

論 文
B 1-3

야드 크레인의 컨테이너 흔들림 제어에 관한 연구

박찬훈* · 박경택* · 김두형* · 신영재*

A Study on Sway Control of Containers of Yard Crane

C. H. Park* · K. T. Park* · D. H. Kim* · Y. J. Shin*

Key Words : 컨테이너(Container), 크레인(Crane), 흔들림 방지(Anti-Sway), 보조로프

Abstract

Yard cranes are very useful equipments for handling of heavy containers. But rope-driven yard cranes must have a little of sway and skew motion because ropes are passive mechanical device. So many researches have been concentrated on anti-sway algorithm controlling trolley speed. These approaches require sway angle. But it is very difficult to know sway angle and its derivative. Therefore control algorithm of trolley speed is not practical in general. On the contrary, control strategy using auxiliary rope is very useful to sway control of yard crane because rope length is shorter than quay-side container cranes. In this paper, we derive equations of motion of trolley system which have anti-sway controller to use auxiliary rope. And we propose the control strategy and analyse the behavior of the proposed system.

1. 서론

야드 크레인의 여러 가지 기술적 문제점과¹⁾ 이러한 문제점을 해결하기 위한 여러 가지 노력들²⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾에 대해서는 이미 많은 논문들이 보고되어 있다. 그러나 현

실적으로 이러한 노력들은 아직까지 크레인의 완전 무인화에 적용하기에는 어려움이 많다는 것 또한 잘 알려진 사실이다. 따라서 본 논문의 저자들은 논문 (3)(4)에서 보조로프를 도입해서 컨테이너의 흔들림을 억제하는 알고리즘을 보고한 바 있다. 논문 (3)(4)에

* 한국기계연구원

서는 보조로프만으로 흔들림을 제어하는 알고리즘을 제안하고 그 효용성을 모의실험을 통해서 입증했다. 이 방법의 장점은 트롤리의 움직임의 속도계적에 상관없이 컨테이너의 흔들림을 억제할 수 있다는 것이다. 즉 운전자에 의한 수동운전이 수행되어서 트롤리의 움직임이 사전에 계획되지 않을 지라도 컨테이너의 흔들림이 억제될 수 있다는 것이다. 또한 풍력 등의 외란이 있을 때에도 흔들림이 최소로 억제될 수 있다는 장점이 있다. 그러나 단점 또한 가지고 있는데 이것은 트롤리의 가감속이 심할 경우 보조로프에 걸리는 장력이 지나치게 커진다는 것이다. 만일 트롤리가 극단적으로 가감속 된다면 보조로프에 걸리는 장력은 메인로프에 걸리는 장력과 그 크기가 거의 유사하게 될 것이다. 이것은 구조적으로 바람직하지 못하다고 생각된다. 물론 이러한 단점을 잘 고려한 운전계획을 세운다면 논문 (3)(4)에서 제안된 제어방식만으로도 훌륭한 성능을 낼 수 있을 것이다. 본 논문에서는 논문 (3)(4)에서 제안된 방식과는 조금 다른 방식을 제안 하고자 한다. 이 방식은 논문 (3)(4)에서 제안된 방식과 상호 보완적인 기능을 가질 것이다. 따라서 실제 크레인의 설계 및 운전시에는 논문 (3)(4)에서 제안된 방식과 본 절에서 제안된 방식이 병용될 수 있다. 본 논문에서 제안된 방식은 컨테이너 흔들림의 억제를 고려해서 트롤리의 운전 패턴을 결정하는 제어기와 풍력 등의 외란을 보상하고 정지후의 잔여 흔들림의 급격한 감소를 위한 보조로프 구동제어기로 구성된다.

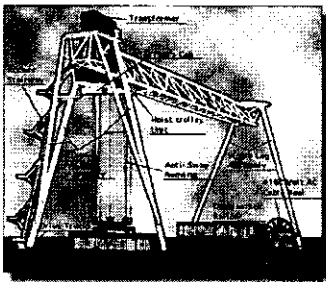


그림 1 야드 크레인

2. 트롤리의 제어에 의한 흔들림의 감소

보조로프를 사용하지 않는 흔들림 제어 알고리즘은 기본적으로 트롤리의 가감속에 의해서 컨테이너의 흔들림을 억제하게 된다.⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾ 즉 트롤리의 가감속에 의해서 컨테이너의 단진자 운동에 댐핑 효과를 부여함으로써 흔들림이 감소된다. 본 논문에서는 이러한 목적에 부합하는 제어기를 특별히 설계하지 않고 기존에 보고된 제어기들의 특성을 고려해서 여러 가지 참고 문헌을 조사하고 모의 실험한 결과 아래 그림 2의 제어알고리즘⁶⁾이 채택되었다. 우선 채택된 제안된 제어전략을 간략히 소개하겠다.

