

자동 트랜스퍼 크레인을 위한 컨테이너 흔들림 장치

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

Anti-Sway System for Automated Transfer Crane

Chanhun Park*(KIMM), KyungTaik Park(KIMM) and Doohyung Kim(KIMM)

ABSTRACT

Automated Container Terminals have been being developed over the world for many recent years and more and more countries get interested in it because the amount of containers exported or imported is steeply increasing. Existed Container Terminals were not designed to control this kind of heavily many containers. They would face many structural problems soon or later, although they have managed to do well until now. One of the most important things in developing Automated Container Terminal is to develop the equipment able to transfer the awfully many containers. Those are maybe Automated Transfer Cranes, Automated Guided Vehicles, and Automated Quay-Side Cranes. The word "Automated" means the equipment is operated without drivers and those equipments are able to work without taking any break. Through the researches on the existed transfer cranes, authors decided that the structure of existed transfer cranes is not proper to swift and fast transfer and it's not impossible to handle so many containers in limited time. Therefore authors have been studying on the proper structure of the Automated Container Crane for past several years and a new type of transfer crane has been developed. Design concepts and control methods of a new crane will be introduced in this paper..

Key Words : Automated Container Terminal (자동화 항만), Automated Transfer Crane (자동화 트랜스퍼 크레인), Anti-Sway System (흔들림 방지 시스템)

1. 서론

본 논문에서는 항만 자동화에 적합한 트랜스퍼 크레인을 위한 새로운 개념의 흔들림 제어 구조와 설계 개념을 제안한다. 또한 이의 동역학적 해석 및 제어 기법을 제안하고 그 유효성을 모의실험을 통해 입증한다.

2. 모델링

2.1 개발된 크레인의 기본 구조

아래의 Fig. 1 은 기존의 메인 로프만 가지는 크레인과 개발된 크레인의 기본적인 구조의 차이점을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 두 구조의 근본적인 차이는 흔들림을 억제하는 방식에 있다. 기존의 크레인은 흔들림이 발생했을 경우에 트롤리의 가속도를 조절함으로써 흔들림을 억제한다. 그러나 개발된 크레인은 보조로프를 이용해서 흔들림을 직접 억제한다. 개발된 구조의 시스템은 흔들림 억제

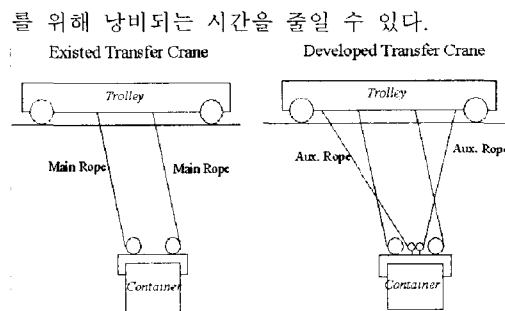


Fig. 1 Schematic diagrams for comparison between an existed transfer crane and a developed one

2.1 크레인의 모델링

Fig. 2(a) 에서는 개발 중인 크레인을 모델링하기 위한 간략하게 그려진 그림이 보여진다. 컨테이너의 흔들림이 단진자 운동이라고 가정한다면 메인 로프는 강체로 간주될 수 있다. 그러나 보조 로프를 모델링하는 것은 쉬운 일이 아니다. 따라서 보조로프 대신 로프와 동일한 방향으로 로프의 장력

만이 존재하는 것으로 생각하자. 이렇게 하면 로프의 독특한 탄성적 거동 특성이 반영될 수 없기는 하지만 전체 시스템의 거동 특성을 파악하기에 충분할 것으로 생각된다. 로프에 걸리는 힘은 컨테이너에도 작용이 되지만 반작용력이 트롤리에도 가해진다는 것을 주의해야 한다. Fig. 2(b)에는 장력과 장력의 반력이 작용하는 작용점을 가리키는 벡터가 표시되어 있다.

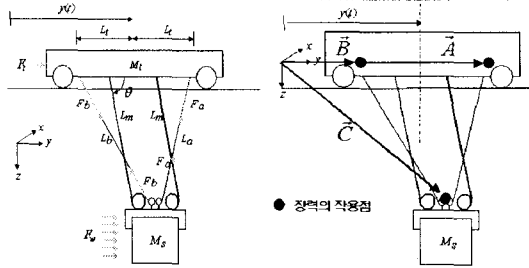


Fig. 2(a) Schematic diagrams for mathematical modeling of the proposed transfer crane.

