다. 따라서 본 연구에서는 짧은 지속시간을 갖는 입력성형기를 고려하였다. 그러나 τ 가 증가하여 T/6에 접근하면 두 개의 임펄스가 동일한 시간에서 겹쳐지는 현상이 발생하므로 식(8)의 조건을 만족시켜야 할 필요가 있다.

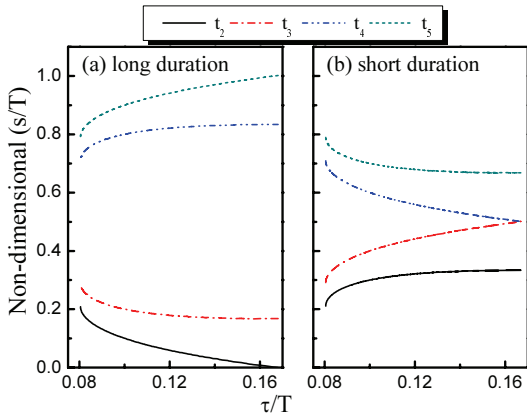


Fig. 7 Time locations of impulses with τ varied

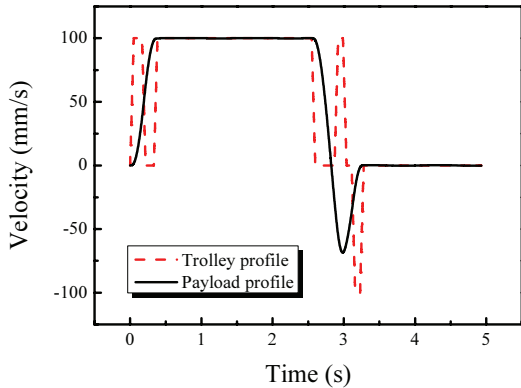


Fig. 8 Velocities of trolley and payload for pulse type command with the proposed input shaper applied

4. 제안된 입력성형 적용

4.1 시뮬레이션

본 연구에서는 On-off 형 모터로 구동되는 크레인이 원하는 위치에서 정지할 수 있는 입력성형기를 설계하는 방법을 제안하였다. 여기서는 설계된 입력성형기를 적용하여 진동이 제거되는 것을 확인하고 최종적인 위치를 확인하는 시뮬레이션을 실시하였다. 고유진동수는 1Hz로 두었고 가감속 시간은 0.05s로 두었다. τ 는 0.119로 두어 가감속 시간의 2배 이상을 확보하여 입력성형작업이 왜곡되지 않도록 하였다.

Fig. 8에 펄스형태의 입력이 가해졌을 때 입력성형 후의 속도프로파일을 나타내었다. 대상물의 속도변화를 보면 잔류진동이 발생하지 않은 것을 알 수 있다. Fig. 9는 정지위치에서의 변화를 보여

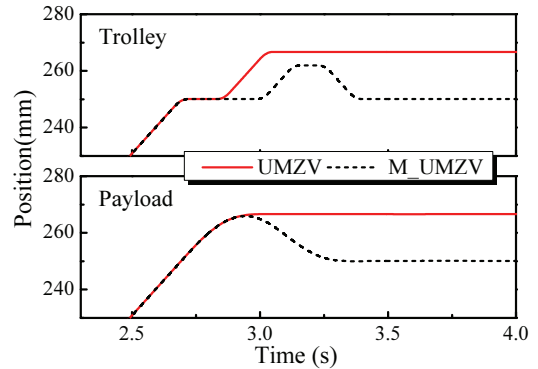
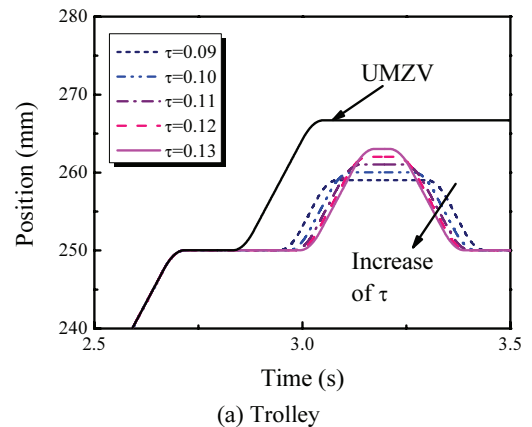
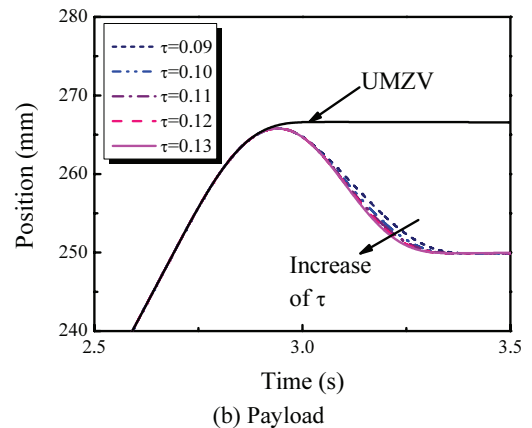


