

컨테이너 크레인의 흔들림 억제 제어에 관한 연구

백운보*

(논문접수일 2010. 11. 14, 수정일 2011. 08. 17, 심사완료일 2011. 11. 08)

A Study on the Sway Suppression Control of Container Cranes

Woon-Bo Baek*

Abstract

In this paper, we consider the sway suppression control problem for container cranes with load hoisting. The proposed control law improves the positioning accuracy but also the sway suppression through fast stabilization of the under-actuated sway dynamics, which is based on a class of feedback linearizing control incorporated with an additional control including the sway angle and its rate as well as positioning errors and their rates. For the design of the additional control, a variable structure control with the proper sway damping and simple switching action is employed, thus preventing excessive overshoots of the trolley travelling and effectively suppressing the residual sway of container arrived at the target position. Simulation results are provided to show effectiveness of the proposed controller in the presence of such uncertainties as winds and the variation of payload weights.

Key Words : Container cranes(컨테이너 크레인), Sway suppression(흔들림 억제), Feedback linearizing(피드백 선형화)

1. 서론

컨테이너 크레인을 사용하여 컨테이너를 선박과 항만에 얼마나 신속하고 안전하게 선적 또는 하역하느냐에 따라 하역장비의 성능이 좌우된다. 컨테이너를 빨리 이송 시키고자 할 때 가장 큰 문제는 트롤리(trolley)의 주행과 권상(hoist) 구동이 목표지점에 도달했을 때 트롤리에 지지된 로우프 끝에 매달린 컨테이너의 잔류 흔들림(sway)으로 인해 다음 작업이 신속히 이루어지기 어렵다는 데 있다⁽¹⁾. 이는 크레인이 트롤리와 권상의 2개 구동으로 트롤리와 권상 위치, 그리고 흔들림 각의 3 자유도 시스템을 제어하는, 즉 부족 구동(under-actuated) 시스템이기 때문이다. 그리고 강한 비선형성과 바람 등의 외란도 극복해야 하며, 또한 고속 주행으로 발생할 수 있는 큰 오버슈트를

수반하지 않고 목표위치에 도달하게 함으로써 불필요한 트롤리의 전진 및 후진을 억제하여 운전자의 피로를 경감시키는 것이 필요하다.

크레인 제어에 관한 연구는 선형제어, 퍼지제어 방법, 그리고 비선형제어를 이용하는 방법으로 크게 나누어 볼 수 있다. 선형제어 방법에서는 트롤리 및 권상운동과 흔들림의 간섭을 선형화하여 제어를 설계한 후 이를 추정하여 보상하거나 외란으로 취급하여 이에 강인한 제어를 설계하는 방법이 주로 연구되었다. 퍼지제어를 이용한 방법^(2,3)은 전문가의 지식을 활용하거나 흔들림 억제를 위한 퍼지 보상을 결합하는 방법 등이 연구되었다. 비선형 제어 방법으로는 일반화된 상태공간 모델에서 적응 및 가변구조 제어^(4,5) 및 이들과 퍼지제어를 결합한 방법⁽⁶⁻⁸⁾, 그리고 피드백 선형화(feedback linearization)를 이용

* 동의대학교 메카트로닉스공학과 (wbbaek@deu.ac.kr)
주소: 614-714 부산시 부산진구 엄광로 995

하는 방법^(9,10) 등이 연구되었다. 적응 및 가변구조 제어 방법에서는 일정 권상 속도의 경우에 점근적 안정성을 보였거나, 임의 권상 속도를 갖는 경우는 제약된 안정성을 보였으나, 피드백 선형화 방법⁽⁹⁾에서는 임의 권상 속도를 갖는 경우 내부 동역학의 안정성을 보였다. 그리고 다른 피드백 선형화 방법⁽¹⁰⁾에서는 지수함수를 포함한 시변 경계층(time-varying boundary layer)을 사용하여 에너지기반 함수 방법으로 점근적 안정성을 보였다.

