

컨테이너 크레인의 슬라이딩 모드제어

이숙재*(부산대 대학원 메카트로닉스 협동과정), 홍금식(부산대 기계공학부)

Sliding-Mode Control of Container Cranes

S. J. Lee (Interdisciplinary Program on Mechatronics, PNU), K. S. Hong (Mecha. Eng. Dept., PNU)

ABSTRACT

In this paper, we propose a simple control scheme, based on second order sliding modes, which guarantees a fast and precise container transfer and the swing suppression during the container movement, despite of model uncertainties and unmodeled dynamic actuators. In the actual case, the swing suppression is obtained by constraining the system motion on a suitable surface which involves both the desired path and the swing angle. Strictly speaking, the trolley velocity is modified on-line, on the actual swing angle, to obtain the suppression of the oscillations not only at the end of the transport but during transfer as well. Such controller has been tested on a laboratory-size model of the 3Dcrane, and some experimental results are reported.

Key Words : container crane(컨테이너크레인), sliding mode control(슬라이딩모드제어), nonlinear system(비선형 시스템), model uncertainty(모델 불확실성)

1. 서론

컨테이너크레인은 항만에서 화물용 컨테이너들을 컨테이너선박으로부터 컨테이너트럭으로 하역(혹은 선적)하는 하역장비이다. 날로 많아지는 물동량과 작업생산성 향상이라는 측면에서 주어진 시간 내에 더 많은 수의 컨테이너를 하역/선적시키는 것은 매우 중요하다. 하지만, 현재 컨테이너크레인의 작업환경을 살펴보면 선적/하역작업시 컨테이너크레인에는 보조수단으로 자동 흔들림방지시스템이 적용되어 있지만 숙련된 크레인 운전자들은 전적으로 자신들의 경험과 능력에 의존하여 컨테이너의 선적/하역작업을 수행하고 있는 실정이다. 하역/선적 작업시 컨테이너를 빨리 이송시키고자 할 경우 가장 큰 문제는 트롤리를 목표위치에 정지시켰을 때 트롤리에 지지된 로우프 끝에 매달린 컨테이너가 계속하여 흔들리고 있기 때문에 다음 작업에 들어가기 어렵다는데 있다. 일반적으로 크레인시스템은 보유하고 있는 자유도의 수가 시스템이 구사할 수 있는 제어입력의 수보다 많은 under-actuated 시스템이며, 비선형성이 매우 크며, 또한 항만에서 사용되는 컨테이너크레인의 경우에는 바람등과 같

은 외란도 극복해야 하는 문제점이 있다. 이러한 이유에서 보듯이 컨테이너크레인의 자동제어시스템의 설계가 시급히 요구되고 있다.

크레인 흔들림제어에 관하여 문헌상에 나타난 것들을 간략히 살펴보면 Fliss³ 등은 일반화된 상태공간 모델을 통하여 선형화하는 제어법칙을 발표하였고, Boustany² 등은 다이나믹 피드백 선형화를 이용한 크레인 적응제어를 발표하였다. Okawa⁹ 등의 논문에서는 속도 패턴 제어와 더불어 흔들림 각 피드백을 위하여 optimal-fiver gyro inclinometer의 사용하여 발표하였다. Hong^{4,5} 등은 크레인의 모델링 및 트롤리의 주행속도 조절을 통한 진자운동의 제어를 발표하였으며, 그 후에 Hong⁶ 등은 컨테이너 크레인제어에서 수정된 시간최적주행과 비선형 잔류흔들림제어를 발표하였다. Mesour⁸ 등은 천정크레인제어에 위치 및 호이스팅제어는 가변구조제어기법을 화물의 흔들림제어는 상태 피이드백제어를 발표하였다.