Fig. 9 Positions of trolley and payload for pulse type command with the conventional UMZV and the proposed input shaper (M_UMZV)



(a) Trolley



(b) Payload

Fig. 10 Comparison of position profiles with τ varied

주고 있다. Fig. 4에서 보여지던 최종위치와 달리 트롤리와 중량물 모두 진동없이 정지명령이 내려진 위치로 돌아가는 것을 볼 수 있다. 따라서 제

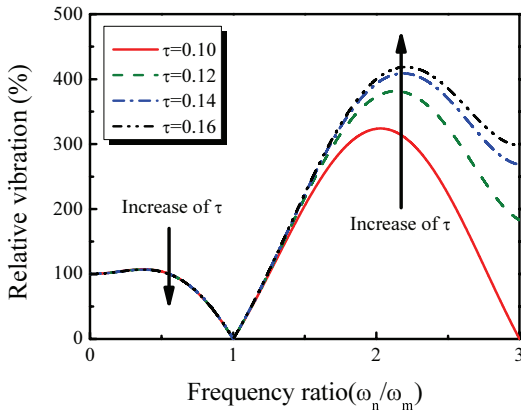


Fig. 11 Sensitivity curve for the proposed input shaper with τ varied

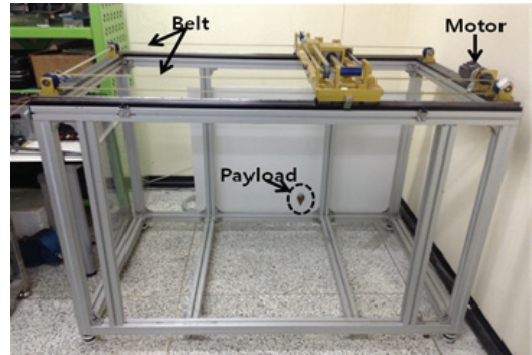
안된 입력성형기를 통하여 잔류진동이 제거됨은 물론 당초 희망하였던 정지위치로 최종위치가 결정됨을 알 수 있다. 이를 통해 잔류진동을 일으키지 않으면서도 작업자의 의도대로 정밀위치결정 기능을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

한편, Fig. 10은 τ 값의 변화에 따른 트롤리와 중량물의 정지위치 응답을 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 τ 가 증가함에 따라 트롤리 위치 변화가 크게 발생하는 반면, 중량물의 변화는 크게 영향을 받지 않으므로 안정적인 응답을 원할 경우에는 τ 를 작게 하는 것이 바람직하다.

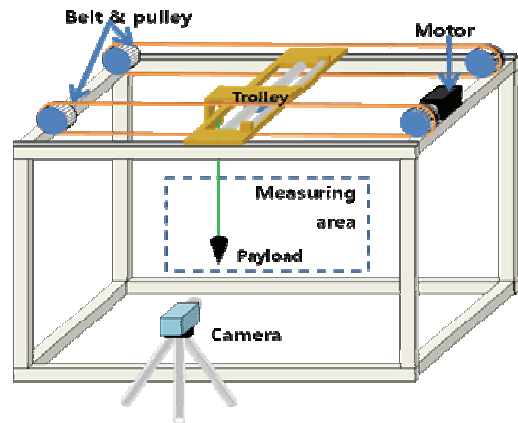
한편 τ 는 시스템 가속시간(γ) 보다 큰 값을 가져야 하는 제한조건이 부가된다. Fig. 11은 입력성형적용 시 고유진동수 오차에 대한 응답의 민감도를 보여주고 있다. 고유진동수 오차에 따른 응답민감도로서 오차가 작을 경우 τ 값에 따른 민감도의 차이가 거의 나타나지 않는다. 다만 모델링한 고유진동수와 실제가 1.5배 이상 매우 큰 차이가 나는 경우 τ 값의 증가에 따라 오차 민감도가 커지는 것을 볼 수 있으며 따라서 실제적인 조건에서는 τ 값에 따른 오차 민감도의 영향이 거의 없다고 할 수 있다.

