

타워크레인의 비선형 연성 운동을 고려한 입력성형기 설계

Input Shaper Design for Tower Crane in Consideration of Nonlinear Coupled Motions

김병규¹, 홍성욱^{2,✉}
Byung-Gyu Kim¹ and Seong-Wook Hong^{2,✉}

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

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

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

Manuscript received: 2009.4.13 / Accepted: 2009.6.9

Input shaping has been a very effective control method for reducing payload swing in industrial bridge and gantry cranes. However, conventional input shapers often degrade performance when applied to tower cranes because of the nonlinear coupled dynamics between rotational and radial motions in tower cranes. To alleviate this problem, a new input shaper for tower cranes is developed by means of dynamic modeling, analysis and optimization. This work investigates the tower crane dynamics along with parameters of the tower crane varied. A performance index for input shaper design is proposed so as to reduce the coupled residual vibration of a tower crane using only rotational motion of tower crane. The proposed new input shaper is verified to be effective through simulations and experiments.

Key Words: Tower Crane (타워크레인), Input Shaping (입력성형), Residual Vibration (잔류진동)

기호설명

ϕ = Angular vibration of payload in radial direction
 θ = Angular vibration of payload in tangential direction
 ψ = Slew angle
R = Trolley position from mast
L = Suspension length

1. 서론

산업용 크레인이나 항만용 크레인 등 많은 종류의 크레인들이 무거운 자재를 운송하기 위한 도구로 사용되고 있다. 그 중에서도 타워크레인은 건설현장 등에서 가장 널리 사용되고 있다.

대부분의 크레인 운영에 있어서의 문제점 중 하나는 목표지점 도달 후에 잔류진동이 발생하게

된다는 것이다. 따라서 원하는 목표지점까지 이송하는데 어려움이 있으며, 이송 후 위치 안정화 시간을 필요로 하게 되어 작업시간이 길어지게 된다. 뿐만 아니라 이송 중에도 안전성에 심각한 영향을 끼친다. 이러한 잔류진동을 줄여주기 위한 방법으로 입력성형기법(Input shaping)이 연구되고 있다.

입력성형기법은 지금까지 XY 스테이지(Stage)나, 삼차원 측정기(Coordinate measuring machine), 크레인 등 대부분의 이송 시스템에 대해 잔류진동을 억제하기 위한 효과적인 방법으로 사용되고 있다.¹⁻⁵ 하지만, 기존의 입력성형기(Input shaper)를 타워크레인에 적용하였을 경우, 회전 시 발생하게 되는 운동의 연성과 원심력으로 인해 반경방향과 접선방향으로의 잔류진동이 동시에 발생되어 입력성형기의 잔류진동 억제 능력이 현저히 떨어지게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구

에서는 타워크레인 에 대한 동적 모델링과 시뮬레이션 을 통해 타워크레인 구동 시에 발생하게 되는 진동 특성을 파악하고 이러한 잔류진동을 줄일 수 있는 새로운 입력성형기를 제안하였다. 또한, 임의 조건에 대응할 수 있는 일반적인 입력성형기 설계를 위하여 성능지수(Performance Index)를 도입하여 입력성형기 관련 주요 매개변수를 결정하였다. 마지막으로 제안된 입력성형기의 타당성을 실험을 통하여 검증하였다.

2. 타워크레인 모델링

2.1 대상 시스템

타워크레인 에 대한 개략도가 Fig. 1 에 나타나 있다. 트롤리(Trolley)는 지브(Jib)를 따라 반경 R 방향으로 이동하며, 지브는 기둥(Mast)의 맨 위쪽에 위치해 있으며, 기둥을 회전축으로 하여 ψ 방향으로 회전하게 된다. ψ 는 지브의 회전각(Slew angle)을, R 은 기둥으로부터 트롤리까지의 반경 위치를, L 은 트롤리부터 하중(Payload)의 확장 길이를 나타낸 것이다. 하중의 위치는 두 개의 구면좌표(Spherical coordinates) ϕ, θ 에 의해 나타내어지며, $(\phi, \theta) = 0$ 일 때, 하중이 케이블 길이가 L 인 곳에서 수직 하방으로 매달려 있게 된다.

Fig. 2 는 본 연구를 위해 제작된 실험 장치를 보여주고 있다. Fig. 3 은 실험에 사용된 전체 시스템의 개념도를 나타내었다. 지브(Jib)를 회전하기 위한 서보모터(Servo motor)는 기둥에 장착되어 있으며 하중으로 적당량의 질량체를 와이어 끝에 부착하였다. 타워크레인은 이동이 가능한 정반 위에 고정되어 있으며, 모션 컨트롤러는 DSP 보드를 사용하였다. 또한, 모션에 관련된 데이터 및 모든 제어변수(속도, 가속도)를 실시간으로 수정할 수 있도록 소프트웨어를 개발하였다. 잔류진동의 크기를 측정하기 위하여 타워크레인 상부에 카메라를 부착하였다.

