

보조로프를 이용한 야드크레인의 안티스웨이 시스템

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

The Anti-Sway System for Yard Crane Using Auxiliary Ropes

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

ABSTRACT

The development of automated container terminal has been a hot issue for recent years. It's very natural because it's very important how many containers, how soon, and how precisely a container terminal can treat. A crane treats a very heavy container, maybe, no less than 20 ~40 tons, thus most cranes use ropes to take up and land containers. But rope causes the sway of a container and this phenomenon is not avoided. On the ground of this, in most case, how much skillful a driver is may affect the productivity of a yard or quay crane. Thus many researches have been concentrated on the development of the control algorithm for a crane which may be useful and robust enough to drive a crane without any human driver. Authors of this paper also are interested in this kind of research but we have been much more interested for years in the development of a mechanical structure which may cause much less sway than the existing cranes do. In this paper, we may introduce the basic structure of the developed anti-sway system.

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

1. 서론

우리 나라와 같이 수출입에의 의존도가 높은 나라에서는 효율적인 항만의 관리가 국가 경쟁력의 향상을 위해서 매우 중요함은 별도의 설명이 필요 없으리라 생각된다. 더욱이 우리는 3면이 바라로 쌓여 있고, 중국, 일본이라는 거대한 경제 대국과 인접해 있는 만큼 동북아의 허브항의 역할을 수행할 수 있는 고효율/대용량 항만의 건설은 가히 국운과 연결된다 해도 과언이 아닐 것이다. 이와 같은 막대한 물동량을 신속히 효율적으로 처리할 수 있는 고효율 항만의 건설은 비단 우리나라 뿐만 아니라 전 세계적으로 관심의 대상이 되어오고 있으며, 현재 많은 나라에서 이러한 목표를 가지고 현대식 항만을 건설 중에 있다.

그러나 이러한 고효율/대용량의 항만의 건설에는 그 기본이 되는 장비들의 현대화가 가장 필수적이다. 물론 항만의 운영 방식의 전산화를 통해서 물동량의 처리 능력을 키울 수도 있지만 이것만으로는

부족하다. 현재 항만에 사용되는 기본적인 장비 중 가장 큰 비중을 차지하는 것은 바로 크레인이다. 크게 나누어 Quay Side Crane과 Yard Crane으로 나눌 수 있지만 어느 것이든 항만의 물동량 처리능력에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 이 Crane을 얼마나 효율적으로 운영할 수 있느냐에 따라서 항만의 경쟁력이 결정된다고 할 수 있을 것이다.

기존의 항만에서 사용되는 대부분의 크레인의 작게는 10여 톤에서 많게는 40여 톤까지의 컨테이너를 취급하게 된다. 이렇게 무거운 컨테이너를 원하는 위치까지 신속히 이동해서 정확히 쌓아 올리거나 내리는 일은 언뜻 생각해도 쉬운 일이 아니다. 운전자의 숙련정도에 따라서 효율에는 상당한 차이가 있을 수밖에 없다. 이것은 기존의 크레인의 구조에 그 근본적인 문제가 있기 때문이다. 아래 Fig. 1은 기존 크레인의 기본적인 구조를 보여준다. 그림과 같이 컨테이너는 로프에 매달려서 트롤리를 따라 이동한다. 로프에 매여있기 때문에 흔들림의 발생은 피할 수가 없다. 다만 트롤리의 가속도를 제어함으로써 컨테이

너의 흔들림의 정도를 완화시킬 수는 있으며, 실제로 크레인의 성능을 향상시키고자 하는 대부분의 연구는 이러한 트롤리의 적절한 운전을 통한 컨테이너의 흔들림의 감소에 집중되어왔다. 실제로 육내에서 사용되고, 매우 느린 크레인의 경우에는 상용화된 사례들도 많다.