국내에서는 로우프 길이가 일정한 천정크레인의 흔들림 제어의 목적으로 진자운동의 진동각도의 변화율을 측정하여 제어입력으로 피이드백제어기법으로서 순수한 단진자운동에 감쇠효과를 부여하는 것을 제

안하였고, 트롤리를 이송시키는 이송속도패턴으로서 최고속도이송 및 흔들림 제어구간, pre-programmed 감속 구간 및 stop-position 제어구간을 제안하고 있다.^{11, 15} 또 홍형주¹⁷ 등은 컨테이너의 흔들림뿐만 아니라, 컨테이너와 트롤리의 속도 차이에 의해 발생이 예상되는 흔들림 및 가속시간 등 3가지를 성능지수에 포함시키고 이를 최소화하는 최적제어를 연구하였다. 이진우¹⁶ 등은 타워형 크레인에 대해서 최적 레귤레이터 제어법으로 실시간 제어를 위한 디지털제어 법칙을 연구하였다. 박병석¹² 등은 슬라이딩모드 제어기를 이용한 산업용 천정크레인의 추종제어에 관한 연구를 발표하였고, 손정기¹³ 등은 LQ제어기법을 이용한 컨테이너크레인의 제어기를 설계하였으며, 소명옥¹⁴ 등은 퍼지제어 기법을 이용한 컨테이너크레인의 제어기를 설계하였다.

본 논문에서는 모델의 불확실성 및 역추에이터 동역학 모델링이 없음에도 불구하고 컨테이너가 이송되는 동안 흔들림과 예정된 경로를 따라 빠르게 목표지점에 안정하게 도달할 수 있는 2 차 슬라이딩 모드를 기반으로 하는 제어기법을 제안한다.

본 논문의 구성을 다음과 같다. 2 절에서는 크레인 모델을 유도하고 제어문제를 구성하였고, 3 절에서는 트롤리의 궤적 추적 및 진동감쇄를 위한 슬라이딩모드 함수를 바탕으로 흔들림각도 θ -다이나믹스를 유도하였으며, 4 절에서는 유도된 흔들림각도 θ -다이나믹스의 안정성을 분석하였으며, 5 절에서는 실험용 크레인을 사용하여 제안된 제어기의 성능을 실험을 통해 증명하였으며, 6 절에서 연구결과를 토대로 결론을 맺는다.

2. 시스템 모델링

본 논문에서는 실험용 3D 크레인을 고려하고 있으며 컨테이너크레인은 크게 호이스트 부분과 트롤리 부분으로 나눌 수 있다. Fig. 1은 컨테이너크레인의 개략적인 도식도이다. 여기서 M_T , m_c , x_t , l , θ , f_1 그리고 f_2 각각 트롤리 질량, 컨테이너 질량, 트롤리 위치, 로우프 길이, 흔들림 각도, 트롤리 구동력 그리고 로우프의 호이스팅 구동력을 나타낸다.

먼저 컨테이너의 흔들림현상 및 크레인시스템에 대하여 다음과 같은 가정을 한다.

- (i) 컨테이너는 평면운동만을 한다. 즉, 컨테이너의 흔들림은 트롤리의 이동방향과 수직 선이 이루는 평면 안에서만 발생한다고 가정한다.
- (ii) 크레인 구조물의 탄성변형은 무시할 수 있을 정도로 작다.

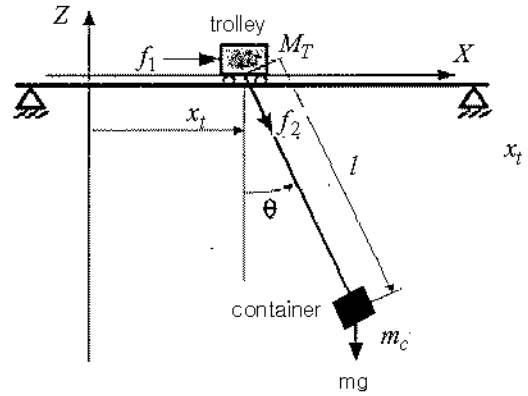


Fig. 1 Schematic diagram of a container crane.

- (iii) 컨테이너는 질량이 없는 로우프에 매달려 있는 질점으로 간주한다.

이제 Lagrange mechanics를 이용하여 컨테이너크레인 시스템의 운동방정식을 구해보자. Lagrange 운동방정식은 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \quad (1)$$