2.2 시스템 모델링

케이블 길이에 대한 하중의 뒤틀림을 무시하기 위해 하중의 질량이 한 점에 모여 있다고 가정하면, 하중의 흔들림 각도 θ, ϕ 에 관한 운동방정식은 식(1), (2)와 같이 나타낼 수 있다.^{6,7}

$$L\ddot{\theta} \cos \phi - 2L\dot{\phi}\dot{\theta} \sin \phi + g \sin \theta = R\dot{\psi} \cos \theta + 2L\dot{\psi}\dot{\phi} \cos \phi \cos \theta + 2R\dot{\psi} \cos \theta + L\dot{\psi} \sin \phi \cos \theta + L\dot{\psi}^2 \sin \theta \cos \phi \cos \theta \quad (1)$$

$$L\ddot{\phi} + L\dot{\theta}^2 \cos \phi \sin \phi + g \sin \phi \cos \theta = -\ddot{R} \cos \phi + R\dot{\psi}^2 \cos \phi - R\dot{\psi} \sin \phi \sin \theta - 2R\dot{\psi} \sin \phi \sin \theta - 2L\dot{\psi}\dot{\theta} \cos^2 \phi \cos \theta - L\dot{\psi} \sin \theta + L\dot{\psi}^2 \sin \phi \cos^2 \theta \cos \phi \quad (2)$$

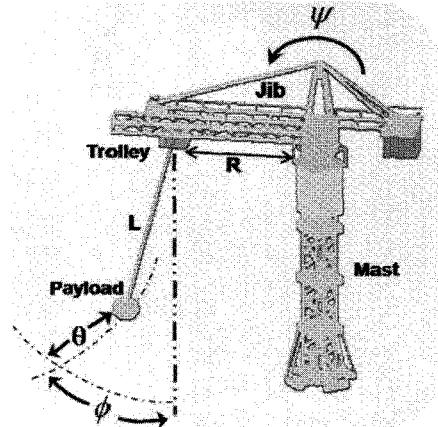


Fig. 1 Schematic diagram for a tower crane

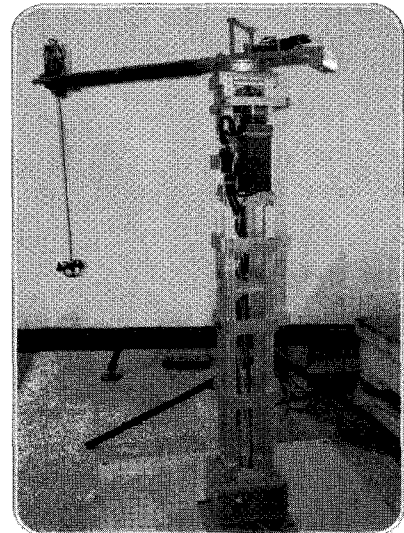


Fig. 2 Experimental miniature tower crane

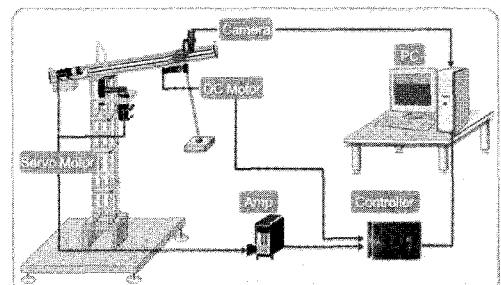


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental setup

또한 XY 평면에서의 하중 위치(x_p, y_p)는 다음의 식(3), (4)로부터 구할 수 있다.⁸

$$x_p = R \cos \psi + L \sin \phi \cos \psi + L \sin \theta \cos \phi \sin \psi \quad (3)$$

$$y_p = R \sin \psi + L \sin \phi \sin \psi - L \sin \theta \cos \phi \cos \psi \quad (4)$$