본 연구에서는 시변 경계층의 도입 없이 단순 스위칭함수를 사용하는 가변구조 제어 방법으로 점근적 안정성을 보이고, 제시된 방법에 의해 큰 오버슈트나 잔류 흔들림 없이 목표 지점에 도달할 수 있음을 보인다. 본 논문의 구성을 다음과 같다. 2 절에서는 크레인 모델을 유도하고, 3 절에서는 피드백 선형화 제어가 적용된 흔들림 다이내믹스에 기초하여 부가되는 가변구조 제어기 설계 방법을 제시한다. 4 절에서는 초기 흔들림 각을 적용하고, 컨테이너 무게 값이 변동되거나 강풍이 존재하는 경우에 대한 시뮬레이션 비교 결과를 통해 제시된 방법의 우수성을 보이고, 5 절에서 결론을 맺는다.

2. 시스템 모델링

본 연구에 사용된 크레인 모델은 Fig. 1에 도시하였으며, Euler- Lagrange 방법으로 유도된 운동방정식은 다음과 같이 정리된다⁽¹⁰⁾.

$$\begin{aligned} (m_t + m_p)\ddot{x} + m_p \sin\theta \ddot{l} + m_p l \cos\theta \ddot{\theta} \\ 2m_p \cos\theta \dot{l}\dot{\theta} + m_p l \sin\theta \dot{\theta}^2 = f_x \end{aligned} \quad (1a)$$

$$\begin{aligned} m_p \sin\theta \ddot{x} + (m_p + m_t)\ddot{l} - m_p l \dot{\theta}^2 \\ - m_p g \cos\theta = f_l \end{aligned} \quad (1b)$$

$$\begin{aligned} m_p l \cos\theta \ddot{x} + (m_p l^2 + I)\ddot{\theta} + 2m_p l \dot{l}\dot{\theta} \\ + m_p g l \sin\theta = 0 \end{aligned} \quad (1c)$$

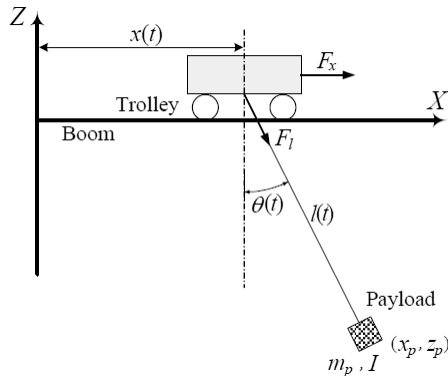


Fig. 1 Sway of the container by trolley movement

여기서, x, l 는 각각 트롤리 및 권상 로프의 위치, θ 는 컨테이너의 흔들림 각으로 $|\theta| < \pi/2$ 이다. f_x, f_l 은 각각 트롤리와 권상의 구동제어 입력이며, m_t, m_p, m_p 는 각각 트롤리 및 권상 시스템, 컨테이너의 무게이며, I 는 컨테이너의 관성모멘트, 그리고 g 는 중력가속도이다.

그리고 식 (1c)를 $\ddot{\theta}$ 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$\ddot{\theta} = -a(\cos\theta \ddot{x} + g \sin\theta + 2\dot{l}\dot{\theta}) \quad (1d)$$

$$\text{여기서, } a = \frac{m_p l}{m_p l^2 + I} > 0, \cos\theta > 0 \quad (1e)$$

식 (1d)를 식 (1a)에 적용하고, 트롤리 및 권상 구동의 위치를 $r = [x, l]^T$, 구동제어 입력을 $F = [f_x, f_l]^T$ 로 두면, 식 (1a), (1b)는 다음과 같이 정리된다.

$$M\ddot{r} - \overline{W} = F \quad (2a)$$

여기서, $M \in R^{2 \times 2}, W \in R^{2 \times 1}$

$$M = \begin{bmatrix} m_p + m_t - a m_p l \cos^2\theta & m_p \sin\theta \\ m_p \sin\theta & m_p + m_t \end{bmatrix} \quad (2b)$$

$$\overline{W} = \begin{bmatrix} 2m_p \cos\theta \dot{l}\dot{\theta}(al - 1) \\ + m_p l \sin\theta(\dot{\theta}^2 + ag \cos\theta) \\ m_p l \dot{\theta}^2 + m_p g \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2c)$$

3. 제어기 설계

트롤리 및 권상 구동의 위치 오차를 식 (3a)로 둔다.

$$\begin{aligned} e = [e_x, e_l]^T \\ = r - r_d = [x - x_d, l - l_d]^T \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $r_d = [x_d, l_d]^T$ 는 기준궤적이며, 피드백 선형화방법을 적용하기 위해 식 (2a)를 다음과 같이 재정리하고,

$$\ddot{r} = PF + W \quad (4a)$$

여기서,

$$P = M^{-1}, W = P\overline{W} \quad (4b)$$

$\ddot{r} = v$ 의 형태로, 안정한 페루프 시스템이 되는 피드백 선형화 제어는 다음과 같다.