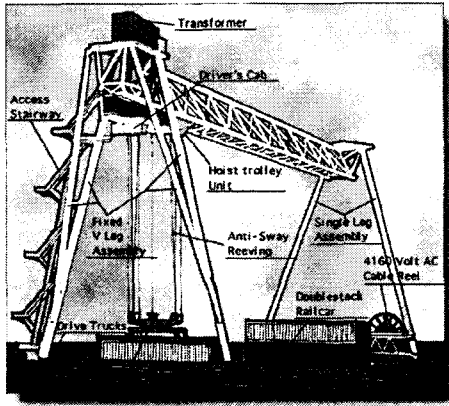


Fig. 1 The basic structure of a yard crane

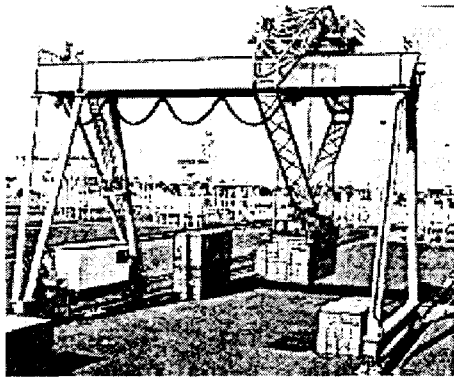


Fig. 2 The crane which protects the sway of container using mechanical arms

그러나 트롤리 운전의 신속성은 크레인의 생산성과 직결되는 문제이기 때문에 흔들림의 억제를 위해서 트롤리의 속도를 희생할 수도 없다는 것이 현실이다. 이 때문에 로프로 구동되는 방식을 포기하고 Fig. 2에 보이는 형태의 크레인이 개발되어 실제로 상용화에 성공한 예도 있다. 그러나 이러한 형태의 장비의 경우 3단 이상으로 컨테이너를 쌓지 못한다. 이것은 컨테이너의 흔들림을 방지하기 위해 설치된 기구부가 컨테이너와 간섭을 일으키기 때문이다. 따라서 우리나라와 같이 좁은 지역에 많은 수의 컨테

이너를 처리해야 하는 조건에는 적합하지 못하다. 참고로 국내의 대부분의 항만에는 기본적으로 5단적을 사용하고 있다.

따라서 본 논문의 저자들은 기존의 크레인이 가지고 있는 대용량/고단적의 장점은 그대로 가지고 있으면서 흔들림은 최대한으로 억제할 수 있는 크레인의 구조와 제어에 관해 연구해오고 있다. 본 논문에서는 이에 관해 소개하고자 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. 3 (a)는 개략적인 구조를 보여주고 있다.

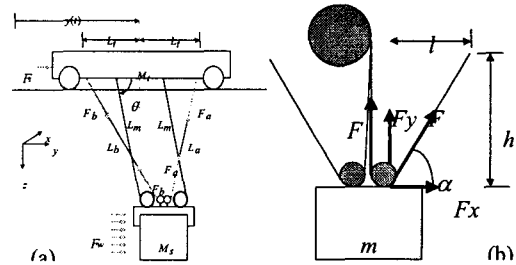


Fig. 3 Proposed Structure for Automated Crane

제안된 구조의 크레인은 기존의 크레인과 마찬가지로 로프에 의해서 컨테이너가 지지되는 것은 동일하다. 그러나 기존의 크레인과는 달리 추가적인 로프가 부착이 되어있는데 이렇게 추가된 로프는 컨테이너의 좌우에 쌍으로 부착되어서 원하는 힘으로 컨테이너를 잡아당길 수 있다. 즉, 비록 로프에 의해서 구속되기 때문에 흔들림은 필연적으로 발생하지만 추가적으로 부착된 로프에 의해서 발생한 흔들림을 억제할 수 있다. 물론 이러한 추가적인 로프의 부착 없이도 트롤리의 가속속을 잘 이용하면 흔들림을 상당부분 억제할 수 있지만 이것은 트롤리 운전 속도에 제약을 가해서 결과적으로는 크레인의 생산성의 약화를 가져온다. 그러나 제안된 구조의 크레인에서는 흔들림을 억제하기 위해 트롤리의 운전패턴에 거의 어떤 제약도 가할 필요가 없다. Fig. 3 (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 제어하

기 위해 어떤 구동원이 사용되든 간에 보조로프를 풀어주거나 감아주는 작업을 고려할 필요가 없으며 단지 장력의 제어만을 고려하면 된다. Fig. 3에서 각각의 기호의 의미는 아래와 같다.

