

자동화 크레인을 위한 흔들림 방지 시스템

박찬훈*(한국기계연구원), 김두형(한국기계연구원), 박경택(한국기계연구원)

Anti-Sway System for Automated Crane

C. H. Park(KIMM), D. H. Kim(KIMM), K. T. Park(KIMM)

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. But control algorithm of trolley speed is not practical in windy weather. In this paper, we are going to propose a new structure for anti-sway. This structure uses aux. ropes. The control strategy with 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.

Key Words : Anti-Sway(흔들림 방지), Crane(크레인), Sway Sensor(흔들림 감지 센서), Aux. Rope(보조로프), Residual Sway(잔여 흔들림)

1. 서론

야드 크레인은 항만에서 최고 40~60ton의 컨테이너를 하역·적재하는 경우에 사용되는 매우 유용한 핸들링용 장비이다. 야드 크레인은 다른 운송 수단에 비해서 운반물의 유지 기구가 간단할 뿐만 아니라 중량물을 쉽게 취급할 수 있고 운반물이 공중에서 이동하므로 운송 경로나 운반물을 취급하는 위치의 자유도가 높다. 야드 크레인을 이용한 이송 과정은 컨테이너를 들어 올리는 동시에 가속을 하고 일정 지점까지 등속으로 움직이다가 목표 지점의 일정 위치 근처에서 감속과 동시에 물건을 내리는 일련의 동작으로 이루어져 있다. 운송에 따른 운반물의 진동 발생은 피할 수 없으며 원활하고 안전한 운전을 위해서는 숙련된 운전자가 필요하다. 그러나 항만장비의 자동화를 위한 노력이 근래에 들어서 활발히 이루어지고 있으며, 실제로 자동화가 상당부분 이루어진 항만이 생겨나고 있다. 이러한 현실에 대처하기 위해서 과거 2년간 자동화 항만에 적합한 크레인 에 관한 다양한 연구가 진행되었으며, 본 논문에서는 자동화 크레인에 적합한 흔들림 방지기술에 관해서술하고자 한다.

2. 흔들림 방지를 위한 크레인의 구조

본 논문에서는 자동화 크레인의 흔들림 방지를 위하여 Fig. 1과 같은 구조를 제안한다. 이 구조에서 특이한 점은 메인 로프로 컨테이너의 하중을 지지함과 동시에 보조로프로 흔들림을 억제하는 것이다. Fig. 1 (a)는 개략적인 구조를 보여주고 있으며 Fig. 1 (b)는 보조로프에 걸리는 힘의 관계를 잘 보여주고 있다. 즉 컨테이너를 내리거나 올리는 작업을 위해서 메인 드럼을 풀어주거나 감아줄 때 보조로프도 동시에 풀리거나 감기게 된다. 따라서 보조로프 장력을 제어하기 위해 어떤 구동원이 사용되는 간에 보조로프를 풀어주거나 감아주는 작업을 고려할 필요가 없으며 단지 장력의 제어만을 고려하면 된다. Fig. 1에서 각각의 기호의 의미는 아래와 같다.