$$F = P^{-1}(v - W) \quad (5a)$$

$$v = \ddot{r}_d - k_d \dot{e} - k_p e \quad (5b)$$

여기서,

$$\begin{aligned} k_d &= \text{diag}[2\Lambda_x, 2\Lambda_l] \\ k_p &= \text{diag}[\Lambda_x^2, \Lambda_l^2], \Lambda_x, \Lambda_l \in \mathbb{R}^+ \end{aligned} \quad (5c)$$

식 (5a)에서 $W(l, \dot{l}, \theta, \dot{\theta})$ 에 의해 비선형 항들이 보상되더라도, 흔들림 다이내믹스 (1d)의 안정화를 기하는 것이 쉽지 않으므로, 식 (5b)의 $v(e, \dot{e})$ 에 비구동 변수를 직접 포함시키는 방법으로, $v(e, \dot{e}, \theta)^{(8)}$ 이 사용되기도 한다. 여기서는 식 (5d)와 같이 F_s 다이내믹스를 포함하는 형태로 구성한다. 이후 F_s 는 스위칭을 포함하는 $F_s(e, \dot{e}, \theta, \dot{\theta})$ 의 형태로 구성된다.

$$v = \ddot{r}_d - k_d \dot{e} - k_p e + F_s \quad (5d)$$

여기서,

$$F_s = [f \ 0]^T \quad (5e)$$

그러면, (5a), (5d)와 (4a)로부터 구동변수에 대한 오차 시스템은 다음과 같고,

$$\ddot{e}_x + 2\Lambda_x \dot{e}_x + \Lambda_x^2 e_x = f \quad (6a)$$

$$\ddot{e}_l + 2\Lambda_l \dot{e}_l + \Lambda_l^2 e_l = 0 \quad (6b)$$

식 (6a), (1d)로부터 흔들림 다이내믹스는 다음과 같다.

$$\ddot{\theta} = -a(\cos\theta(\ddot{x}_d - 2\Lambda_x \dot{e}_x - \Lambda_x^2 e_x + f) + g \sin\theta + 2\dot{l}\dot{\theta}) \quad (6c)$$

안정한 f 다이내믹스 설계를 위해 슬라이딩 면을 다음과 같이 구성한다⁽¹¹⁾.

$$s = \dot{\theta} + \Lambda_1 \theta + \Lambda_0 \int \theta dt \quad (7)$$

여기서, $\Lambda_1, \Lambda_0 \in \mathbb{R}^+$ 이다. 그러면 식 (6c), (7)로부터 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \ddot{\theta} + \Lambda_1 \dot{\theta} + \Lambda_0 \theta \\ &= -a \cos\theta (f + \ddot{x}_d - 2\Lambda_x \dot{e}_x - \Lambda_x^2 e_x \\ &\quad + g \tan\theta) + 2\dot{l}\dot{\theta} + \Lambda_1 \dot{\theta} + \Lambda_0 \theta \end{aligned} \quad (8)$$

설계하고자 하는 제어규칙 f 는 식 (9b)의 f_{eq} 와 스위칭 동작을 포함한 f_s 로 나누어 다음과 같이 구성한다.

$$f = f_{eq} + f_s \quad (9a)$$

여기서,

$$f_{eq} = \frac{1}{a \cos\theta} (\Lambda_1 \dot{\theta} + \Lambda_0 \theta + 2\dot{l}\dot{\theta}) \quad (9b)$$

그러면 식 (8), (9a)로부터 다음과 같다.

$$\dot{s} = -a \cos\theta (f_s + \omega_d) \quad (10a)$$

여기서,

$$\omega_d = \ddot{x}_d - 2\Lambda_x \dot{e}_x - \Lambda_x^2 e_x + g \tan\theta \quad (10b)$$

그리고 f_s 를 다음과 같이 둔다.

$$f_s = |\omega_d| \text{sgn}(s) + k_s s \quad (11a)$$

여기서,

$$k_s \in \mathbb{R}^+, \text{sgn}(s) = \begin{cases} s & \text{if } s > 0 \\ 0 & \text{if } s = 0 \\ -s & \text{if } s < 0 \end{cases} \quad (11b)$$