여기서 Lagrangian L 은 운동에너지(T)와 위치에너지(V)의 차이로 정의된다. q_i 는 일반화된 좌표계를 나타내며, Q_i 는 일반화된 좌표 q_i 에 대응하는 비보존 일반력이다. 위 가정과 Lagrange mechanics를 이용하여 컨테이너시스템의 운동방정식을 구해보면 다음과 같은 컨테이너크레인 시스템의 운동방정식을 구할 수 있다.⁷

$$(M_T + m_c)\ddot{x}_t + 2m_c\dot{\theta}\cos\theta + m_c l\ddot{\theta}\cos\theta - m_c l\dot{\theta}^2 \sin\theta + m_c \ddot{l} \sin\theta = f_1, \quad (2a)$$

$$m_c \ddot{l} + m_c \ddot{x}_t \sin\theta - m_c \dot{\theta}^2 l - m_c g \cos\theta = f_2, \quad (2b)$$

$$m_c l^2 \ddot{\theta} + m_c \ddot{x}_t \cos\theta + 2m_c \dot{\theta} \dot{x}_t + m_c g l \sin\theta = 0. \quad (2c)$$

또한 식 (2)로부터 다음의 방정식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{x}_t = \frac{1}{M_T} f_1 - \frac{\sin\theta}{M_T} f_2, \quad \ddot{l} = \dot{\theta}^2 l + g \cos\theta - \frac{\sin\theta}{M_T} f_1 + \left(\frac{\sin^2\theta}{M_T} + \frac{1}{m_c} \right) f_2, \quad (3)$$

$$\ddot{\theta} = -\frac{2\dot{\theta}}{l} \dot{x}_t - \frac{g \sin\theta}{l} - \frac{\cos\theta}{M_T l} f_1 + \frac{\sin\theta \cos\theta}{M_T l} f_2.$$

컨테이너의 흔들림각도 θ 는 실제로 작다고 가정할 수 있으므로 $\cos\theta \approx 1$, $\sin\theta \approx \theta$ 로 근사화할 수 있다. 또한 $\theta^\alpha \theta^\beta$ ($\alpha \geq 0, \beta \geq 0, \alpha + \beta \geq 2$)의 형

태로 표시되는 모든 항들은 선형화시 사라지게 되므로 식 (3)은 1 차적으로 다음과 같이 단순화된다.

$$\ddot{x}_t = \frac{1}{M_T} f_1 - \frac{\theta}{M_T} f_2, \quad (4a)$$

$$\ddot{i} = g - \frac{\theta}{M_T} f_1 + \frac{1}{m_c} f_2, \quad (4b)$$

$$\ddot{\theta} = -\frac{2i\dot{\theta}}{l} - \frac{g\theta}{l} - \frac{1}{M_T l} f_1 + \frac{\theta}{M_T l} f_2. \quad (4c)$$

3. 슬라이딩모드 제어기 설계

컨테이너크레인 시스템의 제어목적은 초기 위치로부터 최종 위치까지 예정된 경로를 따라 컨테이너를 가능한 빠르게 이송되어야 하며 흔들림도 가능한 작아야 하겠다. 본 논문의 제어전략은 크레인 시스템의 전체적인 움직임을 두 구간으로 나눠서 각각 제어하고자 한다. 즉, 컨테이너가 최종 위치에 도달하기 위한 ‘이송구간’과 ‘도착구간’으로 구분되며, 이송되는 컨테이너는 이송구간뿐만 아니라 최종 위치에 도착하는 끝단에서도 흔들림은 0 가 되게 된다.

3.1 슬라이딩 모드 제어

먼저 슬라이딩모드 제어설계를 위해 다음과 같은 슬라이딩모드 함수를 정의한다.

$$s(q) = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_t - \dot{x}_t^d + \lambda_1(x_t - x_t^d) \\ \dot{i} - \dot{i}^d + \lambda_2(i - i^d) \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 λ_1, λ_2 는 양의 상수이고 위 첨자 ‘d’는 목표치를 의미한다.

컨테이너크레인 시스템의 θ -다이나믹스를 분석하기 위해 2 절의 선형화된 모델 (4)은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{x}_t = z_1 - \frac{\theta m_c}{M_T} z_2 \quad (6a)$$

$$\dot{i} = g - \theta z_1 + z_2 \quad (6b)$$

$$\ddot{\theta} = -\frac{2i\dot{\theta}}{l} - \frac{g\theta}{l} - \frac{1}{l} z_1 + \frac{\theta m_c}{M_T l} z_2 \quad (6c)$$

여기서 z_1, z_2 는 새로운 제어변수로 다음과 같이 정의된다.