Fig. 2(b) Vectors pointing the point on which the tension of aux. ropes is acting

전체 시스템의 거동을 표현하는 좌표계로 트롤리의 위치와 스프레더의 흔들림을 취할 경우 Lagrange's Equation 은 아래와 같이 구성된다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{y}} \right) - \frac{\partial L}{\partial y} = \sum_{j=1}^N F_j \frac{\partial x_j}{\partial y} \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = \sum_{j=1}^N F_j \frac{\partial x_j}{\partial \theta} \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{y}} \right) - \frac{\partial L}{\partial y} \quad (3)$$

$$= F_a + \vec{F}_{ar} \cdot \frac{\partial \vec{A}}{\partial y} + \vec{F}_{br} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial y} + \vec{F}_c \cdot \frac{\partial \vec{C}}{\partial y} + \vec{F}_d \cdot \frac{\partial \vec{C}}{\partial y} + F_w \cdot \frac{\partial \vec{C}}{\partial y}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} \quad (4)$$

$$= \vec{F}_{ar} \cdot \frac{\partial \vec{A}}{\partial \theta} + \vec{F}_{br} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial \theta} + \vec{F}_c \cdot \frac{\partial \vec{C}}{\partial \theta} + \vec{F}_d \cdot \frac{\partial \vec{C}}{\partial \theta} + F_w \cdot \frac{\partial \vec{C}}{\partial \theta}$$

Eq. 3,4 에 대입하고 완전히 풀어서 정리하면 아래와 같다. 지면관계로 상세한 유도는 생략한다.

$$L_m^2 M_s \ddot{\theta} - L_m M_s g \cos \theta - L_m M_s \sin \theta \ddot{y} \quad (5)$$

$$= \left(- \frac{F_a L_t}{\sqrt{L_m^2 + L_t^2} - 2L_m L_t \cos \theta} + \frac{F_b L_t}{\sqrt{L_m^2 + L_t^2} + 2L_m L_t \cos \theta} - F_w \right) L_m \sin \theta$$

$$(M_s + M_t) \ddot{y} - L_m M_s \cos \theta \ddot{\theta}^2 - L_m M_s \sin \theta \ddot{\theta} \quad (6)$$

$$= F_t + F_w$$

3. 제어기의 설계

3.1 흔들림 억제의 기본적인 원리

트롤리가 힘을 받아서 운동을 시작하게 되면 그에 따라서 컨테이너에도 적당한 힘을 인가해서 트롤리와 컨테이너가 유사하게 움직이도록 함으로써 상대운동을 차단할 수 있다. 물론 어떤 이유에서 상대 운동이 이미 발생한 경우에도 컨테이너에 수형방향 힘을 가할 수 있다면 흔들림을 줄일 수 있다. Fig. 3는 이것을 잘 설명해 주고 있다.

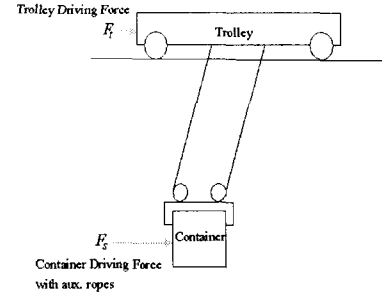


Fig. 3 The basic principle to prevent a container from swaying with aux. rope

3.2 보조로프 장력 제어기의 설계

제어기 설계의 기본적인 아이디어는 4.1 절에서 설명되어진 것과 동일하다. 트롤리와 컨테이너가 서로 상대운동을 하지 않도록 하기 위한 제어입력을 결정하는 것이다. 여기에서 제어 입력이라 함은 컨테이너에 인가 되는 수형방향 힘 (Fig. 4의 \$F_s\$)을 발생시키기 위한 로프의 장력을 의미한다. 만일 컨테이너에 적절한 힘이 정확히 작용해서 흔들림이 전혀 발생하지 않았다고 가정하자. 이 경우 \$\theta \cong 90, \dot{\theta} \cong 0, \ddot{\theta} \cong 0\$ 를 가정할 수 있다. 이것을 Eq. 4, 5 에 대입하면 아래의 간략화된 운동방정식이 구성된다.