논문 (6)에서는 크레인을 그림 2 및 식 (1)과 같이 모델링 한다. Lagrange 방정식을 이용해서 다음과 같은 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{r^2} \left(\frac{n_t}{n_m}\right)^2 J + M + m_p + m\right) \ddot{x} \\ & + \left(\frac{1}{r^2} \left(\frac{n_t}{n_m}\right)^2 B + D_c\right) \dot{x} - ml\dot{\theta}^2 + ml\ddot{\theta} \cos \theta = f \\ & ml^2 \ddot{\theta} + mgl \sin \theta = -ml\dot{x} \cos \theta \end{aligned} \quad (1)$$

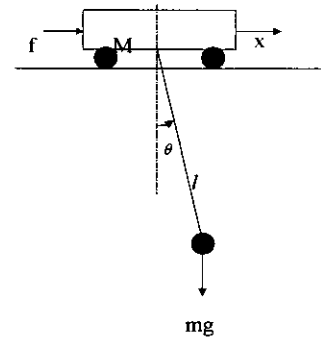


그림 2 크레인의 모델링

여기서, r 은 트롤리 바퀴의 반지름, n_t 와 n_m 은 각각 트롤리와 모터의 동력전달 치차 잇수, J 는 모터의 회전 관성모멘트, M 은 트롤리의 질량, m_p 는 동력전달용 치차와 풀리 등에 의한 등가질량, m 은 부하의 질량, B 는 모터의 회전 점성 마찰계수, D_c 는 트롤리의 점성 마찰계수, g 는 중력가속도이며, θ, x, l, f 는 각각 흔들림각도, 트롤리의 위치, 줄길이 및 트롤리에 작용하는 외력이다. 운동방정식 (1)에서 안정점($\theta=0$)을 중심으로 흔들림이 작은 경우에 대해서 $\sin \theta \cong \theta, \cos \theta \cong 1, \dot{\theta}^2 \sin \theta \cong 0$ 의 근사화가 가능하다. 이

때, 운동방정식 (1)은 아래와 같이 된다.

$$\left(\frac{1}{r^2}\left(\frac{n_t}{n_m}\right)^2 J + M + m_p + m\right)\ddot{x} + \left(\frac{1}{r^2}\left(\frac{n_t}{n_m}\right)^2 B + D_c\right)\dot{x} - ml\ddot{\theta} = f \quad (2)$$

$$ml\ddot{\theta} + mg\theta = -m\ddot{x} \quad (3)$$

트롤리 운동방정식 (2)은 부하 운동방정식 (3)를 이용하여 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$M_e \ddot{x} + D_e \dot{x} - mg\theta = f \quad (4)$$

여 기 서

$$M_e \equiv \frac{1}{r^2} \left(\frac{n_t}{n_m} \right)^2 J + M + m_p \quad (5)$$

$$D_e \equiv \frac{1}{r^2} \left(\frac{n_t}{n_m} \right)^2 B + D_c$$

이다. 문헌(6)에서는 AC 서보 모터와 Vector 토크 서보제어기를 사용하여 모형크레인을 제작하였다. 따라서, 트롤리에 가해지는 힘 f 는 모터의 토크에 의하여 발생한다. Vector 토크 서보제어기 동특성은 트롤리 동특성보다 수 백 배 이상 빠르므로 무시할 수 있다. 즉, $f = \eta \frac{T_m}{r} = \eta \frac{K_t u_v}{r}$ 이다. 여기에서, T_m 은 모터가 발생하는 토크, K_t 는 토크 서보제어기의 토크비례상수, u_v 는 토크서보제어기의 입력이고, η 는 치차와 타이밍 벨트 등에 의한 동력전달효율(1이하)을 나타낸다. 식 (5)를 이용하여 트롤리 운동방정식 (2)를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_e \ddot{x} + D_e \dot{x} - mg\theta = K_s u_v \quad (6)$$

여기에서 $K_s \equiv \eta \frac{K_t}{r}$ 이다. 트롤리의 운동방정식 (6)에서 부하 흔들림에 의한 간섭항($mg\theta$)을 보상하여, 트롤리의 속도 및 위치 제어에 부하 흔들림의 영향을 배제할 수 있다. 이를 위하여, 토크 서보제어기 입력 u_v 를 다음과 같이 선택한다.

$$u_v = u - mg\theta / K_s \quad (7)$$

여기서 u 는 간섭항을 제외한 토크 서보제어기의 입력

을 나타낸다. 따라서, 식 (7)에 의하여 부하의 간섭항을 보정한 트롤리 운동방정식과 부하 운동방정식은 다음과 같다.

$$M_e \ddot{x} + D_e \dot{x} = K_s u \quad (8)$$

$$ml\ddot{\theta} + mg\theta = -m\ddot{x} \quad (9)$$

이제 부하의 간섭항을 보정한 운동방정식 및 부하 방정식을 기초로 그림 3와 같은 트롤리속도 서보제어기 및 위치 서보제어기를 설계한다. 상세한 내용은 문헌(6)을 참고하기 바란다. 이제 계인을 적절히 선정하면 트롤리는 적절히 제어될 것이다. 그러나 아직도 부하의 흔들림에 관해서는 아무런 제어도 이루어지고 있지 않다는 것을 알 수 있다. 문헌 (6)에서는 위상지연 보상을 사용해서 부하 흔들림의 감쇠 특성을 높이는 방법(그림 4)이 제안되었다.