$F_t(t)$: Trolley를 구동하는 외력

$F_w(t)$: 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

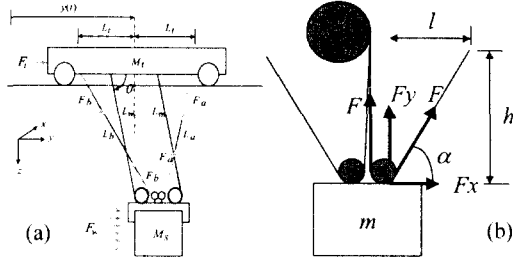


Fig. 1 Proposed Structure for Automated Crane

3. 제어기의 설계

제안된 구조의 Anti-Sway 제어 시스템의 제어를 위해서는 2가지 형태의 방법을 생각할 수 있다. 첫째는 보조로프의 장력을 Trolley의 운전 중에 적극적으로 제어하여 화물의 흔들림이 처음부터 끝까지 거의 발생하지 않도록 하는 방법이다. 이 방식은 논문 [1][2]에서 이미 제안한 바 있다. 그러나 이 방식 매우 우수한 성능을 보임에도 불구하고 Trolley 가속도의 측면에서 구조적인 단점을 가지고 있음도 이미 보인바 있다[1][2]. 두 번째 방식은 Trolley가 목표지점에 도달할 때까지 발생하는 화물의 흔들림은 Trolley의 가속속만으로 제어하고 이후의 잔여 흔들림을 보조로프로 급격히 감쇠 시키는 방식이다. 이 방법은 보조로프 작동을 위해서 첫 번째 방식보다 더 작은 용량의 구동원을 요구하기 때문에 실용적 측면에서 더 우수하다고 할 수 있다. 그러나 흔들림 억제 측면에서는 전자가 더 우수한 성능을 보인다. 제안되는 제어기는 두 번째 방식의 제어기이며 Trolley의 운전에 의한 흔들림 제어기와 보조로프의 장력 제어에 의한 잔여 흔들림 제어기로 구성된다.

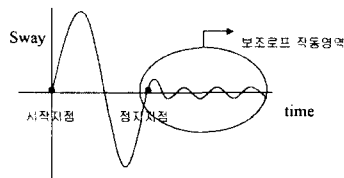


Fig. 2 Proposed Method for Residual Sway

3.1 Trolley의 운전에 의한 흔들림의 감쇠

Trolley의 운전에 의한 흔들림의 제어는 문헌[3]의 결과를 그대로 이용한다. 이 제어기는 Trolley Tracking Controller와 Anti-Sway Controller의 두 부분으로 나뉘어 진다. 기본적으로 Trolley Tracking Controller에서는 Trolley가 레퍼런스 위치를 추종하도록 하고, Anti-Sway Controller에서는 Sway가 억제 되도록 레퍼런스 위치를 변형시킨다. 이 제어기에 관한 상세한 내용은 문헌 [3]를 참고하기 바란다.

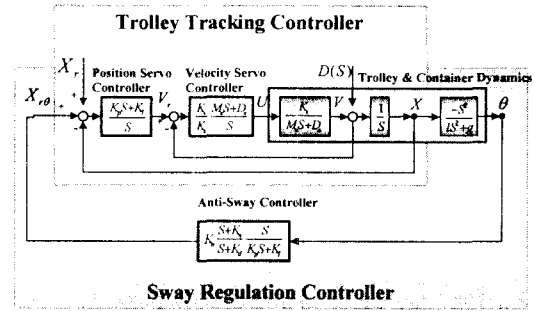


Fig. 3 Trolley Controller For Anti-Sway

3.2 보조로프 제어에 의한 잔여흔들림의 감쇠

Fig. 2와 같이 트롤리가 정지위치(최종위치) 근처에 도착하면 보조로프가 작동하기 시작해서 잔여 흔들림(Residual Sway)을 억제한다. Fig. 4(a)와 같이 만일 컨테이너가 유연한 로프가 아니라 가상의 강체의 피봇에 모터를 부착하고 이 모터를 구동함으로써 막대에 Torque를 전달해서 컨테이너의 흔들림을 방지할 수 있다.

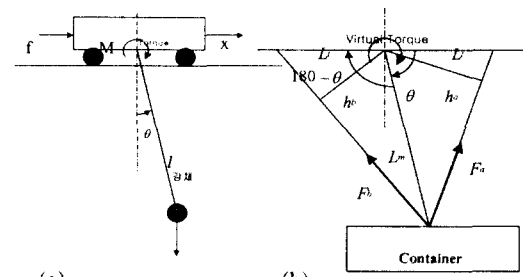


Fig. 4 Virtual Torque for Tension Control

그러나 컨테이너는 강체가 아닌 유연한 로프에 매달려서 흔들리기 때문에 컨테이너에 Torque를 직접 가할 수 없다. 따라서 보조로프를 이용해서 컨테이너에 측방향으로 힘을 가해 주어야 한다. 즉, 보조로프에 장력을 가해서 트롤리의 중심을 축으로 적절한 Torque를 가해 줌으로써 흔들림을 감쇄시킬 수 있다. 이를 위해서 Fig. 4 (b)를 살펴보자. 이 그림에

서는 보조로프와 피봇 부분과의 기하학적 관계를 보여준다. Fa에 의한 피봇에 대한 Torque는 Fa*ha, Fb에 의한 피봇에 대한 Torque는 Fb*hb가 된다. 따라서 Eq. 1의 관계가 만족되면 흔들림은 효과적으로 억제될 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{VirtualTorque} &= \theta K_p + \dot{\theta} K_d \\ &= -h_a F_a + h_b F_b \end{aligned} \quad (1)$$

Fig. 3의 기하학적인 관계로부터 Eq. 2를 얻을 수 있다.