그러면 식 (10a), (11a), (1e)로부터 다음과 같다.

$$\begin{aligned} s \dot{s} &= -a \cos\theta s (|\omega_d| \text{sgn}(s) + \omega_d + k_s s) \\ &= -a \cos\theta (|\omega_d| |s| + \omega_d s + k_s s^2) \\ &\leq -a \cos\theta k_s s^2 \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, $k_r = a \cos\theta k_s > 0$ 이므로 $\frac{d}{dt} s^2 \leq -2k_r s^2$ 즉

s 는 유한한 시간 내에 0에 도달한다, 이에 따라 θ 와 $\dot{\theta}$ 이 0으로 되면 식 (9b)의 f_{eq} 가 0으로 된다. s 가 0에 도달함에 따라 식 (11a)의 f_s 가 0으로 되어, 결국 식 (9a)의 f 가 0으로 수렴한다. 이에 따라 식 (6a), (6b)에서 모든 위치 오차는 0으로 수렴한다. 즉, 제어 (5a), (5d), (9a), (9b), (11a)를 갖는 시스템 (2a), (1d)는 점근적으로 안정하다.

그리고 식 (9a)에서 $f_s = 0$, 식 (9b)에서 $A_0 = 0$ 로 두면,

식 (5d)는 기존 연구⁽⁹⁾의 $v(e, \dot{e}, \dot{\theta})$ 형태로 된다. 또한 식 (9b)에서 $A_0 = 0$ 로, (11a)에서 $k_s = 0$ 로 두고, 식 (11b)를 시변 경계층 식 (14a)로 대체하면, 기존 방법⁽¹⁰⁾과 유사한 형태의 $F_s(e, \dot{e}, \theta, \dot{\theta})$ 로 된다. 그리고 식 (11a)의 $sgn(\cdot)$ 함수는 $sat(\cdot)$ 함수로 대체하여 채터링 개선을 기할 수 있으며, 기존 방법과 달리 점근적 안정성을 위해 시변 경계층의 도입이 요구되지 않는다.

$$sat(s) = \begin{cases} sgn(s) & \text{if } |s| \geq \epsilon > 0 \\ s/\epsilon & \text{if } |s| < \epsilon \end{cases} \quad (13)$$

식 (13)의 ϵ 은 기존 방법과 같은 형태로 다음의 시변 함수로 둘 수 있다.

$$\epsilon = \phi/\lambda(\cdot) \quad (14a)$$

여기서,

$$\lambda(t) = \begin{cases} \phi & \text{if } t \leq t_0 \\ a + be^{ct} & \text{if } t_0 < t < T \\ a + be^{cT} & \text{if } t \geq T \end{cases} \quad (14b)$$

$$\phi = a + b, \quad a, b, c, T \in R^+$$

4. 시뮬레이션 결과

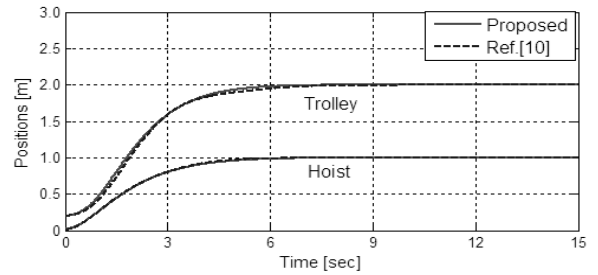
시뮬레이션 도구로 Matlab을 이용하였으며, 시뮬레이션에 사용된 시스템 파라미터는 Table 1과 같다. 적용된 제어파라미터는 Table 2에 나타낸 것과 같이, 식 (5d)의 A_x, A_l 은 기존 방법(10)과 같이 모두 1.0으로 두었다. 식 (11a)에서 $k_s = 0.1$ 로, 식 (13)에서 $\epsilon = 1.0$ 으로 두고, 기존 방법⁽¹⁰⁾에 적용된 식 (14b)에서 $t_0 = 0, T = 10, a = b = c = 0.5$ 로 두었다. 그리고 트롤리와 권상의 초기 위치는 각각 $0.2m, 0.02m$ 로, 목표위치는 각각 $2.0m, 1.0m$ 로, 샘플링 시간은 0.01 초로 하였다.