$$z_1 = \frac{1}{M_T} f_1, \quad z_2 = \frac{1}{m_c} f_2 \quad (7)$$

흔들림각도 θ -다이나믹스는 슬라이딩 모드상태가 $s_1 = s_2 = 0$ 될 때 z_1 과 z_2 에 의하여 구해진다. 그리고 슬라이딩모드 함수 $s(\cdot)$ 의 상대차수가 1 차이

기 때문에 가변구조제어의 equivalent control 처럼 입력 $z_{eq} = [z_{1eq} \ z_{2eq}]$ 는 $\dot{s}(\cdot) = 0$ 시스템의 해가 된다. $\dot{s}(\cdot) = 0$ 시스템의 해 z_{1eq}, z_{2eq} 는 식 (5)-(7)에 의해서

$$z_{1eq} = \frac{m_c \ddot{i} \theta}{M_T} + \ddot{x}_t - \lambda_1(\dot{x}_t - \dot{x}_t^d), \quad (8a)$$

$$z_{2eq} = \theta \left\{ \ddot{x}_t^d - \lambda_1(\dot{x}_t - \dot{x}_t^d) \right\} - g + \ddot{i} \quad (8b)$$

로 얻어진다. 따라서, 흔들림각도 θ -다이나믹스는 식 (8)을 식 (6c)에 대입하여 다음과 같이 유도된다.

$$\ddot{\theta} = -\frac{2i\dot{\theta}}{l} - \left(\frac{g}{l} + \frac{m_c g}{M_T l} \right) \theta - \frac{1}{l} \left\{ \ddot{x}_t^d - \lambda_1(\dot{x}_t - \dot{x}_t^d) \right\} \quad (9)$$

위의 흔들림각도 θ -다이나믹스의 $-\frac{2i\dot{\theta}}{l}$ 항은

호이스트운동이 θ -다이나믹스와 결합되는 양으로 로우프 길이 l 이 일정할 때 그 값은 0 이 된다. 로우프 길이 l 이 시간에 따라 변하는 경우에는 이 양은 호이스트가 하강하게 되면 $i > 0$ 이 되어 θ -다이나믹스에 감쇠항으로 작용하게 되고 역으로 호이스트가 상승하게 되면 $i < 0$ 이 되어 시스템을 불안정하게 뻬을 알 수 있다.

본 논문에서는 흔들림각도에 대한 슬라이딩모드 함수 s_3 를 다음과 같이 정의하고 트플리의 구동력 f_1 에 의해 흔들림각도를 제어할 수 있는 새로운 슬라이딩모드 함수 s_4 를 다음과 같이 정의한다.

$$s_3 = \dot{\theta} - \dot{\theta}^d + \lambda_3(\theta - \theta^d) \quad (10)$$

$$s_4 = s_1 + k s_3 \\ = \dot{x}_t - \dot{x}_t^d + \lambda_1(x_t - x_t^d) + k(\dot{\theta} + \lambda_3 \theta) \quad (11)$$

여기서 k 는 음의 상수이며, 이때 최종 위치에서의 흔들림 목표치는 $\dot{\theta}^d = \theta^d = 0$ 된다.

윗글에 전개된 과정을 반복하면 본 논문에서 제안하는 새로운 슬라이딩모드 함수 s_4 에 의한 입력 z_{3eq}, z_{4eq} 과 흔들림각도 θ -다이나믹스는 다음과 같이 유도된다.

$$z_{3eq} = \frac{m_c \ddot{i} \theta}{M_T} + \ddot{x}_t - \lambda_1(\dot{x}_t - \dot{x}_t^d) - k(\ddot{\theta} + \lambda_3 \dot{\theta}), \quad (12)$$

$$z_{4eq} = \theta \left\{ \ddot{x}_t^d - \lambda_1(\dot{x}_t - \dot{x}_t^d) - k(\ddot{\theta} + \lambda_3 \dot{\theta}) \right\} - g + \ddot{i}, \quad (13)$$

$$\ddot{\theta} = -\frac{1}{l-k} \left[(2i + k\lambda_3) \dot{\theta} + \frac{(1-m_c)g}{M_T} \theta \right] + \left\{ \ddot{x}_t^d - \lambda_1(\dot{x}_t - \dot{x}_t^d) \right\} \quad (14)$$

제안된 흔들림각도 θ -다이나믹스에는 임의의

점성감쇠항 $\frac{k\lambda_3}{l-k}$ 이 나타내고 이 점성감쇠항의 k 값을 적절히 조절함으로써 θ -다이나믹스의 안정된 효과를 얻을 수 있다.