본 연구의 주된 목적은 타워크레인의 회전운동에 의한 두 방향(반경방향, 접선방향)의 연성잔류진동을 회전운동만의 입력성형에 의해 제거하는 것이다. 또한 트롤리의 반경방향 운동에 의한 진동은 단순 평면진자(Pendulum) 운동으로써, 입력성형기법에 있어 광범위하게 연구되어 왔기 때문에, 본 연구에서는 고려하지 않았다.⁶⁻⁸ 기동으로부터 트롤리까지의 거리 R 을 상수, 즉 $\dot{R} = \ddot{R} = 0$ 으로 두고 식(1), (2)를 단순화하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L\ddot{\phi} + L\dot{\theta}^2 \cos\phi \sin\phi + g \sin\phi \cos\theta = R\dot{\psi}^2 \cos\phi - R\ddot{\psi} \sin\phi \sin\theta - 2L\dot{\psi}\dot{\theta} \cos^2\phi \cos\theta - L\ddot{\psi} \sin\theta + L\dot{\psi}^2 \sin\phi \cos^2\theta \cos\phi \quad (5)$$

$$L\ddot{\theta} \cos\phi - 2L\dot{\phi}\dot{\theta} \sin\phi + g \sin\theta = R\dot{\psi} \cos\theta + 2L\dot{\psi}\dot{\phi} \cos\phi \cos\theta + L\ddot{\psi} \sin\phi \cos\theta + L\dot{\psi}^2 \sin\theta \cos\phi \cos\theta \quad (6)$$

3. 타워크레인을 위한 입력성형기

3.1 개선된 입력성형기법

본 논문에서는 타워크레인 회전 시 발생하게 되는 운동의 연성과 원심력, 그리고 On-Off 방식의 운전조건 등을 고려하여 UMZV(Unity Magnitude Zero Vibration)⁴ 입력성형기를 개선한 입력성형기법(IUMZV; Improved unity magnitude zero vibration input shaping)을 제안하였다.

Fig. 4 에는 본 연구에서 제안한 입력성형기의 형태가 나타나 있다. 입력성형기는 다섯개의 단위 크기 임펄스로 구성되며, 각 임펄스간의 시간간격을 $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, \Delta t_4$ 로 두었다. 기준입력의 가속 구간과 감속구간에서 입력성형기와 컨볼루션(Convolution)을 수행하여 성형된 입력을 얻을 수 있다. 반경방향과 접선방향의 잔류진동을 동시에

없애기 위해 설정되어야 할 임펄스 입력의 시기는 시스템의 특성과 운전조건에 따라 달라지게 된다. 따라서 잔류진동의 크기가 최소가 되도록 만들어 주는 임펄스 시간간격 $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, \Delta t_4$ 을 가속 구간과 감속구간 각각에 대해 결정할 필요가 있다. 본 연구에서는 이와 같은 과정을 시뮬레이션을 통해 수행하였다.

이렇게 생성된 입력성형기를 가지고 기준입력의 가속구간과 감속구간에 대해 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 인자들은 Table 1 과 같다.

Fig. 5 는 타워크레인 회전 운동에 대해 입력성형기법을 적용하기 전과 적용 후의 하중의 위치와 트롤리의 위치를 XY 평면상에 나타낸 것이다. 또한, Fig. 6 은 입력성형기법을 적용하기 전과 기존의 입력성형기를 적용한 경우, 그리고 제안된 입력성형기를 적용한 경우의 잔류진동 결과를 시뮬레이션을 통해 보여주고 있다. 결과에서 확인할 수 있는 바와 같이, 입력성형을 하지 않은 경우 타워크레인의 출발과 함께 진동이 발생하고 개선된 입력성형기법이 회전운동에 대한 제어만으로 두 방향의 잔류진동을 효과적으로 제거함을 알 수 있다.

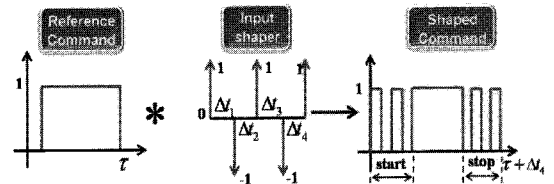


Fig. 4 Proposed input shaper

Table1 Simulation parameters

Parameter	Symbol	Value
Suspension Length	L	0.5 m
Trolley Position	R	0.43 m
Slew Velocity	$\dot{\psi}$	1.3 rad/s
Slew Acceleration	$\ddot{\psi}$	100 rad/s ²

3.2 실험결과

시뮬레이션을 이용하여 찾은 임펄스 시간간격 $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, \Delta t_4$ 를 검증하기 위하여 실험을 실시하였다. 제작된 실험장비에 계산을 통해 얻어진 시간간격을 갖는 입력성형기를 적용하고 그 결과를 확인하였다.