그림 4에서 $\frac{s}{K_p s + K_I}$ 는 위치제어기 $\frac{K_p s + K_I}{s}$ 와 상쇄시켜 부하 흔들림 각에 의한 속도 제어 입력이 부하 흔들림 각에 대하여 위상지연 보상이 되도록 하였다. 계인 및 영점과 극점의 선정에 관한 상세한 내용은 문헌 (6)을 참고하기 바란다. 그림 4에서 X_r 은 트롤리의 기준 위치, θ_r 은 흔들림의 기준값(즉 0), $D(s)$ 는 외란을 의미한다

3. 보조로프에 의한 잔여 흔들림의 감쇠 및 외란의 보상

트롤리가 운전을 시작해서 가속후 최고속도로 등속운동하고, 다시 감속해서 정지할 때 문헌(6)에서 제안된 방식은 확실히 우수한 제어 결과를 보인다. 즉 일 반적으로 가감속 시에는 큰 폭의 흔들림을 보이지만 정속 운전과 정지시에는 작은양의 흔들림이 있도록 트롤리가 적절히 제어된다. 그러나 컨테이너의 흔들림이 완전히 없어지기까지는 상당한 시간이 필요하다는 것이 잘 알려져 있다. 이것은 2절에서 소개된 논문 (6)의 알고리즘이 아니라 하더라도 컨테이너의 흔들림을 트롤리의 위치이동으로 억제하는 거의 모든 제어방식에 있어서 일반적인 현상이다. 따라서 본 절에서는 기존의 방식의 단점을 극복하고자 한다. 본 논문에서는 보조로프를 사용하는 흔들림 억제 장치(그림 5)를 사용

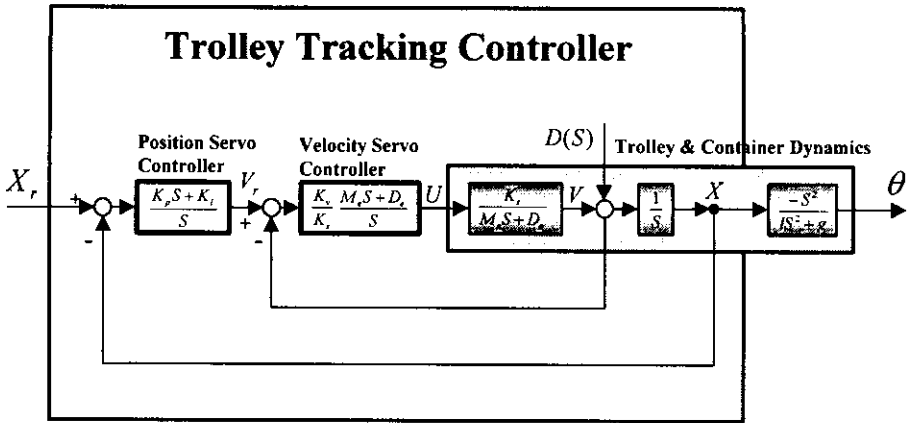


그림 3 Trolley의 위치 서보 제어기

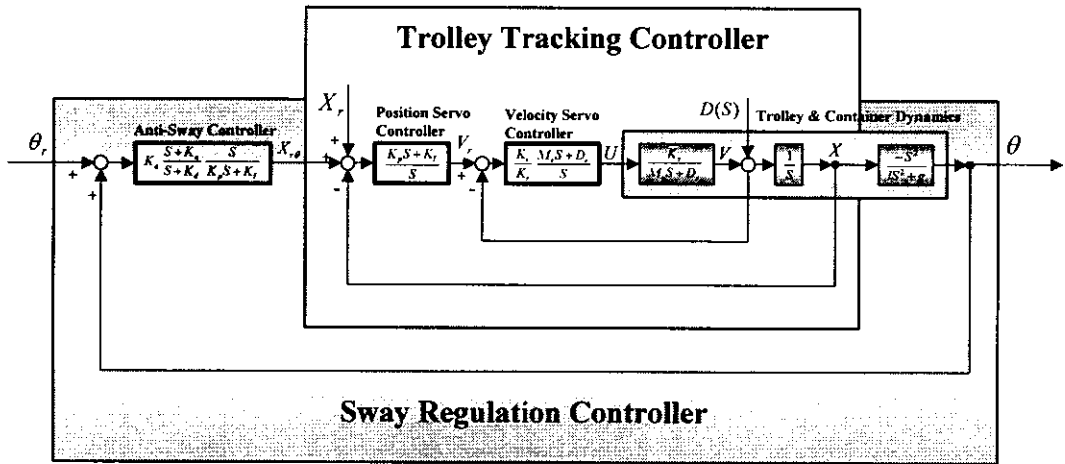


그림 4 부하의 흔들림각 제어기

한다.