$$F_t = (M_t + M_s) \ddot{y} \quad (7)$$

$$\ddot{y} = (F_a - F_b) \left(\frac{L_t}{M_s \sqrt{L_m^2 + L_t^2}} \right) \quad (8)$$

이제 Eq. 7, 8 을 정리하면 다음의 관계가 성립한다.

$$F_a - F_b = \left(\frac{M_s \sqrt{L_m^2 + L_t^2}}{(M_t + M_s) L_t} \right) F_t \quad (9)$$

Eq. 9 는 두개의 보조로프의 장력의 차이를 보여주고 있다. 초기 흔들림이 전혀 없을 경고 외란이 없는 경우에 보조로프의 장력의 차이를 위와 같이 유지함으로써 발생하는 수형방향의 분력이 컨테이너에 인가됨으로써 흔들림이 억제될 수 있다는 것을 보여주고 있다. 주목할 것은 이 장력의 차이가 트롤리의 구동력 (\$F_t\$)에 의해서 결정된다는 것이다. 즉, 현재 트롤리에 인가되는 힘을 기초로 장력의 차이를 Eq. 9 에 따라 결정되도록 함으로써 트롤리와 컨테이너는 상대운동이 없이 운동할 수 있다. 그러나 이 식만으로는 부적절 하다. 로프에는 장력만이 작

용할 수 있고 압축력은 작용할 수 없으므로 Eq. 10, 11 로 요약된다.

$$\left\{ \begin{array}{l} F_a = \left(\frac{M_s \sqrt{L_m^2 + L_i^2}}{(M_i + M_s)L_i} \right) |F_i| + F_b \\ F_b = 0 \end{array} \right\} \quad (\text{if } F_i > 0) \quad (10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} F_a = 0 \\ F_b = \left(\frac{M_s \sqrt{L_m^2 + L_i^2}}{(M_i + M_s)L_i} \right) |F_i| + F_a \end{array} \right\} \quad (\text{if } F_i < 0) \quad (11)$$

Eq. 10, 11 으로 표현되는 Feedforward 항에 추가해서 Feedback 항이 구성되어야 한다. Feedback 항의 목적은 초기 흔들림이나, 바람 등의 외란에 의한 흔들림을 억제하는 것이다. 단진자의 흔들림을 억제하기 위해서 진자의 축에 모터를 부착하고 이를 이용해서 흔들림을 억제하는 경우를 가정하자 (Fig. 4). 이후에서는 가상의 단진자에 부착된 가상의 모터에서 발생하는 Torque 를 Virtual Torque 라고 명명하겠다.

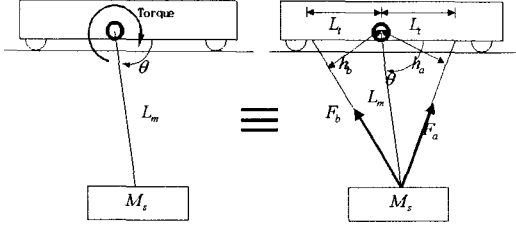


Fig. 4 The concept of feedback

단진자의 흔들림이 발생하는 경우 이를 억제하기 위한 Virtual Torque 는 Eq. 12 와 같이 결정될 수 있다.

$$T_r = (90^\circ - \theta)K_{Rp} - \dot{\theta}K_{Rd} \quad (12)$$

보조로프를 이용해서 Eq. 12 와 동일한 회전력을 발생시키기 위해서는 Eq. 13 이 만족되면 됨을 알 수 있다. (Fig. 5)

$$T_r = -h_a F_a + h_b F_b \quad (13)$$

여기에서 h_a, h_b 는 기하학적으로 Eq. 14 와 같이 계산될 수 있다. 이제 Eq. 15 가 만족되도록 보조로프의 장력 F_a, F_b 를 결정하면 컨테이너를 효과적으로 억제할 수 있다. 그러나 로프의 장력은 양의 값만을 가질 수 있으므로 F_a, F_b 는 Eq. 16, 17 과 같이 정리될 수 있다. 이제 Eq. 16, 17 에 의해서 로프를 제어함으로써 흔들림을 억제 할 수 있다.