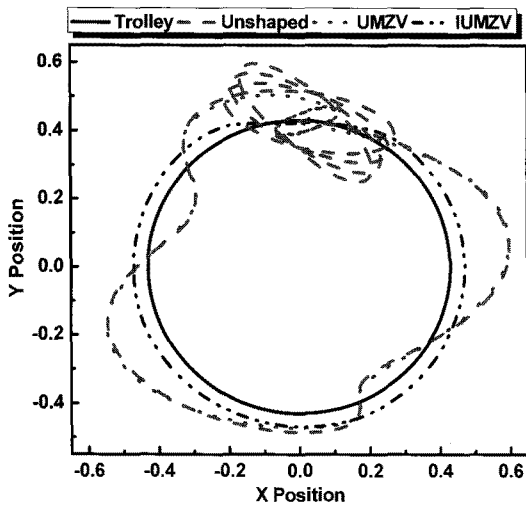
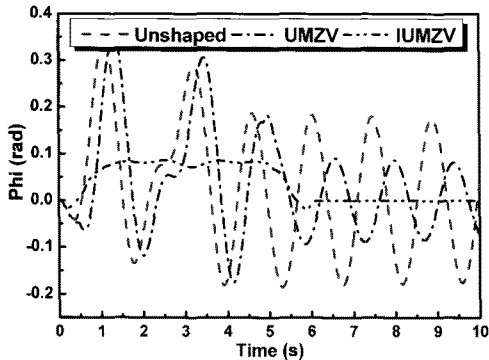
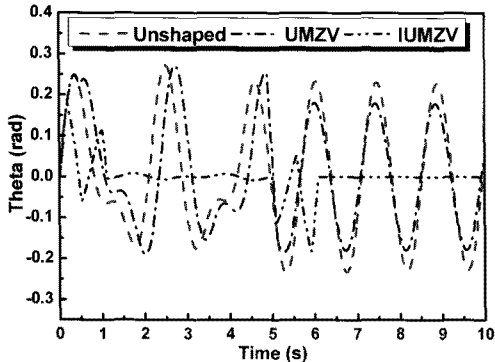


Fig. 5 Simulated payload and trolley trajectories with and without input shaping



(a) Angular vibration (phi)



(b) Angular vibration (theta)

Fig. 6 Comparison of the simulated response for unshaped command and the commands shaped with the UMZV and proposed shapers

Fig. 7 은 타워크레인이 정지한 후 정지 위치의 수직 위쪽에서 카메라를 이용하여 촬영한 하중의 중심 위치를 XY 평면상에 도시한 것이다. 하중의 이동 궤적에서 볼 수 있듯이 입력성형기법을 적용한 후에 하중 흔들림의 크기가 확연하게 줄어든 것을 알 수가 있다. Fig. 8 은 카메라에서 얻어진 실제 화상을 연속해서 보여주고 있는데, 좌측은 입력성형미실시 경우이고, 우측은 제안된 입력성형을 실시했을 때이다.

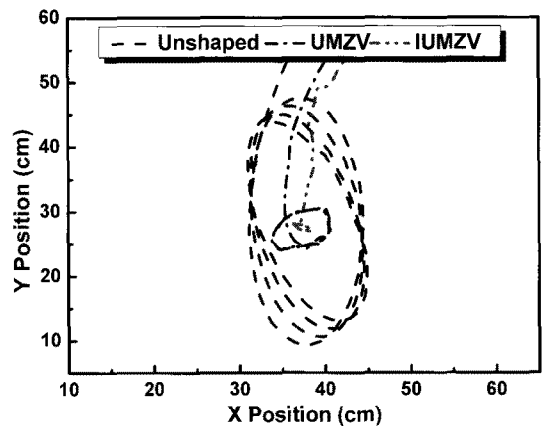


Fig. 7 Measured payload trajectories for unshaped and shaped commands

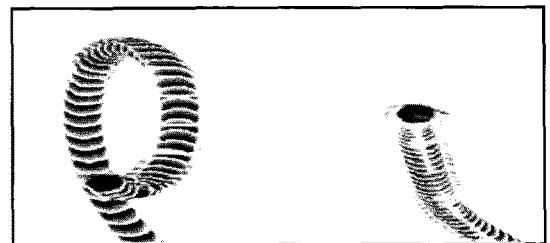


Fig. 8 Comparison of the actual payload trajectories for unshaped (left) and shaped (right) cases

4. 개선된 입력성형기의 설계

앞절에서는 특정한 조건에서 제안된 입력성형기의 가능성을 시뮬레이션과 실험으로 확인하였다. 즉, Fig. 7 에서 보여준 결과는 Table 1 에서 제시한 인자들에 한해서 적용가능한 경우로써, 일반적으로 적용하기 위해서는 시스템 매개변수 변화에 따른 입력성형기 매개변수 결정이 필요하다. 여기서는 일반적인 조건에서 활용이 가능한 입력성형기

를 결정하기 위해 타워크레인의 주요 매개변수를 변화시키면서 시간변수를 최적화하였다.