그림 5의 각각의 기호의 의미는 아래와 같다.

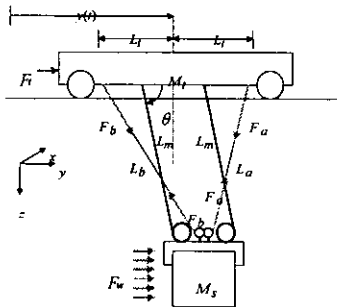


그림 5 크레인의 모델링

- $F_t(t)$: Trolley를 구동하는 외력
- $F_u(t)$: 운반물에 가해지는 풍력
- $F_a(t), F_b(t)$: 보조로프에 걸리는 장력
- L_m : Hoisting Rope의 길이
- L_a, L_b : 보조로프의 길이
- L_t : 보조로프의 편심량
- M_t : Trolley의 질량
- M_s : Container, Headblock 및 Spreader의 질량
- $y(t)$: Trolley의 위치

θ : Spreader의 흔들림 각

그림 6에 관한 자세한 설명은 논문(3)(4)를 참고하기 바란다. 본 논문에서는 제안하는 흔들림 억제 전략은 그림 6에 잘 나타나 있다. 그림 6과 같이 트롤리가 정지위치(최종위치) 근처에 도착하면 보조로프가 작동하기 시작해서 잔여 흔들림(Residual Sway)을 신속히 억제한다.

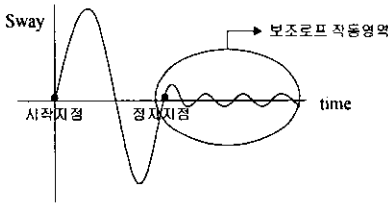


그림 6 흔들림 억제 전략

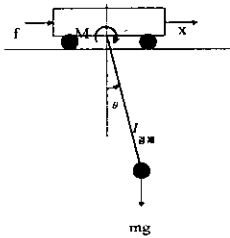


그림 7 강체 운동

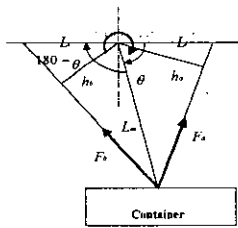


그림 8 VT

이제 보조로프의 제어알고리즘을 소개한다. 그림 7과 같이 만일 컨테이너가 유연한 로프가 아니라 가상의 강체, 즉 막대에 연결되어서 흔들리고 있다면, 막대의 피봇에 모터를 부착하고 이 모터를 구동함으로써 막대에 Torque를 전달해서 컨테이너의 흔들림을 방지할 수 있다. 이때 아래와 같이 간단한 PD 제어만으로 도 우수한 흔들림 억제기를 만들 수 있다.

$$Torque = \theta K_p + \dot{\theta} K_d \quad (10)$$

그러나 컨테이너는 강체가 아닌 유연한 로프에 매달려서 흔들리기 때문에 컨테이너에 Torque를 직접 가할 수 없다. 따라서 보조로프를 이용해서 컨테이너

에 측방향으로 힘을 가해 주어야 한다. 즉, 보조로프에 장력을 가해서 트롤리의 중심을 축으로 적절한 Torque를 가해 줌으로써 흔들림을 감쇠시킬 수 있다. 이때 제어 전략은 식 (10)과 개념적으로는 달라지는 것이 없다. 즉 보조로프를 적절히 작동해서 식 (10)과 동일한 결과가 얻어지면 되는 것이다. 이를 위해서 그림 8을 살펴보자. 그림 8에서는 보조로프와 피봇부분과의 기하학적 관계를 보여준다. F_a 에 의한 피봇에 대한 Torque는 $F_a \cdot h_a$, F_b 에 의한 피봇에 대한 Torque는 $F_b \cdot h_b$ 가 된다. 따라서 아래의 식 (11)의 관계가 만족되면 흔들림은 억제될 수 있는데 이렇게 계산된 Torque를 Virtual Torque(VT)라 부르기로 한다.

$$\begin{aligned} \text{Virtual Torque} &= \theta K_p + \dot{\theta} K_d \\ &= -h_a F_a + h_b F_b \end{aligned} \quad (11)$$

그림 8에 의해서 다음의 관계를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} h_a &= \frac{L_m L_t \sin \theta}{\sqrt{L_m^2 + L_t^2 - 2L_m L_t \cos \theta}} \\ h_b &= \frac{L_m L_t \sin (180 - \theta)}{\sqrt{L_m^2 + L_t^2 - 2L_m L_t \cos (180 - \theta)}} \\ &= \frac{L_m L_t \sin \theta}{\sqrt{L_m^2 + L_t^2 + 2L_m L_t \cos \theta}} \end{aligned} \quad (12)$$

이것을 식 (11)에 대입하면 식 (13)이 얻어진다.

$$\begin{aligned} VT &= \theta K_p + \dot{\theta} K_d \\ &= -h_a F_a + h_b F_b \\ &= -\frac{L_t L_m}{\sqrt{L_m^2 + L_t^2 - 2L_m L_t \cos \theta}} F_a \\ &\quad + \frac{L_t L_m}{\sqrt{L_m^2 + L_t^2 + 2L_m L_t \cos \theta}} F_b \end{aligned} \quad (13)$$

보조로프에는 인장력만 작용할 수 있다는 것을 고려해서 식 13을 정리하면 다음과 같다.