3.2 등속이송구간에서의 슬라이딩모드 제어

등속이송구간에서의 슬라이딩모드 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$s_1' = \dot{x}_t - V_0 + k(\dot{\theta} + \lambda_3\theta), \quad (15a)$$

$$s_2' = \dot{l} - \dot{l}^d + \lambda_2(l - l^d), \quad (15b)$$

여기서 V_0 는 양의 상수이다. 또한 컨테이너시스템에서 로우프는 다음과 같이 포물선형태의 기준계적을 갖도록 가정하면

$$l^d = l_0 + Cx_t^2, \quad |x_t| \leq X_T, \quad (16)$$

$$\dot{l}^d = 2Cx_t\dot{x}_t \quad (17)$$

가 된다. 등속이송구간에서의 제어입력은 앞 절의 전개과정을 통해 다음과 같이 구해진다.

$$z_{1eq}' = \frac{m_c \dot{l}^d}{M_T} - k(\ddot{\theta} + \lambda\dot{\theta}), \quad (18)$$

$$z_{2eq}' = -\theta(\ddot{\theta} + \lambda\dot{\theta})k - g + \ddot{l}. \quad (19)$$

따라서, 등속이송구간에서의 흔들림각도 θ -다이나믹스는 다음과 같다.

$$\ddot{\theta} = -\frac{1}{l-k} \left[(2\dot{l} + k\lambda_3)\dot{\theta} + \left(1 + \frac{m_c}{M_T} \right) g\theta \right] \quad (20)$$

3.3 도착구간에서의 슬라이딩모드 제어

도착구간에서의 슬라이딩모드 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$s_1'' = \dot{x}_t - \lambda_1(x_t - x_f) + k(\dot{\theta} + \lambda_3\theta), \quad (21a)$$

$$s_2'' = \dot{l} + \lambda_2(l - l_f). \quad (21b)$$

여기서 x_f , l_f 는 최종목표위치이다. 도착구간에서의 제어입력은 앞 절의 전개과정의 반복을 통해 다음과 같이 구해진다.

$$z_{1eq}'' = \frac{m_c \dot{l}^d}{M_T} - \lambda_1(\dot{x}_t - \dot{x}_f) - k(\ddot{\theta} + \lambda\dot{\theta}), \quad (22)$$

$$z_{2eq}'' = -\theta\{\lambda_1(\dot{x}_t - \dot{x}_f) + (\ddot{\theta} + \lambda\dot{\theta})k\} - g + \ddot{l}. \quad (23)$$

따라서, 도착구간에서의 흔들림각도 θ -다이나믹스는

$$\ddot{\theta} = -\frac{1}{l-k} \left[(2\dot{l} + k\lambda_3)\dot{\theta} + \left(1 + \frac{m_c}{M_T} \right) g\theta - \lambda_1(\dot{x}_t - \dot{x}_f) \right]$$

으로 유도된다.

4. 안정성 해석

비선형 흔들림각도 θ -다이나믹스 (20)는 k 파라미터에 의해서 컨테이너 흔들림이 점차적으로 감쇠되도록 보장된다.

정리 1. 등속이송구간에서 구간 $K \equiv (k_m, k_M)$ 과 $x_t \equiv (-X_M, X_M)$ 이 존재하고, k 파라미터가 구간 K 안에 있고 또한 트롤리 위치 x_t 가 구간 x_t 에 존재한다면, 흔들림각도 θ -다이나믹스 (20)는 원점에서 locally asymptotically stable 하며 컨테이너의 이동경로는 예정된 경로를 따르게 된다.

증명) 로우프 값이 θ -다이나믹스는 다음과 같다.

$$\dot{l} = \dot{l}^d - \lambda_2(l - l^d) \quad (25)$$

또한 로우프 값이 θ -다이나믹스의 l , \dot{l} 은 식 (16), (17)의 목표값으로 지수적으로 일치하게 되므로 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$l = l^d + \alpha_1 e^{-\lambda_2 t}, \quad \dot{l} = \dot{l}^d + \alpha_2 e^{-\lambda_2 t} \quad (26)$$

