

타워 크레인 잔류진동 억제에 관한 연구

A Study to Reduce Residual Vibration of Tower Crane

*김병규¹, 박상원¹, #홍성욱²

*B. G. Kim¹, S. W. Park¹, #S. W. Hong(swhong@kumoh.ac.kr)²

¹ 금오공과대학교 기전공학과, ² 금오공과대학교 기계공학과

Key words : Input Shaping, Tower Crane

1. 서론

산업용 크레인이나 항만용 크레인 등 많은 종류의 크레인들이 무거운 자재를 운송하기 위한 수단으로 사용되고 있다. 그 중에서도 가장 흔하게 사용되는 타입으로 타워 크레인을 들 수 있다. Fig. 1에 보여지듯이 타워 크레인은 초고층 빌딩이나 아파트 건설현장에서 주로 사용되고 있다. 타워 크레인이 가진 문제점으로 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 안전성까지 영향을 끼친다. 이러한 잔류진동을 줄여주기 위한 알고리즘으로 입력성형기법(Input Shaping)이 연구되고 있다.

현재 XY 스테이지(Stage)나, 삼차원 측정기(Coordinate Measuring Machine)등 대부분의 이송 시스템에 대해 입력성형기법은 시스템에 악영향을 끼치는 잔류진동을 억제하기 위한 효과적인 방법으로 사용되고 있다.¹⁻³ 하지만, 기존의 입력성형기(Input Shaper)를 타워 크레인에 적용하였을 경우, 회전 시 발생하게 되는 운동의 연성과 원심력으로 인해 한방향의 움직임에도 불구하고 두 방향, 즉 반경방향과 접선방향으로의 잔류진동이 발생되어 기존 입력성형기의 잔류진동 억제 수행능력이 현저히 떨어지게 된다. 본 연구에서는 시뮬레이션을 통해 타워 크레인 구동 시에 발생하게 되는 진동 특성을 파악하고 이러한 잔류진동을 줄일 수 있는 새로운 입력성형기에 대해 검토하였다.

2. 모델링

2.1 운동방정식

타워 크레인에 대한 개략도가 Fig. 2에 나타나있다. 트롤리(Trolley)는 지브(Jib)를 따라 반경 R 방향으로 이동하며, 지브는 기둥(Mast)의 맨 위쪽에 위치해 있으며, 기둥을 회전축으로 하여 s-방향으로 회전하게 된다. s는 지브의 회전 혹은 흔들림 각을, R은 트롤리의 반경 위치를 L은 하중(Payload)의 확장 길이를 나타낸 것이다. 하중의 위치는 두 개의 구면좌표계(Spherical coordinates) ϕ, θ 에 의해 나타내어지며, $(\phi, \theta) = 0$ 일 때, 하중이 케이블 길이가 L인 곳에서 아래로 수직으로 매달려 있게 된다. 케이블 길이에 대한 하중의 뒤틀림을 무시하기 위해 하중의 질량이 한 점에 모여 있다고 가정하면, 하중의 흔들림 각도 ϕ, θ 에 관한 운동방정식은 식(1), (2)과 같이 나타내어진다.⁴

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

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

또한 XY 평면에 대한 하중의 위치는 식 (3), (4)로부터 구할 수 있다.⁵



Fig. 1 Tower crane at the construction site

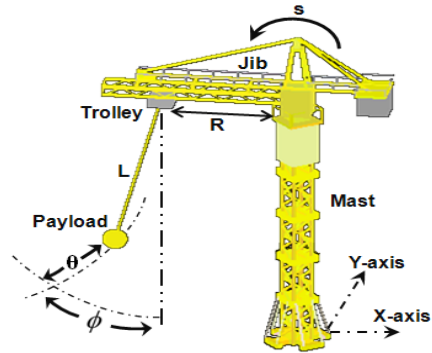


Fig. 2 Tower crane schematic

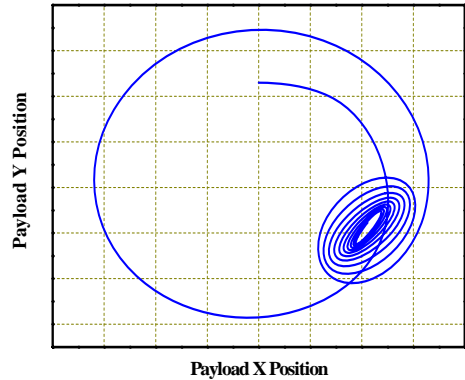


Fig. 3 Payload trajectory without input shaping

$$x_{payload} = R \cos(s) + L \sin(\phi) \cos(s) + L \sin(\theta) \cos(\phi) \sin(s) \quad (3)$$

$$y_{payload} = R \sin(s) + L \sin(\phi) \sin(s) - L \sin(\theta) \cos(\phi) \cos(s) \quad (4)$$