조건에 적합한 입력성형기를 결정하기 위해 식(7)과 같은 잔류진동절대치를 정의하였다.

$$J = J_{\phi} + J_{\theta} \quad (7)$$

여기서

$$J_{\phi} = \sqrt{\frac{1}{(t_f - t_s)} \int_{t_s}^{t_f} \phi^2 dt} \quad , \quad J_{\theta} = \sqrt{\frac{1}{(t_f - t_s)} \int_{t_s}^{t_f} \theta^2 dt} \quad (8)$$

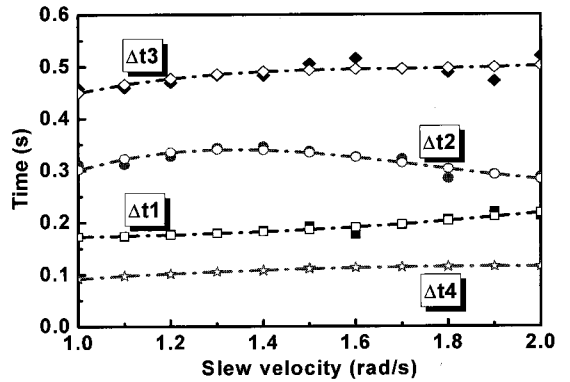
그리고 t_s 는 최종 임펄스 인가 시간을 나타내며, t_f 는 최종 입력 t_s 인가 후 응답을 얻은 시간을 나타낸다. 본 시뮬레이션에서는 t_s 인가 후 5 초간 응답을 구하도록 설정하였다.

4.1 회전속도에 따른 변화

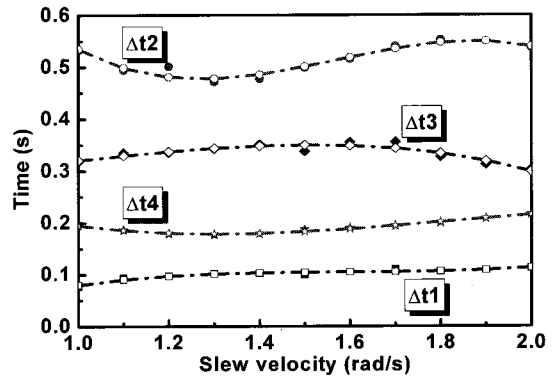
Table 1 에서 제시한 인자들 중 트롤리위치(R), 트롤리부터 하중까지 길이(L), 가속도를 고정하고 속도를 1 rad/s 부터 2 rad/s 까지 0.1 rad/s 씩 증가시키며 각 포인트 별로 최적화된 임펄스 시간간격 Δt_1 , Δt_2 , Δt_3 , Δt_4 을 구하기 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 가속구간과 감속구간 각각에 대한 최적화 결과를 Fig. 9 에 나타내었다.

Fig. 10 은 Fig. 9 를 얻는 과정에서 얻어진 최소 잔류진동 결과를 회전속도에 따른 변화에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 반경방향 및 접선방향 모두에 대해 작은 잔류진동 결과를 얻을 수가 있다. 회전속도 증가에 따라 잔류진동의 값이 추세적으로 약간씩 증가하고는 있으나 전체적으로 매우 적은 양으로서, 입력성형을 적용했을 경우 잔류진동 수준을 충분히 낮게 유지할 수 있을 것을 예상할 수 있다.

한편, Fig. 11 은 계산을 통해 얻어진 입력성형기를 몇 개의 회전속도에서 실제 실험장치에 적용한 실험결과를 도시하였다. 입력성형을 하지 않은 경우에 비해 월등히 진동이 감소함을 볼 수 있다. 그러나 속도가 증가함에 따라 비선형성의 증가로 인해 잔류진동 억제 능력이 점차 떨어지는 것을 확인할 수 있다.