$$h_a = \left(\frac{L_i L_m \sin \theta}{\sqrt{L_m^2 + L_i^2 - 2L_i L_m \cos \theta}} \right) \quad (14)$$

$$h_b = \left(\frac{L_i L_m \sin \theta}{\sqrt{L_m^2 + L_i^2 + 2L_i L_m \cos \theta}} \right)$$

따라서 Virtual Torque 는 Eq. 15 로 정리 된다.

$$T_r = - \left(\frac{L_i L_m \sin \theta}{\sqrt{L_m^2 + L_i^2 - 2L_i L_m \cos \theta}} \right) F_a + \left(\frac{L_i L_m \sin \theta}{\sqrt{L_m^2 + L_i^2 + 2L_i L_m \cos \theta}} \right) F_b \quad (15)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} F_a = 0 \\ F_b = \left(\frac{\sqrt{L_m^2 + L_i^2 + 2L_i L_m \cos \theta}}{L_i L_m \sin \theta} \right) |T_r| + F_a \end{array} \right\} \quad (\text{if } T_r > 0) \quad (16)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} F_a = \left(\frac{\sqrt{L_m^2 + L_i^2 - 2L_i L_m \cos \theta}}{L_i L_m \sin \theta} \right) |T_r| + F_b \\ F_b = 0 \end{array} \right\} \quad (\text{if } T_r < 0) \quad (17)$$

3.3 트롤리 제어기의 설계

Eq. 10,11,15,16,17 을 이용해서 계산된 장력이 정확히 인가된다면 트롤리에 인가되는 힘의 크기에 관계없이 흔들림이 억제된다. 즉, 운전자가 탑승해서 임의로 트롤리를 운전할 지라도 스프레더의 흔들림은 거의 발생하지 않을 것이다. 따라서 트롤리의 제어기는 컨테이너의 움직임에 무관하게 설계될 수 있다. 즉, Eq. 10, 11 에 따라서 보조로프가 작동되면 트롤리의 운동특성은 Eq. 7 에 의해서 결정된다. 따라서 이 식을 바탕으로 트롤리의 제어기를 설계할 수 있다. 트롤리의 제어 입력을 아래 식과 같이 잡는다.

$$F_i = (M_i + M_s)(\ddot{y}_d + \dot{e}K_{Td} + eK_{Tp}) \quad (18)$$

여기에서 $\dot{e} = \dot{y}_d - \dot{y}_d$, $e = y_d - y$ 이고, \dot{y}_d 는 트롤리의 기준가속도를 의미한다. 이 식을 Eq. 7 에 대입하면 트롤리의 Error Dynamics 를 Eq. 13 과 같이 얻을 수 있다.

$$\ddot{y}_d + \dot{e}K_{Td} + eK_{Tp} = 0 \quad (19)$$

Eq. 18 이 Critical Damping 이 되도록 계수를 아래과 같이 설정한다.

$$K_{Td} = 2\sqrt{K_{Tp}} \quad (20)$$

4.4 전체 제어기

4.2, 4.3 절에서 각각 보조로프 제어기와 트롤리 제어기가 설계되었다. Eq. 10,11,15,16,17,20 을 모두 정리해서 그림으로 간단히 표현하면 Fig 5 과 같다.

5. Simulation

본 장에서는 제안된 크레인의 구조와 제어기의 성능을 Simulation 을 통해서 검증하고자 한다. Simulation 에 사용될 변수들은 되도록 개발중인 실제 크레인의 그것과 유사하도록 설정하였다. 트롤리의 무게는 20 ton, 그리고 컨테이너의 무게는 10 ton 을 가정하고, 트롤리와 컨테이너의 상대 거리는 10m, 그리고 초기에 1 도의 흔들림이 있는 것으로

가정하였다. 이것은 약 17cm 의 초기 흔들림을 의미한다. 또한 가속속은 $0.5m/s^2$ 으로 가정한다. 각각의 계인은 아래와 같다.