① If Virtual Torque < 0

$$\begin{aligned} F_a &= -VT \times \left(\frac{\sqrt{L_m^2 + L_t^2 - 2L_m L_t \cos \theta}}{L_t L_m} \right) \\ F_b &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

② else

$$F_a = 0$$

$$F_b = VT \times \left(\frac{\sqrt{L_m^2 + L_i^2 + 2L_m L_i \cos \theta}}{L_m L_i} \right) \quad (15)$$

이제 제어전략을 정리해서 그림으로 표현하면 그림 9과 같다. 그림 9에서 Sway Regulation Controller는 컨테이너의 흔들림 정보를 바탕으로 트롤리의 위치를 제어하고, 보조로프 제어기는 흔들림 양에 따라서 보조로프의 장력을 제어한다.

이번 절에서는 앞에서 소개된 제어전략의 유용성을 시뮬레이션을 통해 입증하고자 한다. 본 논문에서 사용된 크레인의 사양은 표 1과 같다. 트롤리의 횡행운동 시에는 메인 로프를 감아 올리거나 감아 내리는 작업은 없는 것으로 간주한다. 이것은 완전 무인 자동화를 고려할 때 타당한 가정이라고 생각된다. 또한 트롤리는 운반물 흔들림의 한 주기 내에 가속되어 최고속도에 도달하고 다시 한 주기 내에 감속하여 정지상태에 도달하도록 한다. $L_m = 9.8m$ 일 경우 운반물 흔들림의 한 주기는 $2\pi\sqrt{\frac{L_m}{g}} \approx 6.2sec$ 가 된다. 이와 같은

4. Simulation 조건

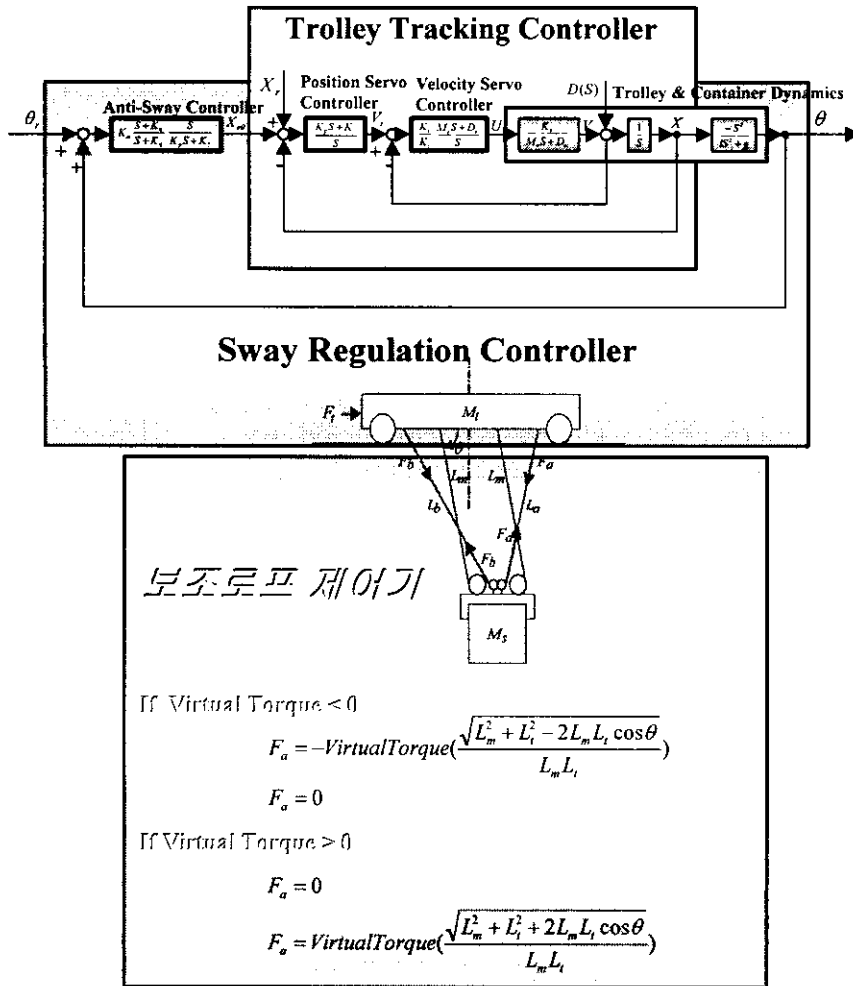


그림 9 제안된 제어알고리즘

패턴으로 가감속 하는 것이 Trolley가 정지한 후의 흔들림을 최소화 할 수 있다. 트롤리의 위치 및 속도 기준선도는 그림 10, 11과 같다. 20초부터 40초까지의 시간은 트롤리의 정지후의 운동형태를 관찰하기 위한 시간이다. 시뮬레이션에 사용된 계인 값은 아래와 같다.