2.2 회전운동에 의한 운동방정식

트롤리에 대한 반경방향 운동은 평면 진자(Pendulum) 운동으로써, 입력성형기법에 있어 광범위하게 연구되어 왔기 때문에, 본 연구에서는 고려되지 않았다. 기둥으로부터 트롤리까지의 거리 R을 상수, 즉 $\dot{R} = \ddot{R} = 0$ 으로 두면, 식 (1), (2)를 식 (5), (6)과 같이 나타낼 수 있다.

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

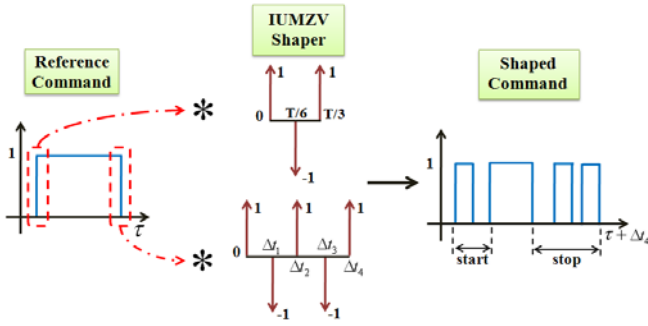


Fig. 4 IUMZV Input shaping

Table 1. Simulation parameter

Parameter	Symbol	Value
Suspension Length	L	0.36 m
Trolley Position	R	1 m
Slew Velocity	\dot{s}	1 rad/s
Slew Acceleration	\ddot{s}	10 rad/s ²

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

또한, 실제 타워 크레인 구동 시스템에서의 감쇠를 고려, 선형 점성 감쇠를 모델에 추가하여 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 3에 타워 크레인의 회전운동에 대해 입력성형기법 적용 전의 입력에 대한 하중의 위치를 XY평면에 나타내었다.

3. 입력성형 적용 시뮬레이션

본 논문에서는 타워 크레인의 회전운동 시 원심력과 운동연성으로 인하여 생성되는 반경방향과 접선방향의 잔류진동을 제거하기 위하여 UMZV(Unity Magnitude Zero Vibration) 성형기²를 기본으로 하는 개선된 입력성형기법(IUMZV: Improved UMZV)을 제안하였다.

회전운동에 대한 제어만으로 두 방향의 잔류진동을 모두 제거해 주기 위해서는 반경방향의 잔류진동과 접선방향의 잔류진동을 순차적으로 제거해 주어야 한다. 출발 시에는 회전속도가 낮으므로 UMZV를 적용하여 진동발생을 극소화 할 수 있다. Fig. 4의 입력성형된 프로파일에서의 정지명령 중 첫 번째 입력에 의해 반경방향의 잔류진동을 제거할 수가 있다. 그리고 다음 입력에 의해 접선방향의 잔류진동을 제거할 수 있다.

IUMZV를 사용하여 얻은 최종 명령 프로파일을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션에 사용된 인자들은 Table 1과 같다. Fig. 4에 나타나 있는 것과 같이 기준입력의 가속 구간에서는 기존의 UMZV 성형기를 사용하여 각각 T/6, T/3간격으로 단위크기의 임펄스와 컨볼루션(Convolution)을 수행하고, 감속 구간에서는 각각 $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, \Delta t_4$ 만큼의 시간간격으로 이루어져 있는 동일한 크기의 임펄스와 컨볼루션을 하는 것이다. 여기서 반경방향의 잔류진동을 없애 주기 위해 설정 되어야 할 입력의 시기는 시스템의 특성과 운전조건에 따라 달라지는데, 여기서는 정지명령 후 한 주기(T)가 지난 시점이다. 또한, 접선방향의 잔류진동을 없애 주기 위한 입력의 시기는 선행하는 입력이 끝나고 대략 T/5가 지난 시점이다.