$$K_{Tp} = 100, K_{Td} = 2\sqrt{K_{Tp}}$$

$$K_{Rp} = 100000, K_{Rd} = 1000000$$

Fig. 6 (a)는 Trolley가 위치 기준 선도를 잘 추종하는 것을 보여주고 있다. Fig. 6 (b)는 컨테이너의 흔들림을 보여주고 있다. 좌측의 눈금은 컨테이너의 흔들림을 각도로 표현하고 있고, 우측의 눈금은 직선 거리(m)로 표현하고 있다. 초기 흔들림에도 불구하고 컨테이너의 흔들림은 급격히 줄어든다는 것을 알 수 있다. Fig. 6 (c)는 보조로프에 인가되는 장력의 패턴을 보여 주고 있다.

후기

본 논문은 해양수산부 및 과학기술부에서 시행하는 연구개발사업인 중점국가과제 내용의 결과입니다.

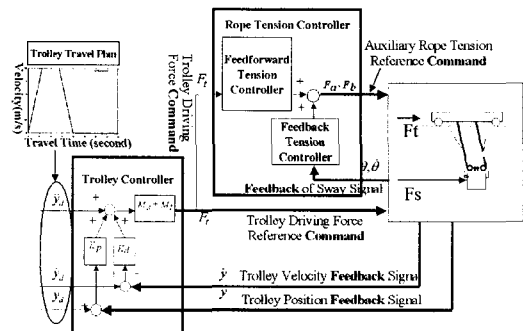


Fig. 5 A schematic diagram of the total control algorithm

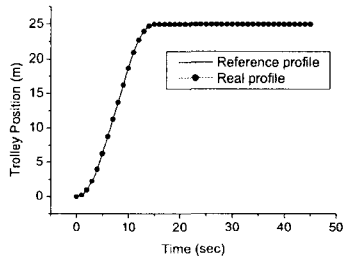


Fig. 6 (a) Trolley Position

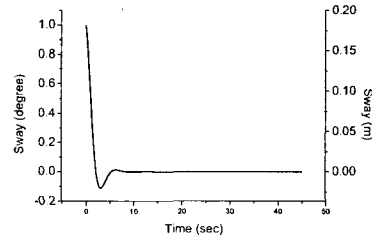


Fig. 6 (b) Container Sway

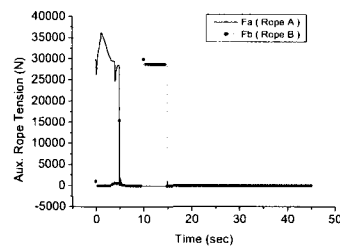


Fig. 6 (c) Aux. Rope Tension

Fig. 6 Simulation Results with initial sway

참고문헌

1. 박찬훈, 박정택, “무인 겐트리 크레인,” 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp. 696-699, 1999
2. 조대승, “컨테이너 크레인의 헤드블록 횡동요 해석,” 한국소음진동학회지, Vol. 7, No. 5, pp. 765-772, 1997
3. Moustafa, K. A. F. and edeid, A. M., “Nonlinear Modeling and Control of Overhead Crane Load Sway,” J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Trans. of ASME, Vol. 110, pp.266 ~ 271,1988
4. 이태영, “퍼지이론을 이용한 Overhead Crane 의 Anti-Sway 제어,” 경북대학교 기계공학과, 석사학위논문, 1995
5. Shirai, “Development of Electronic Sway Control System for Container Crane,” Trans. of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C, Vol. 59, No.561, pp. 113 ~ 117, 1993
6. Date, T., Okawa, T. Yamaguchi, O., Nagai, H., Hakajima, T. and Matsumoto, N., “Anti-Sway Control System for Container Handling Cranes,” NKK Technical Report, No. 150, pp. 56 ~ 60, 1995
7. Okubo, Y., Hoshina, H., Murata, I., Monzen, T. and Toyohara, T., “Development of Anti-Sway Control System for Container Cranes,” MHI Technical Review, Vol. 32, No. 2, pp. 61 ~ 65, 1995
8. Nakajima, M., Umefuji, O., Takeuchi, K., Murata, I., and Kuwabara, A., “Automatic Control System of Container Cranes,” MHI Technical Review, Vol. 27, No. 2, pp. 87 ~ 91, 1990