$$K_a = 13.5, K_n = 1.2, \\ K_d = 0.3, K_p = 1.6, K_I = 0, K_c = 24$$

본 보고서에서 사용된 모든 Simulation 결과 그림에서 수평축의 단위는 second를 의미한다. 또한 힘에 해당하는 수직축의 단위는 N이며 길이에 해당하는 수직축의 단위는 meter, 그리고 속도에 해당하는 수직축의 단위는 m/s이다.

Table 2 시뮬레이션을 위한 크레인의 사양

Trolley 질량	$M_t = 40 \times 10^3 \text{ kg}$
Spreader + Container + Head block 질량	$M_s = 30 \times 10^3 \text{ kg}$
메인 로프의 길이	$L_m = 9.8 \text{ m}$
보조로프의 폭	$L_t = 2.3 \text{ m}$
Trolley 이동 최고속도	150m/min

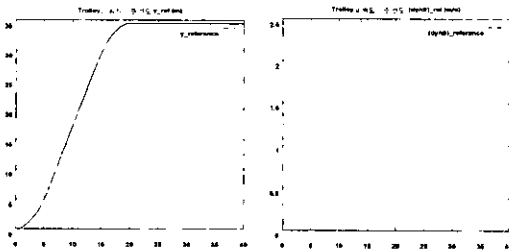


그림 10 Trolley 위치 그림 11 Trolley 속도

5. Simulation : 보조로프를 사용하지 않는 경우 (풍력의 영향이 없는 경우)

그림 9에서 보여지는 제안된 방식에서 보조로프 제거가 작동하지 않는 경우에 대한 시뮬레이션 결과에 대해 논의 하고자 한다. 또한 풍력의 영향이 없는 경우를 고려해 본다.

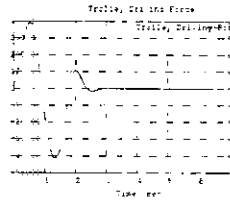


그림 12 $F_t(t)$

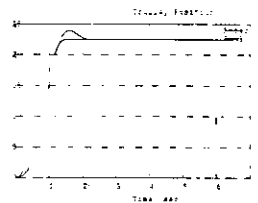


그림 13 $y(t)$

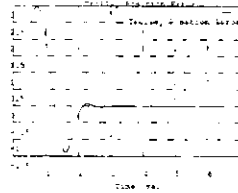


그림 14 $y_{ref} - y_{real}$

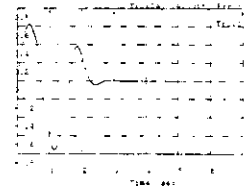


그림 15 $\dot{y}_{ref} - \dot{y}_{real}$

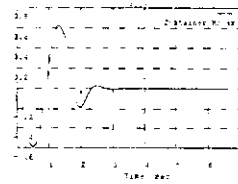


그림 16 Sway

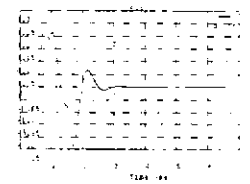


그림 17 $d(\text{Sway})/dt$

그림 12를 보면 트롤리에 인가되는 최대힘이 본 저자의 논문(3)(4)에서 제안된 방식에 비해서 약 25% 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 성능이 문헌(3)(4)에서 제안된 방식에 비해서 나쁘다고 판단할 수 있다. 그러나 이 수치를 문헌(3)(4)에서의 시뮬레이션 결과와 단순 비교하는 것은 의미가 없다. 왜냐하면 문헌(3)(4)에서 제안된 방식은 보조로프에 의해서 매우 큰 힘이 가해져야만 하기 때문에 비용의 측면에서 훨씬 비싸기 때문이다. 이에 비해서 본 논문에서 제안된 방식은 보조로프에 의한 장력의 조절이 매우 작기 때문에 제작이 용이하고 비용이 저렴하다는 장점을 가지고 있다. 그림 12는 트롤리를 구동하는 구동력을, 그림 13은 트롤리의 궤적을, 그림 14는 트롤리의 위치에러의 궤적을, 그림 15는 트롤리의 속도 에러 궤적을, 그림 16은 9.8m 끝단에서의 흔들림량을 m 단위로, 그림 17은 9.8m 끝단에서의 흔들림 속도를 m/s 단위로 보여주고 있다. 흔들림이 거의 한 주기만에 급격히 줄어든다는 것을 알 수 있다. 가감속 과정에서 큰 흔들림이 발생하

지만 이것은 트롤리 가감속 방식으로 흔들림을 제어하는 모든 알고리즘에서 피할 수 없는 현상이다.