그리고 식 (25)에 의해서 식 (26)은 유계되어 있고, 비선형 흔들림각도 θ -다이나믹스 (20)는 식 (15a), (16), (17), (26)에 의해서 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} = & -\frac{1}{l_0 + Cx_t^2 - k} (4V_0 Cx_t - 2k\lambda_3)\dot{\theta} \\ & - \frac{1}{l_0 + Cx_t^2 - k} \left(1 + \frac{m_c}{M_T} \right) g\theta - \frac{2\alpha_2}{l_0 + Cx_t^2 - k} e^{-\lambda_2 t} \end{aligned} \quad (27)$$

마지막 항은 시간이 지나면 지수적으로 감소되기 때문에 정리 1을 증명하는 것은 앞의 두 항의 안정성만 보장하면 된다. 식 (27)는 다음과 같이 일반적으로 표현할 수 있다.

$$\ddot{\theta} = -a(\eta)\dot{\theta} - b(\eta)\theta \quad (28)$$

여기서 $\eta = x_t$ 이다.

임의의 변수 ω 를 다음과 같이 정의한다.

$$\omega = \dot{\theta} + h\theta \quad (29)$$

여기서 h 는 임의의 양의 상수이다. 그리고 식 (28)을 새로운 ω - θ 좌표계로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\theta} = & \omega + h\theta, \\ \dot{\omega} = & -[a(\eta) - h] + [h(a(\eta) - h) - b(\eta)]\theta. \end{aligned} \quad (30)$$

새로운 좌표계에 대한 Lyapunov 후보함수를 다음과 같이 정의한다.

$$V(\theta, \omega) = \frac{1}{2}\theta^2 + \frac{1}{2}\omega^2 \quad (31)$$

식 (31)을 시간에 대해 미분하면 다음과 같고

$$\begin{aligned}\dot{V}(\theta, \omega) &= \theta\dot{\theta} + \omega\dot{\omega} \\ &= \theta(\omega - h\theta) + \omega[-a(\eta) - h]\omega \\ &\quad + \{h[a(\eta) - h] - b(\eta)\}\theta\end{aligned}\quad (32)$$

식 (32)는 quadratic 형태로 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{V}(\theta, \omega) = -[\theta, \omega]^T M(\eta) [\theta, \omega] \quad (33)$$

여기서

$$M(\eta) = \begin{bmatrix} h & -\frac{\delta(\eta) - b(\eta) + 1}{2} \\ -\frac{\delta(\eta) - b(\eta) + 1}{2} & a(\eta) - h \end{bmatrix} \quad (34)$$

이고, $\delta(\eta) = h[a(\eta) - h]$ 이다. 또한 행렬 $M(\eta)$ 은 다음의 부등식을 만족하면 positive definite 이다.

$$4\delta(\eta) > [\delta(\eta) - b(\eta) + 1]^2 \quad |\eta| \leq X_M \quad (35)$$

그리고 식 (35)는 약간의 대수 조작에 의해 다음과 같이 재정리될 수 있다.

$$g_1(\eta) < \delta(\eta) < g_2(\eta) \quad (36)$$

여기서

$$\begin{aligned}g_1(\eta) &= b(\eta) + 1 - 2\sqrt{b(\eta)} \\ g_2(\eta) &= b(\eta) + 1 + 2\sqrt{b(\eta)}\end{aligned}\quad (37)$$

함수 $\delta(\eta)$ 가 파라미터 h, k 에 의존하는 동안 limit 곡선 $g_1(\eta), g_2(\eta)$ 는 식 (27), (37)에 의해서 오직 목표경로만을 따른다. 그러므로 실제 크레인 시스템의 파라미터는 안정성 상태에 영향을 주지 않는다. 그리고 함수 $\delta(\eta)$ 는 limit 곡선 $g_1(\eta), g_2(\eta)$ 가 식 (35)을 만족하는 적당한 영역 χ 안에 놓여질 수 있게 하기 위하여 파라미터 h, k 에 의해서 적절하게 만들어진다.