4.2 실험

Fig. 12에 실험장치를 보여 주고 있다. 실험장치는 XY축으로 주행과 횡단이 가능하도록 되어있으며 Z축으로 호이스트가 설치되어 페이로드 상하 움직임도 가능하다. 구동시스템은 서보모터, 벨트와 풀리, LM가이드로 구성된다. 모터의 제어는 Delta tau사의 UMAC컨트롤러를 사용하였으며 On-



(a) Photo



(b) Schematic diagram

Fig. 12 Experimental system

off 방식으로 구동하였다.

Fig. 12(b)의 개략도와 같이 카메라를 이용하여, 이동하는 페이로드 영상을 획득, 영상처리 알고리즘으로 페이로드의 좌표를 획득하였다. 실험은 τ 값을 0.09에서 0.13까지 0.02단위로 변화시키며 실행하였다. Fig. 13은 실험과정에서 얻어진 트롤리 동작을 인코더 펄스수로 나타낸 것이다. 정지명령이 발생한 위치, 즉 펄스수100k에서 트롤리가 정지하고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 14는 제안한 방법을 적용하였을 때 페이로드의 움직임을 영상처리하여 얻은 결과이다. 제안한 방법을 적용하여 진동이 억제되는 것을 확인할 수 있으며 시뮬레이션에서와 동일하게 정지명령이 발생한 위치로 돌아오는 것을 확인할 수 있다.

이상과 같이 실험에서도 Fig. 10의 시뮬레이션 결과와 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 특히 입력성형기의 두번째와 세번째, 네번째와 다섯번째 간의 시간간격을 의미하는 τ 는 중량물의 움직임에

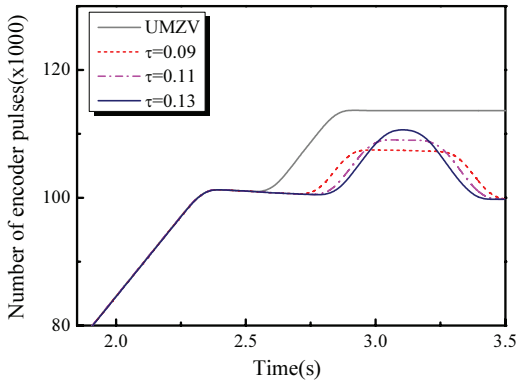


Fig. 13 Positions of trolley with UMZV and the proposed input shaper (M_UMZV)

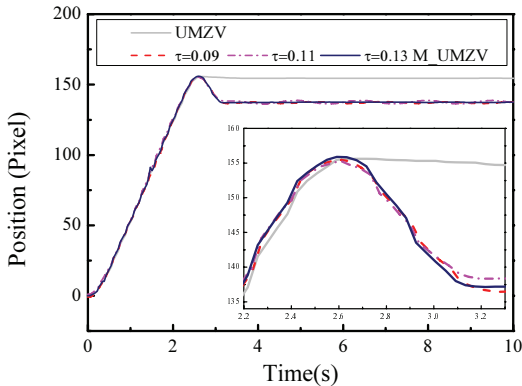


Fig. 14 Positions of payload with UMZV and the proposed input shaper (M_UMZV)