6. Simulation : 보조로프를 사용하지 않는 경우 (풍력의 영향이 있는 경우)

본 절에서는 5절에서와 마찬가지로 그림 9에서 보여지는 제안된 방식에서 보조로프 제어가 작동하지 않는 경우에 대한 시뮬레이션 결과에 대해 논의하고자 한다. 그러나 이번에는 풍력의 영향이 있는 경우를 고려해 본다. 풍속은 10m/s로 가정한다. 시뮬레이션 조건은 이전 절에서의 그것들과 동일하다.

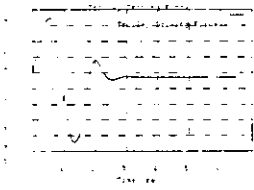


그림 18 $F(t)$

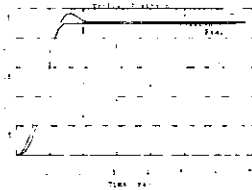


그림 19 $y(t)$

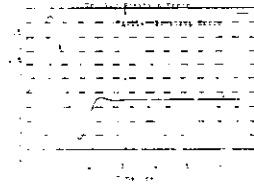


그림 20 $y_{ref} - y_{real}$

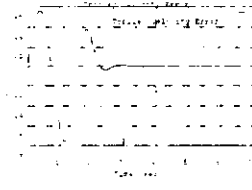


그림 21 $\dot{y}_{ref} - \dot{y}_{real}$

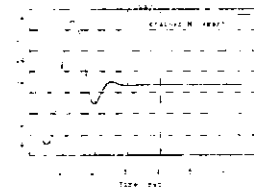


그림 22 Sway

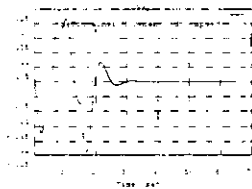


그림 23 $d(Sway)/dt$

그림 18은 트롤리를 구동하는 구동력을, 그림 19는 트롤리의 궤적을, 그림 20은 트롤리의 위치에러의 궤적을, 그림 21은 트롤리의 속도 에러 궤적을, 그림 22는 9.8m 끝단에서의 흔들림량을 m 단위로, 그림 23은 9.8m 끝단에서의 흔들림 속도를 m/s 단위로 보여주고 있다. 흔들림이 거의 한 주기만에 급격히 줄어든다는

것을 알 수 있다. 가감속 과정에서 큰 흔들림이 발생하지만 이것은 트롤리 가감속 방식으로만 흔들림을 제어하는 모든 알고리즘에서 피할 수 없는 현상이다. 풍력의 영향이 없는 경우와 비교해서 가장 큰 차이점은 트롤리의 위치에러와 컨테이너의 부하의 흔들림이 어느 정도 이상 줄어들지 않는다는 것이다. 이것 또한 트롤리 가감속 방식으로만 흔들림을 제어하는 모든 알고리즘에서 피할 수 없는 현상이다. 9.8m 끝단에서 컨테이너의 흔들림 에러는 약 10cm 정도가 계속 남아 있으며, 이로 인해서 바람이 부는 방향으로 트롤리에 지속적인 힘이 가해져서 트롤리 또한 최종위치를 약 20cm 벗어난 채로 있게된다. 따라서 트롤리 가감속 방식으로만 흔들림을 제어하는 알고리즘은 바람의 영향이 클 때 적절하지 못함을 알 수 있다.

7. Simulation : 보조로프를 사용하는 경우 (풍력의 영향이 있는 경우)

그림 9에서 보여지는 제안된 방식에서 보조로프 제어가 작동하는 경우에 대한 시뮬레이션 결과에 대해 논의하고자 한다. 또한 풍력의 영향이 있는 경우를 고려해 본다. 풍속은 10m/s로 가정한다. 모든 시뮬레이션 조건은 6절에서의 그것들과 동일하다.

그림 24는 트롤리를 구동하는 구동력을, 그림 25는 트롤리의 궤적을, 그림 28은 트롤리의 위치에러의 궤적을, 그림 29는 트롤리의 속도 에러 궤적을, 그림 30은 9.8m 끝단에서의 흔들림량을 m 단위로, 그림 31은 9.8m 끝단에서의 흔들림 속도를 m/s 단위로 보여주고 있다. 흔들림이 거의 한 주기만에 급격히 줄어든다는 것을 알 수 있다. 6절의 결과와 비교해보면 성능의 우수성을 한눈에 알 수 있다. 그림 28, 30을 보면 트롤리의 위치에러와 흔들림량이 거의 0으로 수렴함을 알 수 있다. 이것은 보조로프가 풍력의 영향을 상쇄하기 때문인데 그림 26, 27에서 보조로프의 장력이 가해지는 패턴을 이해할 수 있다. 또한 그림 26, 27로부터 바람의 영향을 상쇄하기 위해서 보조로프에 가해지는 장력의 크기를 알 수 있다. 제안된 방식 (그림 9)은 풍력의 영향이 큰 경우에도 매우 유용함을 알 수 있다.