Table 1 Parameters of the crane system

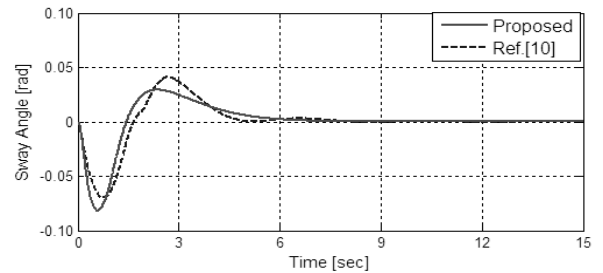
Mechanical property	Symbol	Value	Unit
Trolley system weight	m_t	1.06	kg
Hoist system weight	m_l	0.5	kg
Payload weight	m_p	0.73	kg
Rope Length	l	1.0	m
Moment of Inertia of payload	I	0.005	kg/m ²

Table 2 Parameters of the control system

Symbol	Values	Symbol	Values
A_x	1.0	A_l	2.0
A_l	1.0	A_0	1.0
ϵ	1.0	k_s	0.1

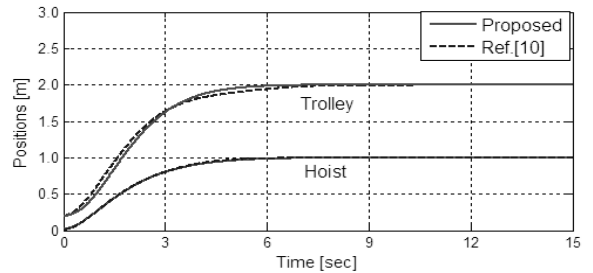


(a) Positionings

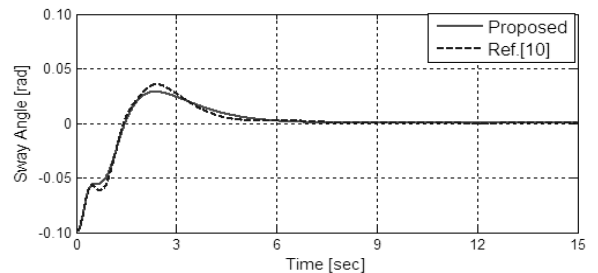


(b) Sway motions

Fig. 2 The Position trackings and sway motions without initial sway angle in nominal system



(a) Positionings



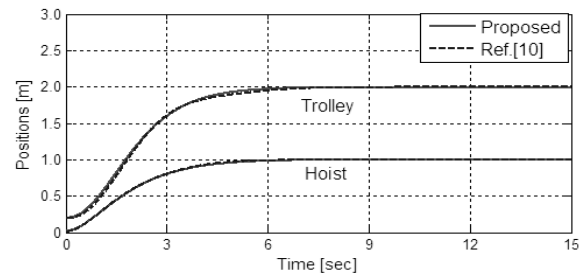
(b) Sway motions

Fig. 3 The Position trackings and sway motions with initial sway angle of 0.1rad in nominal system

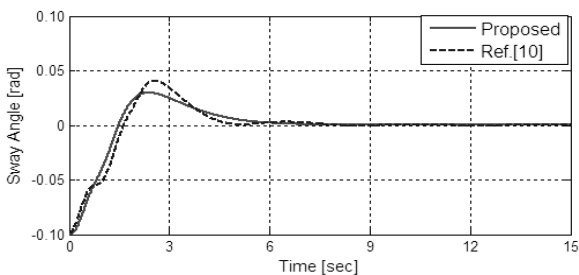
초기 흔들림이 없는 상태에서 공칭 값이 적용된 결과를 Fig. 2에 보였다. Fig. 2(a)에서 제시된 방법이 보다 급속한 트롤리 위치 추종을 보이거나, 두 방법의 권상 위치 추종은 같으며, 모두 우수한 트롤리 및 권상 위치 추종 성능을 보였다. Fig. 2(b)에서 기존 방법이 초기에 급속한 흔들림 억제를 보이며, 약 6초 이후 정상상태는 제시된 방법이 작은 잔류 흔들림을 보였다. 초기 흔들림이 0.1rad 으로 적용된 경우 Fig. 3에서 Fig. 2와 유사한 경향을 보이며, Fig. 3(a)에서 권상 위치 추종은 같으나 트롤리 위치는 제시된 방법이 빠른 추종성을 보였다. Fig. 3(b)에서와 같이 기존 방법이 초기에 노치 현상을 나타내며 빠른 흔들림 억제를 보이거나, 정상상태에서는 제시된 방법이 작은 흔들림을 보이며, 두 방법 모두 급속한 흔들림 억제를 보였다. Table 3에 제시된 크레인 운전 환경은 모두 초기 흔들림 각을 0.1rad으로 적용하였으며, (i)에서는 컨테이너 무게를 공칭 값의 0.2배로, (ii)와 (iii)에서 강풍이 각각 순방향, 역방향으로 적용되는 경우로 설정하였다. 시뮬레이션 결과, (i)의 경우 Fig. 4에, 그리고 (ii), (iii)의 경우, 각각 Fig. 5, 6에 나타내었다. 컨테이너 무게