흔들림각도 θ 가 0 으로 될 때 식 (15a)에 의하여 실제 크레인 시스템의 속도는 목표값으로 근접하게 된다. 그리고 식 (29)의 파라미터 h 는 오직 안정성 해석에서만 나타나고 슬라이딩모드 구조나 제어기에는 아무런 영향을 미치지 않는다. ■

5. 시뮬레이션 및 실험결과

실험을 위해 InTeCo 3D 크레인이 사용되었다(Fig. 2). 3D 크레인은 트롤리, 거더, 추로 구성되어 있으며, 거더는 Y 축방향으로 움직이고 트롤리는 X 축방향으로 이동한다. 3D 크레인은 3 개의 DC 모터에 의해서 구동되며, 트롤리 및 거더의 위치, 로우프의 길이, X-Y 축 방향의 흔들림각도를 각각 측정할 수 있는 5 개의 엔코더를 가지고 있다. 하지만 본 논문에서는 거더는 고정된 상태로 하고 X 축방향의 트롤리만 사용하여 실험하였다. 그리고 작동기 다이



Fig. 2 A laboratory-size model of 3Dcrane

나믹스는 다음과 같은 간단한 형태로 표현할 수 있다.¹

$$\Pi_1 \dot{i} + \Pi_2 t = v - \Pi_3 \dot{r} \quad (38)$$

여기서 $v = [v_1 v_2]^T$ 는 모터의 입력전압벡터를 말하며, $t = [t_1 t_2]^T$ 는 트롤리와 호이스트 모터의 토크를 나타낸다. $r = [x_t l]^T$, $\Pi_i, i=1,2,3$ 은 양한정 대각행렬이다.

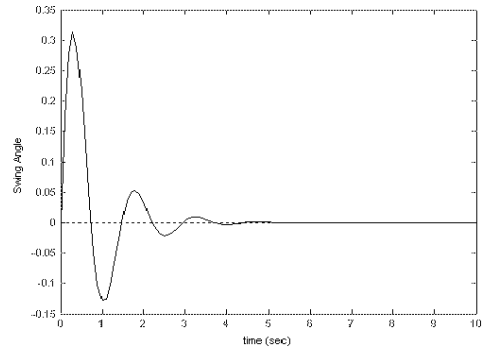


Fig. 3 The simulation result of traveling phase.

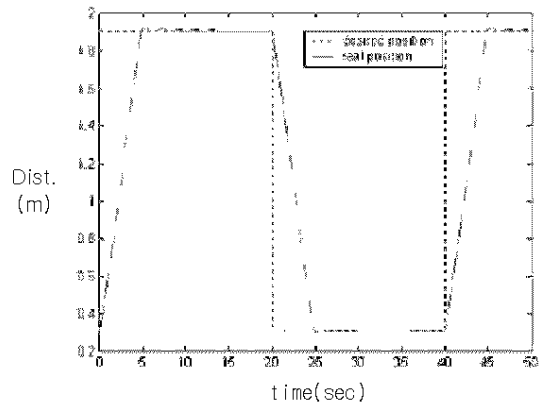


Fig. 4 The actual and reference trolley position.

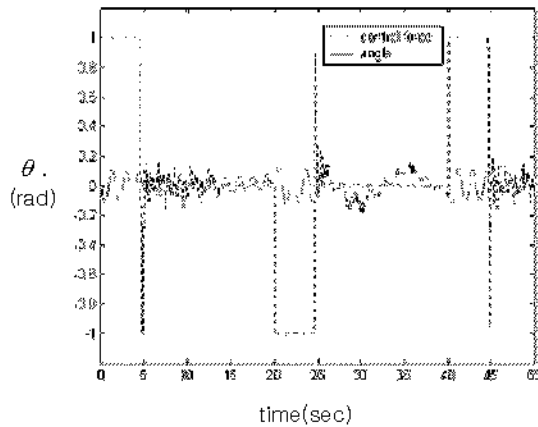


Fig. 5 The actual swing angle and control force.

실험용 3D 크레인의 파라미터는 $M_T = 1.06kg$, $m_c = 0.73kg$ 그리고 로우프의 길이 l 은 예정된 포물선 경로 (18)을 따라서 이동하게 되고 샘플링 시간은 0.01 초이다. 트롤리는 X 축방향으로 1.6m 를 이동한다. Fig 3 은 등속이송구간에서의 MATLAB 을 이용한 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. Fig 4 은 트롤리의 실제값과 목표값을 나타내고 있다. Fig 5 는 흔들림각도와 제어력을 나타낸다.