- $F_f(t)$: 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

3. 보조로프의 Feedforward Control Law

Lagrange 방정식에 의하여 Eq. 1, 2와 같은 운동 방정식을 얻을 수 있다. 만일 트롤리의 제어와 보조로프의 제어가 적절히 이루어진다면 $F_w=0$ 일 경우 $\theta \cong 90^\circ, \dot{\theta} \cong 0, \ddot{\theta} \cong 0$ 의 결과를 얻을 수 있다. 이제 이것을 Eq. 1,2에 대입하면 다음과 같은 Eq. 3, 4의 결과를 얻게된다. 이를 Eq. 1, 2에 대입하면 Eq. 5, 6의 관계를 얻을 수 있다.

$$(M_s + M_t) \ddot{y} - L_m M_s \cos \theta \ddot{\theta}^2 - L_m M_s \sin \theta \ddot{\theta} = F_t + F_w \quad (\text{Eq. 1})$$

$$L_m^2 M_s \ddot{\theta} - L_m M_s g \cos \theta - L_m M_s \sin \theta \ddot{y} = \left(-\frac{F_a L_t}{\sqrt{L_m^2 + L_t^2} - 2L_m L_t \cos \theta} + \frac{F_b L_t}{\sqrt{L_m^2 + L_t^2} + 2L_m L_t \cos \theta} - F_w \right) L_m \sin \theta \quad (\text{Eq. 2})$$

$$F_t = (M_t + M_s) \ddot{y} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$\ddot{y} = (F_a - F_b) \left(\frac{L_t}{M_s \sqrt{L_m^2 + L_t^2}} \right) \quad (\text{Eq. 4})$$

$$F_a - F_b = \left(\frac{M_s \sqrt{L_m^2 + L_t^2}}{(M_t + M_s) L_t} \right) F_t \quad (\text{Eq. 5})$$

즉 두 개의 보조로프 사이의 장력의 차이가 Eq. 5와 같이 되도록 해줌으로써 운반물의 흔들림 발생

을 막을 수 있다. F_a, F_b 가 항상 양의 값을 고려하면 다음의 결과를 얻을 수 있다.

① $F_t > 0$ 일 경우

$$F_a = \left(\frac{M_s \sqrt{L_m^2 + L_t^2}}{(M_t + M_s) L_t} \right) F_t, \quad F_b = 0 \quad (\text{Eq. 6})$$

② $F_t < 0$ 일 경우

$$F_a = 0, \quad F_b = \left(\frac{M_s \sqrt{L_m^2 + L_t^2}}{(M_t + M_s) L_t} \right) F_t \quad (\text{Eq. 7})$$

Eq. 6, 7은 트롤리를 가감속하는 힘의 크기만 알면 흔들림을 완전히 억제하기 위한 보조로프의 힘의 크기를 결정할 수 있음을 말해준다. 만일 시스템 전체에 아무런 외란이 없고 트롤리에 가해지는 힘의 크기를 정확히 알 수 있고, 수학적으로 가정한 모든 사항들이 만족된다면 Eq. 6, 7에서 주어진 대로만 보조로프를 제어한다면 흔들림은 완전히 억제될 것이다. 그러나 외란은 어떤 형태로든 존재할 것이고 수학적 모델링은 에러를 포함하고 있으며 마찰력 등에 의해 트롤리에 가해지는 힘의 크기의 측정도 에러를 포함하고 있을 것이므로 피드백항이 필요하게 된다.

4. 보조로프의 Feedback Control Law

만일 컨테이너가 유연한 로프가 아니라 가상의 강체의 피봇에 부착되어 있다면 (Fig. 4 a) 모터를 부착하고 이 모터를 Eq. 8을 따라서 구동해서 흔들림을 억제할 수 있다. 그러나 현실에서는 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 그림에서는 보조로프와 피봇 부분과의 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 Eq. 9의 관계가 만족되면 흔들림은 효과적으로 억제될 수 있다. 여기서 Virtual Torque는 Fig. 4 (a)를 고려할 때 모터가 내야 하는 출력이다. Fig. 4 (b)의 기하학적인 관계로부터 Eq. 10을 얻을 수 있다. 이 식을 Eq. 9에 대입하면 Eq. 11이 얻어진다. 이것을 정리하면 Eq. 12, 13을 얻을 수 있다.