Table 3 Condition of simulation

Case	Operational condition	Details
i	Payloads of one-fifth weight	$m_p = 0.2 \times \overline{m}_p$
ii	Winds in the same direction as the trolley movement	$f_d = 2N$ $3 \leq t \leq 3.5s$
iii	Winds in the opposite direction to the trolley movement	$f_d = -2N$ $3 \leq t \leq 3.5s$



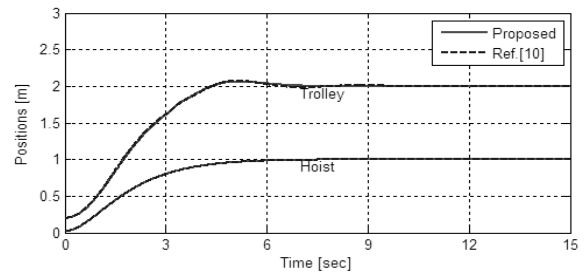
(a) Positionings



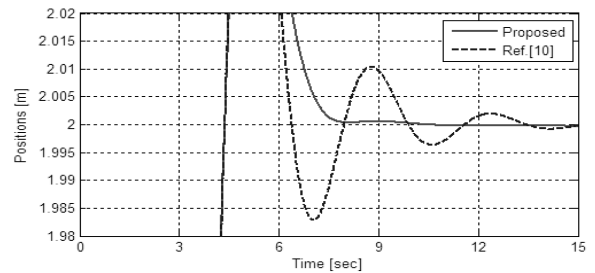
(b) Sway motions

Fig. 4 The Position trackings and sway motions with of one-fifth weight of nominal payloads in the case of (i)

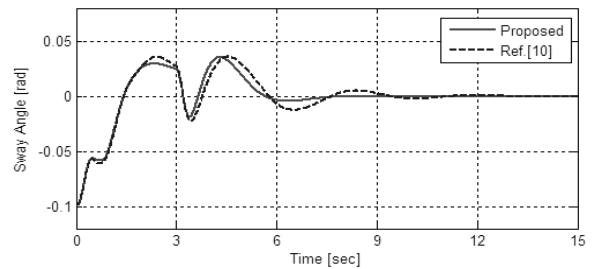
값이 0.2배로 적용된 (i)의 경우, Fig. 4(a)에서와 같이 공칭 값이 적용된 Fig. 3(a)와 같은 경향을 나타내며, 두 방법 모두 우수한 트롤리 및 권상의 위치 추종을 보였다. Fig. 4(b)에서 흔들림 억제는 Fig. 3(b)와 유사한 경향을 나타내며, 기존 방법과 제시된 방법 모두 급속하게 제어되고, 정상상태에서 잔류 진동을 보였으나, 모두 빠른 흔들림 억제를 보여 주었다. (ii), (iii)의 경우, Fig. 5(a), 5(c), 6(a), 6(c)를 y축 방향으로 확대하여 각각 Fig. 5(b), 5(d), 6(b), 6(d)에 나타내었으며, 트롤리 오차는 약 30mm, 흔들림 오차는 약 2mrad를 기준으로 하여 비교하였다,



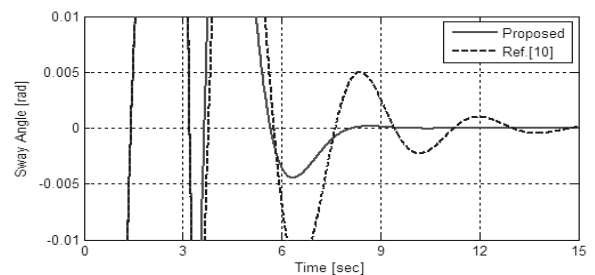
(a) Positionings



(b) Zoom-in of positionings



(c) Sway motion



(d) Zoom in sway motion

Fig. 5 Simulation results with winds in the same direction as the trolley movement in the case of (ii)