4. 결론

본 논문은 컨테이너크레인을 사용하여 컨테이너를 빠르고 안정하게 이송시키는 문제를 다루고 있으며, 이를 위해 트롤리의 수평방향 이송 속도제어를 통하여 트롤리가 목표 위치에 도달했을 때 로우프 끝에 매달려 있는 컨테이너의 흔들림을 0 에 가깝도록 2 차 슬라이딩 모드 제어를 설계하였다. 또한 본 논문에서는 모델의 불확실성 및 액추에이터 동역학 모델링이 없음에도 불구하고 컨테이너가 이송되는 동안 흔들림과 예정된 경로를 따라 빠르게 목표지점에 안정하게 도달할 수 있는 2 차 슬라이딩 모드를 기반으로 하는 제어기법을 제안하였고 실험용 3D 크레인을 통한 실험으로 제안된 제어기의 성능을 증명하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업(과제번호: M1-0302-00-0039-03-J00-00-023-10)의 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

1. Bartolini, G, Pisano, A., and Usai, E., "Second-order

sliding-mode control of container cranes," *Automatica*, vol. 38, no. 10, pp. 1783-1790, 2002.

2. Boustany, F. and d'Andrea-Novell, B., "Adaptive control of non-completely controlled mechanical systems using dynamic feedback linearization and estimation design," *Int. J. Adaptive Control and Signal Processing*, vol. 6, no. 6, pp. 589-610, 1992.

3. Fliss, M., Levine, J., and Rouchon, P., "A simplified approach of crane control via generalized state-space model," *Proc. 30th Conference on Decision and Control, Brighton, England*, pp. 736-741, 1991.

4. Hong, K. S., Sohn, S. C., and Lee, M. H., "Sway control of a container crane (part I): modeling, control strategy, error feedback control via reference velocity profiles," *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 23-31, 1997.

5. Hong, K. S., Sohn, S. C., and Lee, M. H., "Sway control of a container crane (part II): regulation of the pendulum sway through patternizing trolley moving velocity," *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 132-138, 1997.

6. Hong, K. S., Park, B. J., and Lee, M. H., "Two-stage control for container cranes," *Japan Soc. Mech. Eng. (JSME), Int. J. of, Series C*, vol. 43, no. 2, pp. 273-282, 2000.

7. Lee, H. H., "Modeling and control of a three-dimensional overhead crane," *Journal of Dynamic System, Measurement, and Control*, vol. 120, no. 4, pp. 471-476, 1998.

8. Mansour, A. K. and Mohamed, Z., "Robust control schemes for an overhead crane," *Journal of Vibration and Control*, vol. 7, no. 7, pp. 395-416, 2000.

9. Okawa, T., Yamaguchi, O., and Sekine, H., "Computer control of overhead crane," *NKK 기보(일본)*, no. 149, pp. 40-45, 1995.

10. Slotine, J. J. and Li, W., *Applied Nonlinear Control*, Prentice-Hall International, Inc., 1991.

11. 박병석, 윤지섭, 이재철, "무진동 크레인을 이용한 흔들림 제어에 관한 연구," *한국자동제어학술회의 논문집*, vol. 1, pp. 292-297, 1990.

12. 박병석, 윤지섭, 강이석, "슬라이딩모드 제어기를 이용한 산업용 천정크레인의 추종제어에 관한 연구," *제어자동화시스템공학 논문지* 제 6 권, 제 11 호, pp. 1022-1032, 2000.

13. 손정기, 최재준, 소명옥, 남택근, 권순재, "LQ 제어 기법을 이용한 컨테이너 크레인의 제어기 설계," *한국박용기관학회지* 제 26 권, 제 5 호, pp. 544-553, 2002.

14. 소명옥, 유희환, 박재식, 남택근, 최재준, 이병찬,

- “떨지제어 기법을 이용한 컨테이너 크레인의 제어
어기 설계,” 한국박용기관학회지 제 27 권, 제 6
호, pp. 759-766, 2003.
15. 윤지섭, 박병석, 이재설, “무진동 크레인의 제어
알고리즘 설계,” 한국자동제어학술회의 논문집,
vol. 1, pp. 260-265, 1989.
 16. 이진우, 이충환, 김상봉, “타워형 크레인의 자동
화를 위한 이론적 고찰 및 디지털 제어에 관한
연구,” 한국자동제어학술회의 논문집, vol. 1, pp.
993-998, 1992.
 17. 홍형주, 이신섭, “크레인 진자계의 최적제어,” 대
한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 832-837,
1995.