이제 Feedforward Control Law로 Eq. 6, 7을, 그리고 Feedback Control Law로 Eq. 12, 13을 사용함으로

써 컨테이너의 흔들림이 억제되도록 보조로프를 적절히 제어할 수 있다.

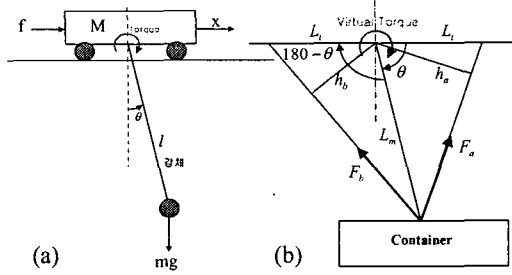


Fig. 4 Virtual Torque for Tension Control

$$Torque = \theta K_p + \dot{\theta} K_d \quad (\text{Eq. 8})$$

$$VirtualTorque = \theta K_p + \dot{\theta} K_d = -h_a F_a + h_b F_b \quad (\text{Eq. 9})$$

$$h_a = \frac{L_m L_t \sin \theta}{\sqrt{L_m^2 + L_t^2 - 2L_m L_t \cos \theta}}$$

$$h_b = \frac{L_m L_t \sin (180 - \theta)}{\sqrt{L_m^2 + L_t^2 - 2L_m L_t \cos (180 - \theta)}} \quad (\text{Eq. 10})$$

$$= \frac{L_m L_t \sin \theta}{\sqrt{L_m^2 + L_t^2 + 2L_m L_t \cos \theta}}$$

$$VirtualTorque = \theta K_p + \dot{\theta} K_d = -h_a F_a + h_b F_b = -\frac{L_t L_m}{\sqrt{L_m^2 + L_t^2 - 2L_m L_t \cos \theta}} F_a + \frac{L_t L_m}{\sqrt{L_m^2 + L_t^2 + 2L_m L_t \cos \theta}} F_b \quad (\text{Eq. 11})$$

① If VirtualTorque < 0

$$F_a = -VirtualTorque \left(\frac{\sqrt{L_m^2 + L_t^2 - 2L_m L_t \cos \theta}}{L_t L_m} \right) \quad (\text{Eq. 12})$$

$$F_b = 0$$

② else

$$F_a = 0$$

$$F_b = VirtualTorque \left(\frac{\sqrt{L_m^2 + L_t^2 + 2L_m L_t \cos \theta}}{L_t L_m} \right) \quad (\text{Eq. 13})$$

5. 실험장치

제안된 구조와 알고리즘의 유효성을 검증하기 위해서 Fig 5에 보이는 실험장치를 제작하였다. Rope의

장력은 Road Cell로 측정되며, 흔들림은 IR 센서에 의해서 감지될 수 있다. 정확한 Sway 센싱을 위하여 8개의 엔코더도 추가로 부착하였다. 4개의 보조로프 구동모터가 설치되어있다. 실험결과는 지면관계상 생략한다.

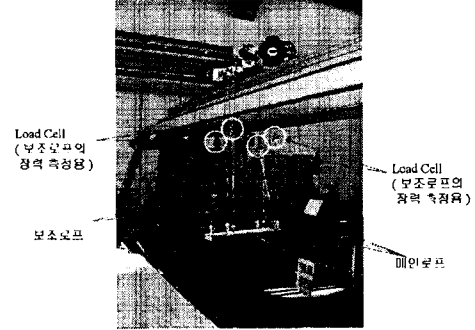


Fig. 5 Anti-Sway Test Equipment

6. 결론

본 논문에서는 기존의 크레인을 자동화에 적용할 때 발생하는 문제점에 관해 언급하고 자동화 크레인에 적합한 흔들림 방지 시스템의 구조에 관한 연구 결과를 소개하였다. 고안된 형태의 크레인은 실제로 상용화를 목적으로 제작 중에 있다.

후기

본 연구는 해양수산부에서 지원하는 자동 트랜스퍼 크레인 설계 및 제어기술 개발 과제의 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.