(ii)의 경우, Fig. 5(b)에서 두 방법 모두 우수한 권상 위치 추종을 보였다. 기존 방법이 초기에 빠른 트롤리 위치 추종 응답을 나타내지만 10.5초 후에도 30mm를 초과하는 오차가 있는 반면, 제시된 방법은 약 7.0초 이내 30mm 이내로 추종성을 보였다. 또한 흔들림은 Fig. 5(d)와 같이 기존 방법은 10.5초 후에도 2mrad을 초과하는 흔들림을 보여 주는 반면, 제시된 방법은 약 7.3초 이내 2mrad의 흔들림을 보여 보였다. 역방향 강풍이 적용된 경우 Fig. 6에서 권상 위치 는 두 방법 모두 별 차이가

없이 우수한 추종성을 보였으며, 트롤리 위치는 Fig. 6(b)와 같이 기존 방법은 초기에 빠른 응답을 보이거나 10.0초 후에도 30mm의 오차가 있는 반면, 제시된 방법은 약 7.0초 이전에 30mm 내로 추종성을 보였다. 그리고 Fig. 6(d)에서 두 방법 모두 과도기에 큰 폭의 흔들림을 보였다. 기존 방법은 흔들림이 감소되나 10.0초 후에 2mrad의 흔들림을 보여주는 반면, 제시된 방법은 약 7.5초 이전에 2mrad 이내의 흔들림을 보이며 우수한 억제 성능을 보였다. 적용한 시뮬레이션 결과, 컨테이너 무게가 변동된 경우 기존 방법과 제시된 방법 모두 우수한 성능을 보였으나, 순방향 또는 역방향 강풍이 적용된 경우 기존 방법보다 제시된 방법에 의해 트롤리의 위치 추종 및 흔들림 억제 성능이 현저하게 개선됨을 확인하였다.

5. 결론

컨테이너 크레인의 흔들림 억제 제어를 위해 피드백 선형화 제어를 적용하여 트롤리 및 권상의 위치 오차, 그리고 컨테이너의 흔들림 각을 포함한 흔들림 다이내믹스를 유도하고, 이에 기초하여 가변구조 제어기를 추가하여 설계하는 방법을 제시하였다. 그리고 시변 경계층의 도입 없이 단순 스위칭 함수로 흔들림 다이내믹스를 안정화시키고, 점근적 안정성을 보였다. 시뮬레이션 결과, 컨테이너의 무게 변동이 적용되는 경우에 전반적으로 트롤리 위치추종 및 흔들림 억제 성능은 기존 방법과 큰 차이가 없었으며, 강풍이 적용되는 경우에 약 30mm이내의 트롤리 오차 및 흔들림 억제가 요구되는 컨테이너 이송에 소요되는 시간은 제시된 방법에 의해 약 3초 정도 단축됨을 보였다. 향후 쿨롱 마찰을 포함한 모델에 대해 견실한 성능을 유지하는 적응 제어방법에 대한 연구가 계속될 것이다.

후 기

본 연구는 동의대학교 교내연구비 지원에 의해 수행되었음. (과제번호 2010AA163)

참 고 문 헌

- (1) Hong, k. S., Park, B. J., and Lee, M. H., 2000, "Two-stage Control for Container Cranes," *JSME International Journal, Series C*, Vol. 43, No. 2, pp. 273~282.
- (2) Yi, J., Yubazaki, N., and Hirota, K., 2003, "Anti-swing and Positioning Control of Overhead Traveling Crane," *Information Science: an International Journal*, Vol. 155, No. 1~2, pp. 19~42.
- (3) Omar, H., and Nayfeh, A., 2005, "Anti-swing Control of Gantry and Tower Cranes using Fuzzy and Time-