는 큰 차이를 발생시키지 않고 있음을 알 수 있다. 따라서 식(8)에 주어진 제한조건과 시스템특성에 의해 결정되는 가감속시간 보다 큰 값을 갖는 범위 내에서 결정할 수 있으며 입력성형기로 인한 시스템의 응답속도감소를 최소화하기 위해서는 가능한 작은 값을 갖는 것이 유리하다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 기존 UMZV 입력성형기의 단점을 보완하여 On-off 형 모터를 탑재한 크레인에 효과적으로 적용되는 입력성형기를 제안하였다. UMZV 입력성형기를 적용할 경우 정지명령이 입력된 후에도 잔류진동을 상쇄시키기 위해 추가 이동이 발생하는데 제안된 방법은 이 추가 이동분을 상쇄시킴으로서 정지명령이 인가된 위치에서 정지

할 수 있도록 입력을 수정하는 방법이다. 제안된 방법의 유도과정을 설명하였고, 적용시의 특성에 대해 토의하였다. 시뮬레이션을 통해 제안된 방법이 위치오차를 효과적으로 상쇄시킬 수 있음을 확인하였다. 또한 제안한 방법을 실험용 크레인에 적용하였으며 제안한 방법이 효과적으로 진동을 억제하며 정지명령 이후에 발생하는 추가이동을 상쇄하는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Park, S. W. and Hong, S. W., "Application of Input Shaping Method to Industrial Cranes," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 28, No. 9, pp.1032-1039, 2011.
2. Kim, H. H. and Lee, G., "An Analysis of the Accident Types and Causes of Construction Cranes," Proc. of KIC Spring Conference, Vol. 7, No. 1, pp. 109-112, 2007.
3. Lee, H. H. and Cho, S. K., "Position and Swing Angle Control for Loads of Overhead Crane," Trans. KSME A, Vol. 21, No. 2, pp. 297-304, 1997.
4. Lee, H. H. and Cho, S. K., "Position and Load-Swing Control of a 2-Dimensional Overhead Crane," Trans. KSME A, Vol. 21, No. 10, pp. 1683-1693, 1997.
5. Yoon, J. S., "Comparison Study of Various Control Schemes for the Anti-Swing Crane," Trans. KSME, Vol. 19, No. 9, pp. 2399-2411, 1995.
6. Hekman, K. A. and Singhose, W. E., "Feedback Control for Suppression of Crane Payload Oscillation Using On-Off Commands," Proc. of the American Control Conference, pp. 1784-1789, 2006.
7. Singhose, W. and Seering, W., "Command Generation for Dynamic Systems," <http://www.Lulu.com>, 2007.
8. Khalid, A., Huey, J., Singhose, W., Lawrence, J., and Frakes, D., "Human Operator Performance Testing Using an Input-Shaped Bridge Crane," J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 128, No. 4, pp. 835-841, 2006.
9. Singhose, W., Porter, L., Kenison, M., and Kriikku,

- E., "Effects of Hoisting on the Input Shaping Control of Gantry Cranes," *Control Engineering Practice*, Vol. 8, No. 10, pp. 1159-1165, 2000.
10. Sorensen, K. L., Singhose, W., and Dickerson, S., "A Controller Enabling Precise Positioning and Sway Reduction in Bridge and Gantry Cranes," *Control Engineering Practice*, Vol. 15, No. 7, pp. 825-837, 2007.
 11. Vaughan, J. and Singhose, W., "Input Shapers for Reducing Overshoot in Human-operated Flexible Systems," *Proc. of the American Control Conference*, pp. 178-183, 2009.
 12. Kim, B. G. and Hong, S. W., "Input Shaper Design for Tower Crane in Consideration of Nonlinear Coupled Motions," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 26, No. 9, pp. 88-95, 2009.
 13. Garrido, S., Abderrahim, M., Giménez, A., Diez, R., and Balaguer, C., "Anti-Swinging Input Shaping Control of an Automatic Construction Crane," *IEEE Transaction on Automation Science and Engineering*, Vol. 5, No. 3, pp. 549-557, 2008.
 14. Masoud, Z. N. and Daqaq, M. F., "A Graphical Approach to Input-Shaping Control Design for Container Cranes With Hoist," *IEEE Control Systems Technology*, Vol. 14, No. 6, pp. 1070-1077, 2006.
 15. Sorensen, K. L., "A Combined Feedback and Command Shaping Controller for Improving Positioning and Reducing Cable Sway in Cranes," M.Sc. thesis, Department of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, 2005.