(a) Acceleration period



(b) Deceleration period

Fig. 9 Optimized time spacings as the slew velocity increases

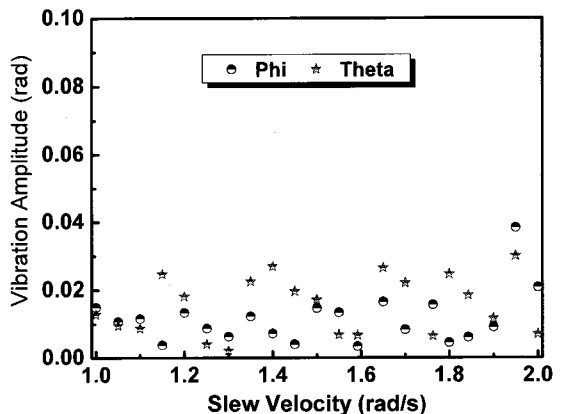
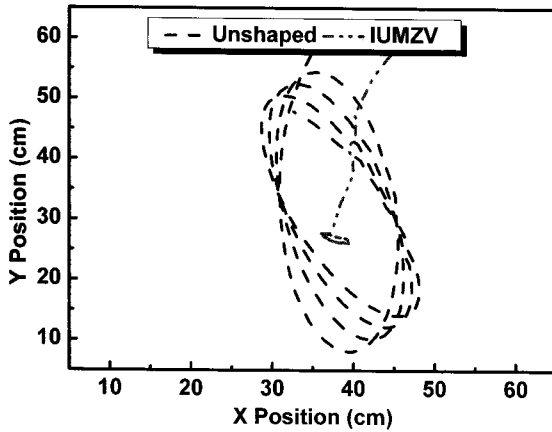
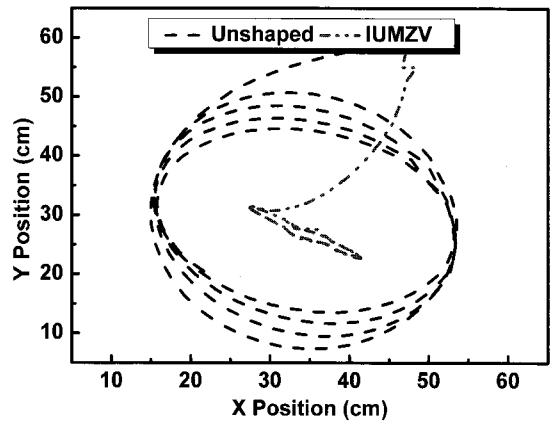


Fig. 10 Simulated residual vibration amplitude index as the slew velocity increases