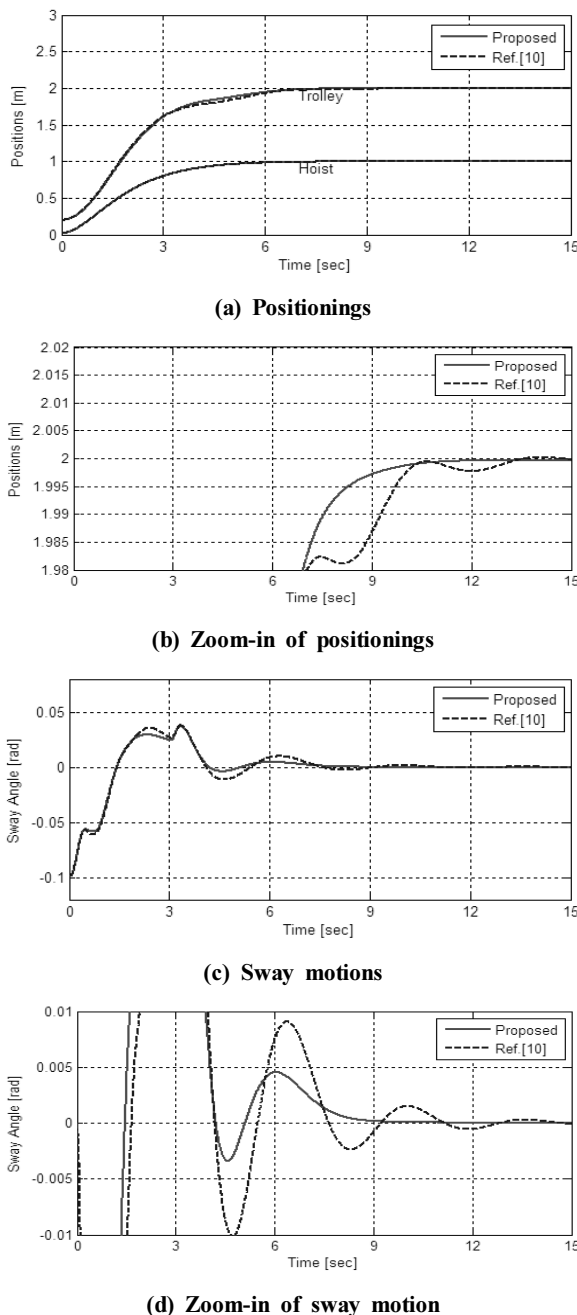


Fig. 6 Simulation results with winds in the opposite direction to trolley movement in the case of (iii)

- delayed Feedback with Friction Compensation,” *Shock and Vibration*, Vol. 12, No. 2, pp. 73~89.
- (4) Lee, H. H., 2003, “New Approach for the Anti-swing Control of Overhead Cranes with High-speed Load Hoisting,” *International Journal of Control*, Vol. 76, No. 15, pp. 1493~1499.
- (5) Lee, H., Liang, Y., and Segura, D., 2006, “Sliding-mode Anti-swing Trajectory Control for Overhead Cranes with High-speed Load Hoisting,” *Trans. of ASME*, Vol. 128, pp. 842~845.
- (6) Orbisaglia, M., Orlando, G., and Longhi, S., 2008, “A Comparative Analysis of Sliding-mode Controller for Overhead Cranes,” *16th Mediterranean Conf. on Control and Automation Congress Centre*, pp. 670~675.
- (7) Park, M. S., Chwa, D., and Hong, S. K., 2008, “Anti-sway Tracking Control of Overhead Cranes with System Uncertainty and Actuator Nonlinearity using an Fuzzy Sliding-mode Control,” *IEEE, Trans. of Industrial Electronics*, Vol. 55, No. 11, pp. 3972~3984.
- (8) Chwa, D., 2009, “Nonlinear Tracking Control of 3-D Overhead Cranes Against the Initial Swing Angle and the Variation of Payload Weight,” *IEEE, Trans. on Control Systems Technology*, Vol. 17, No. 4, pp. 876~883.
- (9) Zhang, X., Gao, B., and Chen, H., 2005, “Nonlinear Controller for a Gantry Crane Based on Partial Feedback Linearization,” *Conf. on Control and Automation*, pp. 1074~1078.
- (10) Park, H., Chwa, D., and Hong, K. S., 2007, “A Feedback Linearization Control of Container Cranes: Varying Rope Length,” *Int. Journal of Control, Automation, and Systems*, Vol. 5, No. 4, pp. 379~387.
- (11) Baek, W. B., and Kim, W. H., 2010, “Trajectory Tracking of Skid Steering Robot by the Sliding Mode Control Techniques,” *Journal of KSMTE*, Vol. 19, No. 1, pp. 121~127.