Fig. 5는 θ, ϕ 의 방향을 나타낸다. Fig. 6은 각각 개선된 입력성형기법을 적용하기 전과 적용 후의 하중의 반경방향 ϕ 에 대한 잔류진동 결과와, 접선 방향 θ 에 대한 결과를 보여주고 있다. Fig. 5의 시뮬레이션 결과로부터 개선된 입력성형기법이 회전운동에 대한 제어만으로 두 방향의 잔류진동을 효과적으로

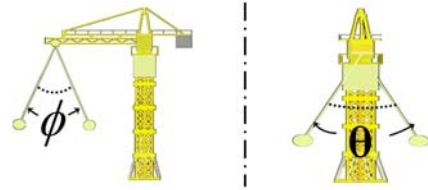


Fig. 5 Direction of phi(φ) and theta(θ)

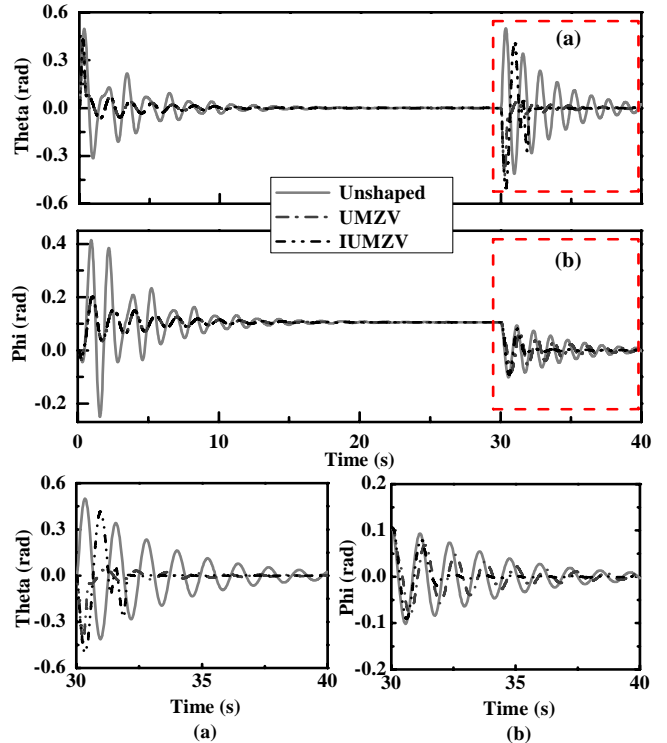


Fig. 6 Residual vibration compared to unshaped motion

제거함을 알 수 있다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 타워 크레인의 회전운동 시에 발생하는 잔류진동 특성을 알아보고, 잔류진동을 억제하기 위한 새로운 입력성형기 설계 방법에 대해 연구하였다. 이를 위해 기존 UMZV 성형기를 기본으로 기준입력의 가속 구간과 감속 구간에서 각각 다른 입력성형기를 적용하여 본 시스템에 최적화된 입력성형기를 개발하였으며, 반경방향과 접선방향에 대한 잔류진동을 회전운동 제어만으로 억제하는데 효과가 있음을 확인하였다.

참고문헌

1. Park, S. W., Hong, S. W., Singhose, W. E. and Seo, Y. G., "Evaluation and Improvement of Dynamic Characteristics of 3-axis Gantry-type Stage," Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, 2006.
2. Singhose, W. E. and Seering, W., Command Generation for Dynamic Systems, Lulu.com, 2007.
3. Park, S. W., Hong, S. W., Choi, H. S. and Singhose, W. E., "Discretization Effects of Real Time Input Shaping in Residual Vibration Reduction," Transection. of KSMTE, 2007, Vol 16, No.4, pp.71~78
4. Blackburn, D. F., Singhose, W. E., Kitchen, J., Patrangenu, V., Lawrence, J., "Advanced Command Shaping Algorithm for Nonlinear Tower Crane Dynamics," The 8th International Conference on Motion and Vibration Control, 2006.
5. Lawrence, J., "Crane Oscillation Control: Nonlinear Elements and Educational Improvements," PhD. Thesis, Georgia Institute of Technology, 2006