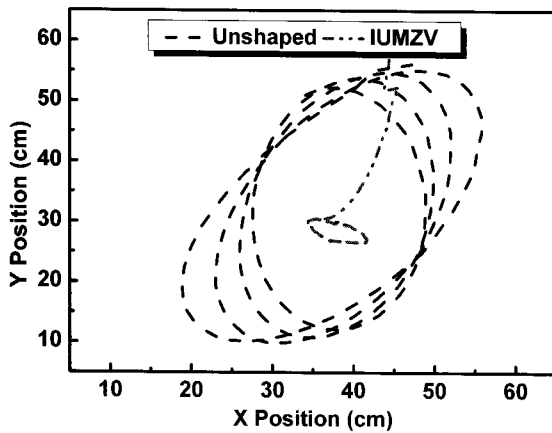


(a) 1.25 rad/s

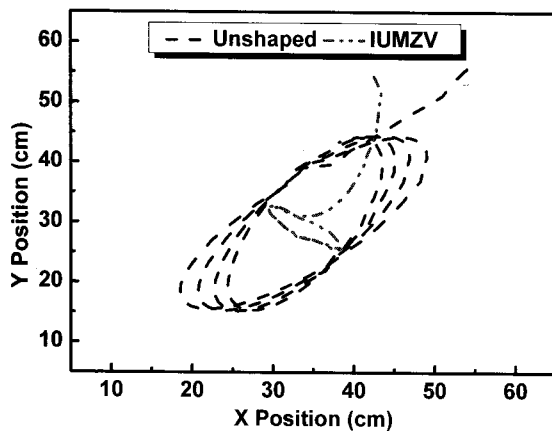


(d) 1.85 rad/s

Fig. 11 Measured payload trajectories for unshaped and shaped commands



(b) 1.6 rad/s

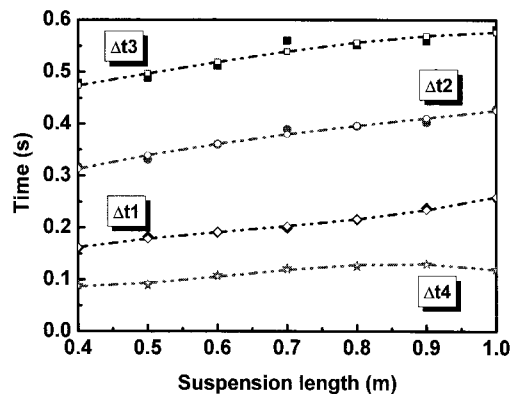


(c) 1.75 rad/s

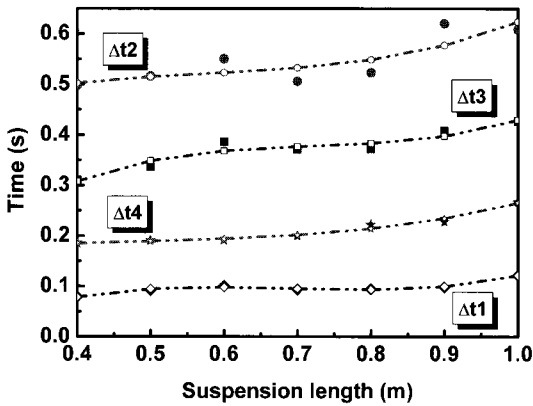
4.2 호이스트 길이에 따른 변화

호이스트의 길이변화에 따른 대응이 가능하도록 입력성형기의 시간변수를 결정하였다. 호이스트 길이는 고유진동수를 변화시키게 되므로 매우 중요하다. 이를 위해 Table 1 에서 제시한 인자들 중 트롤리위치(R)와 속도($\dot{\psi}$)를 1.0rad/s 으로 고정하고, 트롤리부터 하중까지 길이(L)만을 0.4m 부터 1.0m 까지 0.1m 씩 증가시키며 각 포인트 별로 최적화된 임펄스 시간간격 $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, \Delta t_4$ 을 구하기 위한 시뮬레이션을 수행하였다.

가속구간과 감속구간 각각에 대한 최적화 결과를 Fig. 12 에 나타내었다. 호이스트가 길어짐에 따라 고유진동수가 증가하기 때문에 전체적으로 시간간격 변수들도 길어지는 추세를 보이고 있다.



(a) Acceleration period



(b) Deceleration period

Fig. 12 Optimized time spacings with the suspension length increased

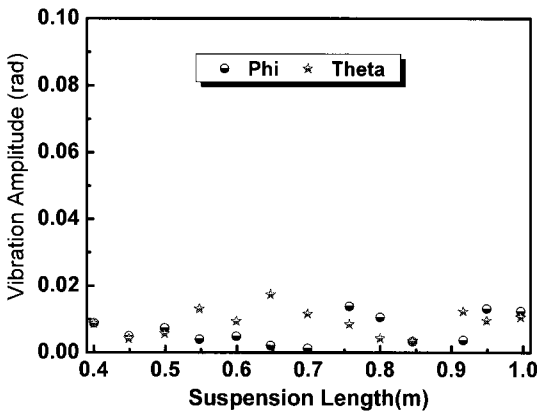
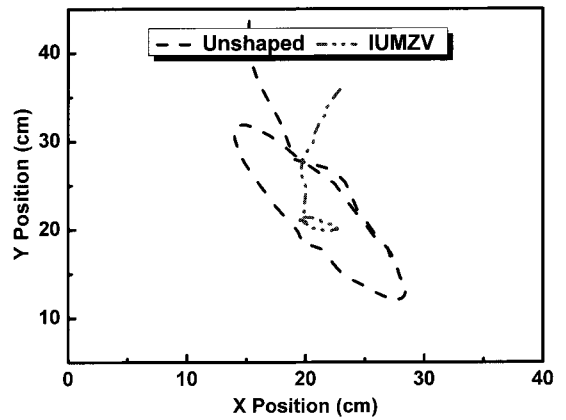
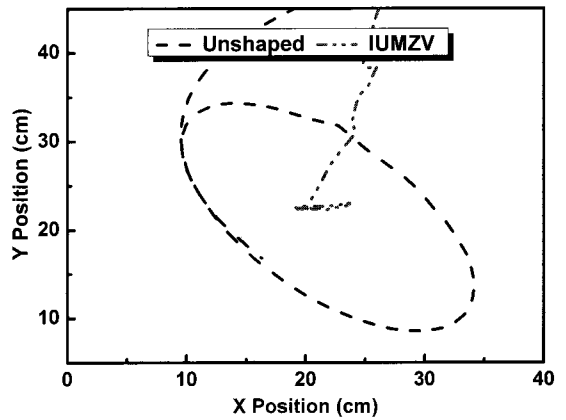