8. 결론

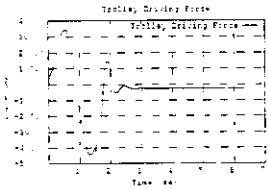


그림 24 $F_x(t)$

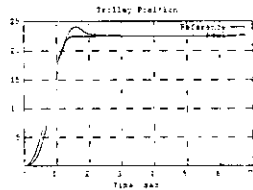


그림 25 $y(t)$

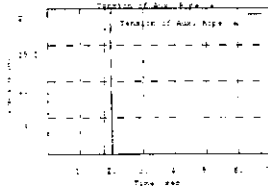


그림 26 $F_a(t)$

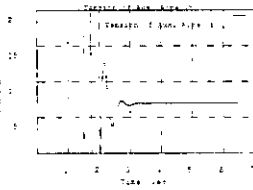


그림 27 $F_b(t)$

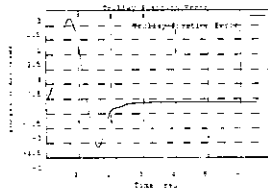


그림 28 $y_{ref} - y_{real}$

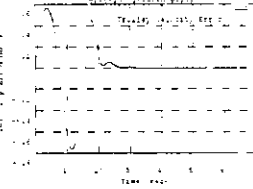


그림 29 $y_{ref} - y_{real}$

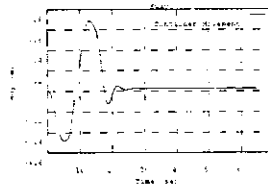


그림 30 $Sway$

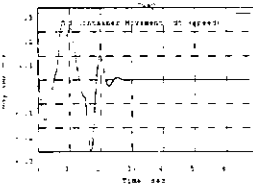


그림 31 $d(Sway)/dt$

본 절에서는 트롤리의 가감속을 이용해서 컨테이너의 흔들림을 억제하는 기존의 알고리즘과 보조로프를 이용해서 흔들림을 억제하는 두 가지 방식을 병용하는 형태의 알고리즘을 제안하고 시뮬레이션을 통해서 그 유용성을 보였다. 제안된 방식의 장점은 문헌(3)(4)에서 제안된 알고리즘에 비해서 보조로프에 걸리는 장력의 크기가 월등히 작아서 실제 제작의 경우에 비용의 측면에서 훨씬 저렴하며 또한 용량이 훨씬 작은 모터를 사용해도 되기 때문에 제작이 용이하다는 것이다. 그러나 이 방식은 큰 단점을 안고 있다. 그것은 트롤리의 가감속시에 컨테이너가 크게 흔들리게 되는데 이것

은 트롤리의 가감속을 이용해서 컨테이너의 흔들림을 억제하는 제어 알고리즘을 사용하는 경우에는 피할 수 없는 현상이다. 30ton이상의 컨테이너가 트롤리의 운행 중에 계속 흔들린다는 것은 매우 위험하다. 더구나 생산성의 향상을 위해서 트롤리의 운전속도를 상향 조절할 경우 이것은 더욱 치명적인 문제가 된다. 따라서 본 저자에 의해서 발표된 문헌(3)(4)에서 제안된 알고리즘과 본 논문에서 제안되는 알고리즘의 적절한 병용으로 훨씬 유용한 결과를 얻을 수 있을것으로 생각된다.

본 연구는 해양수산부 및 과학기술부에서 시행하는 중점국가과제 내용의 일부분입니다.

참고 문헌

- 1) 박찬훈, 박경택, 무인 젠트리 크레인, 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp. 696~699, 1999
- 2) 박찬훈, 박경택, 김두형, 신영재, 새로운 형태의 컨테이너 크레인의 개발에 관한 연구, 한국항만학회 추계학술대회논문집, pp. 273~280, 1999
- 3) 박찬훈, 박경택, 김두형, 신영재, 야드 크레인의 컨테이너 흔들림 제어에 관한 연구, 한국항만학회 춘계학술대회논문집, pp. 64~71, 2000
- 4) 박찬훈, 박경택, 김두형, 보조로프를 이용한 젠트리 크레인의 흔들림 제어에 관한 연구, 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp. 343~346, 2000
- 5) 조대승, 컨테이너 크레인의 헤드블록 횡동요 해석, 한국소음진동학회지, 제 7권, 제 5호, pp. 765~772, 1997
- 6) 이호훈, 조성근, 천장크레인 부하의 위치 및 흔들림 제어, 대한기계학회논문집(A), 제 21권, 제 2호, pp. 297~304, 1997
- 7) 홍금식, 손성철, 이만형, 컨테이너 크레인의 흔들림 제어(Part I): 모델링, 제어전략, 기준선도를 통한 오차 피드백 제어, 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제 3권, 제 1호, pp.23~31, 1997
- 8) 홍금식, 손성철, 이만형, 컨테이너 크레인의 흔들림 제어(Part II): 트롤리 주행속도 조절을 통한 진자운동의 제어, 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제 3권, 제 2호, pp. 132~138, 1997