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

이 식을 Eq. 1에 대입하면 Eq. 3이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \text{VirtualTorque} &= \theta K_p + \dot{\theta} K_d \\ &= -h_a F_a + h_b F_b \\ &= -\frac{L_t L_m}{\sqrt{L_m^2 + L_t^2 - 2L_m L_t \cos \theta}} F_a \\ &\quad + \frac{L_t L_m}{\sqrt{L_m^2 + L_t^2 + 2L_m L_t \cos \theta}} F_b \end{aligned} \quad (3)$$

이것을 정리하면 다음과 같다.

① If VirtualTorque < 0

$$\begin{aligned} F_a &= -\text{VirtualTorque} \left(\frac{\sqrt{L_m^2 + L_t^2 - 2L_m L_t \cos \theta}}{L_t L_m} \right) \\ F_b &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

② else

$$\begin{aligned} F_a &= 0 \\ F_b &= \text{VirtualTorque} \left(\frac{\sqrt{L_m^2 + L_t^2 + 2L_m L_t \cos \theta}}{L_t L_m} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

3.3 Simulation

제안된 방식의 유효성을 시뮬레이션을 통해서 논의하고자 한다. 또한 풍력의 영향이 있는 경우를 고려해 본다. 풍속은 10m/s로 가정한다. 본 논문에서 사용된 모든 Simulation 결과를 보여주는 그림들에서 수평축의 단위는 second를 의미한다. 또한 힘에 해당하는 수직축의 단위는 N이며 길이에 해당하는 수직축의 단위는 meter, 그리고 속도에 해당하는 수직축

의 단위는 m/s이다. 시뮬레이션에 사용된 Crane의 Spec.은 Table 1과 같다. 사용된 계인은 Eq. 6과 같다.

$$\begin{aligned} K_a &= 13.5, \quad K_n = 1.2, \quad K_d = 0.3, \\ K_p &= 1.6, \quad K_t = 0, \quad K_v = 24 \end{aligned} \quad (6)$$

Table 1. Simulation을 위한 Spec.

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

Fig. 5(a)는 트롤리의 궤적과 화물의 흔들림을, 그리고 Fig. 5(b)는 잔여 흔들림을 신속히 감쇠하기 위해서 인가되는 Aux. Rope의 장력을 보여준다. 흔들림이 거의 한 주기만에 급격히 줄어들었다는 것을 알 수 있다. Fig 5(a)를 보면 트롤리의 위치어러와 흔들림 량이 거의 0으로 수렴함을 알 수 있다. 이것은 보조로프가 풍력의 영향을 상쇄하기 때문인데 그림 Fig. 5(b)에서 풍력의 영향을 상쇄하기 위해서 보조로프에 가해지는 장력의 크기를 알 수 있다. 제안된 방식은 풍력의 영향이 큰 경우에도 매우 유용함을 알 수 있다.

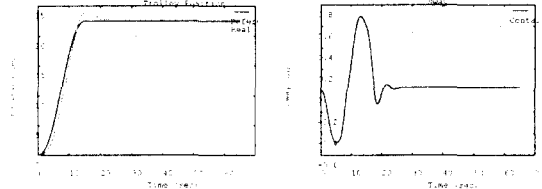


Fig. 5(a) Simulation Result : Trolley Position & Sway

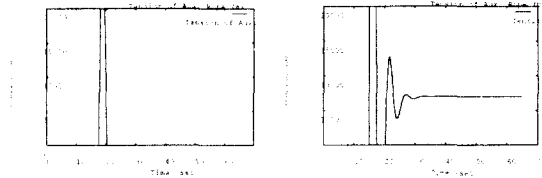


Fig. 5(b) Simulation Result : Aux. Rope Tension

4. 실험을 통한 검증

제안된 구조와 알고리즘의 유효성을 검증하기 위해서 Fig 6(a)에 보이는 실험장치를 제작하였다. Rope의 장력은 Road Cell로 측정되며, 흔들림은 IR

센서(Fig. 6(c))에 의해서 감지될 수 있다. 정확한 Sway 센싱을 위하여 8개의 엔코더도 추가로 부착하였다. Fig. 6(b)는 Trolley의 형상인데 4개의 보조로프 구동모터가 설치되어있다.