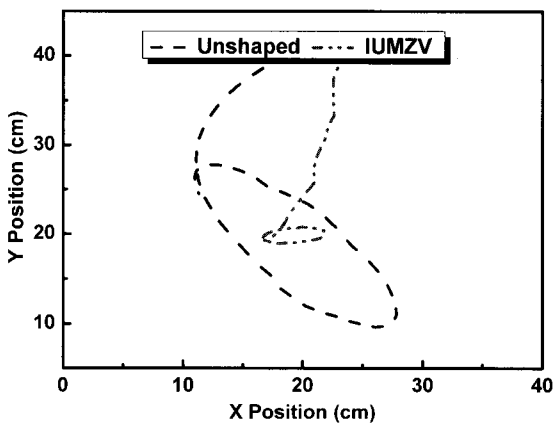
Fig. 13 Residual vibration amplitude with the suspension length(L) increased



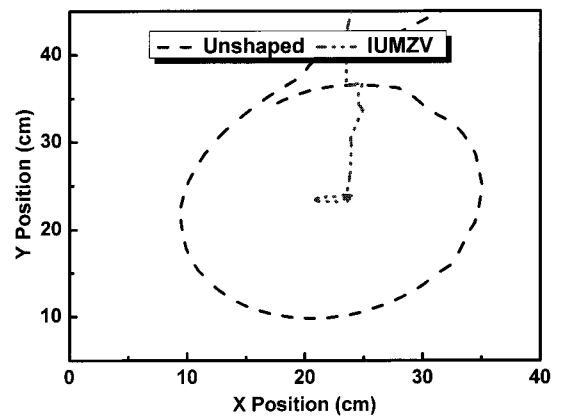
(b) 0.6m



(c) 0.7m



(a) 0.4m



(d) 0.8m

Fig. 14 Measured payload trajectories for unshaped and shaped commands with the suspension length varied

Fig. 13 은 식(7)로 표현된 잔류진동 절대치를 호이스트 길이변화에 따라 나타낸 것이다. 계산결과에서 볼 수 있는 바와 같이 두 방향 진동 모두 매우 적은 값을 갖게 된다. 한편, Fig. 14 에는 이와 같이 시뮬레이션을 통하여 얻은 입력성형기를 앞서 회전속도에 대한 실험에서와 마찬가지로 실제 실험장비에 적용하여 얻어진 결과를 도시한 것이다. 실험 결과로부터 입력성형기법 적용 전에 비해 월등히 좋은 결과를 나타내는 것을 확인할 수가 있다.

5. 결론

본 연구에서는 타워크레인의 회전 운동시에 발생하는 잔류진동 특성을 알아 보고 잔류진동을 효과적으로 억제하기 위한 새로운 입력성형기를 제안하였다. 입력성형기 형태를 단위크기의 5 개 임펄스로 구성된다고 가정하고, 시뮬레이션을 통해 잔류진동의 크기를 최소화할 수 있는 임펄스 시간간격을 구하였다. 가속구간과 감속구간에 대해 각기 다른 임펄스 시간간격을 가지는 입력성형기를 적용하였다. 또한, 시뮬레이션에서 구한 임펄스 시간간격을 실험장비에 적용하여 타워크레인 회전운동 제어만으로 두 방향의 잔류진동을 억제하는데 효과가 있음을 확인하였다. 타워크레인 회전속도에 대한 보다 일반적인 입력성형기를 설계하기 위해 최적화 된 임펄스 시간간격을 얻어 임의의 회전속도, 호이스트 길이에 대해서도 대응이 가능하도록 하였다.

참고문헌

1. Hong, S. W., Park, S. W. and Singhose, W. E., "Input Shaping for Vibration Reduction in Precise Positioning Systems," J. of the KSPE, Vol. 25, No. 4, pp. 26-31, 2008.
2. Park, S. W., Hong, S. W., Choi, H. S. and Singhose, W., "A Study on Dynamic Performance of Precise XY Stages Using Real-Time Input Shaping," Proceedings of the 8th ISMTII, pp. 187-190, 2007.
3. 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.
4. Singhose, W. and Seering, W., "Command

Generation for Dynamic Systems," Lulu.com, pp. 1-9, 2007.

5. Park, S. W., Hong, S. W., Choi, H. S. and Singhose, W. E., "Discretization Effects of Real Time Input Shaping in Residual Vibration Reduction," Trans. KSMTE, Vol. 16, No. 4, pp. 71-78, 2007.
6. Blackburn, D., "Command Shaping for Vibration Reduction in Nonlinear Cabled Systems," M. S. Thesis, School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, 2006.
7. Blackburn, D., Singhose, W., Kitchen, J., Patrangenaru, V. and Lawrence, J., "Advanced Command Shaping Algorithm for Nonlinear Tower Crane Dynamics," Proceedings of the 8th International Conference on Motion and Vibration Control, pp. 860-865, 2006.
8. Lawrence, J., "Crane Oscillation Control: Nonlinear Elements and Educational Improvements," Ph. D. Thesis, School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, 2006.