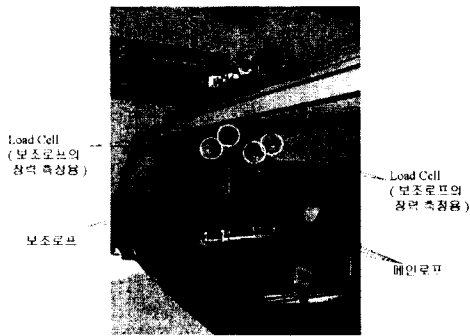


Fig. 6(a). Anti-Sway Test Equipment

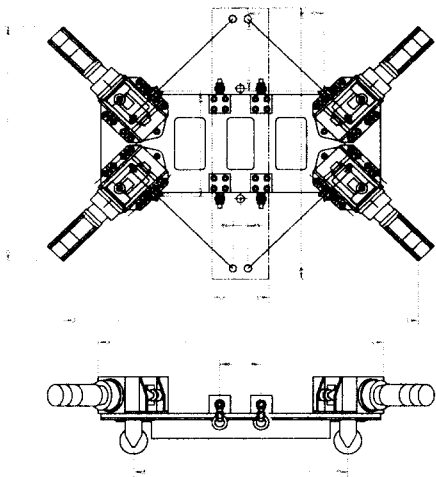


Fig. 6(b). Anti-Sway Test Equipment: Trolley Part

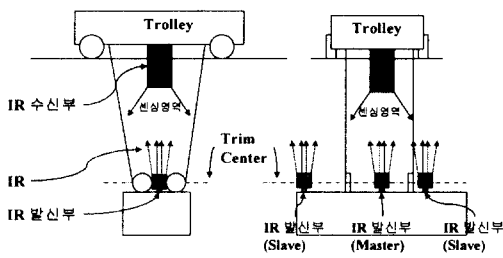


Fig. 6(c). Anti-Sway Test Equipment : IR Sensor

아직 보조로프 구동부분의 하드웨어적인 설치가 완성되지 않아서 3.2에서 제안된 알고리즘의 검증은

행해지지 못했고 3.1에서 소개된 Trolley의 운전에 의한 흔들림의 감쇠에 관한 실험이 수행되었다. Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)로부터 흔들림의 감쇠가 1주기 내에서 만족할 만한 수준으로 이루어짐을 알 수 있다.

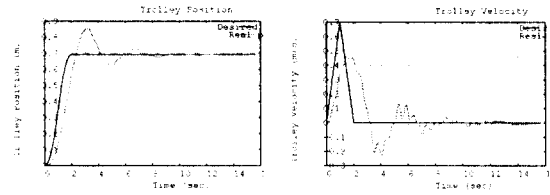


Fig. 7(a) Exp. Result : Trolley Position & Velocity

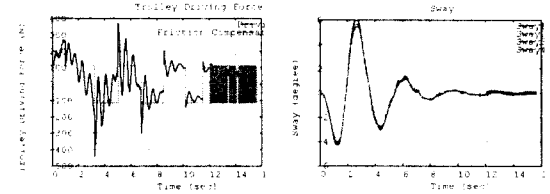


Fig. 7(b) Exp. Result : Trolley Driving Force & Sway

5. 결론

본 논문에서는 자동화 크레인에 적합한 흔들림 방지 시스템의 구조에 관한 연구결과를 소개하고, 그 유효성을 Simulation과 실험을 통하여 검증하였다. 실험을 통해 완전히 검증되지 못한 알고리즘은 후후의 연구를 통하여 수행될 것이다.

후기

본 연구는 해양수산부에서 지원하는 자동 트랜스퍼 크레인 설계 및 제어기술 개발 과제 의 연구 결과입니다.

참고문헌

1. 박찬훈, 박경택, 김두형, "보조로프를 이용한 겐트리 크레인의 흔들림 제어에 관한 연구," 한국정밀공학회, pp. 343-346, 2000.
2. 박찬훈, 박경택, 김두형, "야드 크레인의 컨테이너 흔들림에 관한 연구," 한국항만학회 춘계학술대회 논문집, pp. 64-71, 2000.
3. 이호훈, 조성근, "천장크레인의 부하의 위치 및 흔들림 제어," 대한기계학회논문집(A), 제 21권, 제 2호, pp. 297-304, 1997.