

크레인의 구동제어 특성에 관한 연구

이형우*(한국과학기술원 기계공학과), 박찬훈, 김두형, 박경택(한국기계연구원),
이만형(부산대학교 기계공학부)

A Study on Characteristics of Driving Control of Crane
H. W. Lee(Mech. Eng. Dept., KAIST), C. H. Park, D. H. Kim, K. T. Park(KIMM),
M. H. Lee(Mech. Eng. Dept., PNU)

ABSTRACT

This paper studied on the lateral motion and yaw motion of the gantry crane that is used for the automated container terminal. Though several problems are occurred in driving of the gantry crane, they are solved by the motion by the operators. But, if the gantry crane is unmanned, it is automatically controlled without any operator

There are two types, cone and flat type in driving wheel shape. In cone type, the lateral vibration and yaw motion of crane are issued. In flat type, the collision between wheel-flange and rail or the fitting between wheel-flanges and rail is issued Especially, the collision between wheel-flange and rail is a very critical problem in driving of unmanned gantry crane.

To bring a solution to the problems, the lateral and yaw dynamic equations of the driving mechanism of two driving wheels are derived. Then, we investigate the driving characteristics of gantry crane. In this study, the proposed controller, based on Model Based Controller, is used to control the lateral displacement and yaw angle of the gantry crane And the availability of the proposed controller is showed through the comparison with the result of the proposed controller and PD controller. The simulation results of the driving mechanism, using the Runge-Kutta Method that is one of the numerical analysis methods, are presented in this paper.

Key Words : Gantry Crane(갠트리 크레인), Driving Characteristics(구동특성), Cone Wheel(콘 휠), Flat Wheel(플랫 휠), Model Based Controller(모델 베이스 제어기), Runge-Kutta Method(룬지쿠타기법)

1. 서론

항만에 적용되는 기술적 수준을 구분해 보면 수동화, 반자동화, 무인화 등으로 나눌 수 있다. 네덜란드 로테르담(Rotterdam)의 ECT 터미널, 일본의 카와사키 터미널, 영국의 템즈 터미널 등이 자동화, 반자동화를 하고 있는 대표적인 사례이다.^[1] 여기에 적용되는 하역 크레인 자동화의 최종 목적은 무인화이다. 본 연구는 터미널 무인화 중에서 갠트리 크레인의 자동운행에 관련된 것이다

일반적으로, 레일 위에서 구동하는 휠의 종류는 크게 플랫(Flat)형과 콘(Cone)형, 두 가지로 나뉜다. 콘형은 휠의 담면구배에 의해 횡방향으로 레일을 벗어나지 않으려 하는 사인(Sine)파형 구동을 보이지만, 그에 따른 횡진동을 유발한다. 그러므로, 일반적

으로 현장에서는 구동휠로 플랫형을 사용하고 있다. 플랫형은 콘형에서 발생하지 않는 휠의 플랜지와 레일간의 충돌현상이나 끼임현상이 일어난다. 현재 현장에서는 구동시 발생하는 크레인의 레일과의 충돌이나 끼임현상을 막기 위하여 크레인이 레일과 부딪히기 전에 운전실에 설치해 놓은 램프에 신호가 들어오면 운행자가 크레인에 적절한 입력(충돌이나 끼임현상이 일어나는 반대쪽 휠의 구동장치를 가동시켜 다시 평행상태를 이룸)을 가하여 충돌이나 끼임현상을 보상한다. 현장 크레인의 안티-스큐(Anti-Skew) 동작은 전적으로 운전자의 판단과 시스템 작동에 의존한다. 이러한 문제점은 크레인의 대형화, 고속화, 무인화에 가장 큰 걸림돌이 된다. 따라서, 크레인의 대형화, 고속화, 무인화를 위해 우선 두 가지 형태의 구동휠의 장단점을 파악한 다음 크레인이 구

동할 때 발생하는 문제를 억제하는 방법에 대해 연구한다.^[2-3]

본 논문에서는 두 가지 휠, 콘형과 플랫폼형의 구동 휠을 가진 크레인의 구동에 관하여 연구하였다. 2차원적으로 단순화된 크레인 모델링에 대해 뉴턴의 제 2법칙(Newton's 2nd Law)을 이용하여 콘형과 플랫폼형 구동 휠을 가진 크레인의 운동방정식을 구한 다음, 제어기의 적용 유무에 따른 크레인의 구동형상을 시뮬레이션을 통해 알아본다. 시뮬레이션에 있어서는, 변수와 계수 값들을 현재 구현하고자 하는 무인 크레인의 실제값들을 적용함으로써 보다 현실적인 결과를 얻는다. 시뮬레이션은 룬지-쿠타(Runge-Kutta) 기법을 사용한다.^[4] 제어기로는 모델 베이스 제어기(Model Based Controller) 개념을 가진 제어기를 제안하여 사용하였으며, 비례-미분 제어기(Proportional-Derivative Controller)와 결과를 비교하여 그 성능을 알아본다.

2. 운동방정식

2.1 크립(Creep)이론의 적용

크립력은 휠과 레일 사이의 상대 속도차에 의해 발생하는 힘으로써, 일종의 마찰력이다. 그리고, 이것은 휠과 레일의 상대 속도 함수로 나타내어진다. 크립력은 크리피지 계수(Creepage Coefficient)에 크리피지(Creepage)를 곱한 값으로 정의된다. 크리피지(Creepage)는 레일과 휠의 상대 속도로 정의된다. 이상적인 상황에서 차량은 레일의 속도와 일치한다고 가정할 때, 레일에 굴곡이 존재한다면 외관이 존재하면 레일과 휠의 상대 속도가 존재하게 되는데, 크립이론에 의해 힘을 상대속도가 생기지 않는 방향으로 작용하게 하며, 그 특성은 일반적으로 식 (1)의 크리피지로 나타낸다.^[5-6]

$$C = \frac{V_W - V_R}{V} \quad (1)$$

여기서, C 는 크리피지이고, V_W 는 휠의 속도이고, V_R 는 레일의 속도, V 는 휠셀의 속도이며, 콘형에서는 $V = r_0\Omega$ 로 나타내고, 플랫폼형에서는 $V = r\Omega$ 로 나타낼 수 있다. r_0 는 좌우 어느 한 쪽으로도 치우치지 않은 상태에서의 콘형 휠 반경을 의미하며, r 은 플랫폼 휠 반경을 의미한다. 크립력은 다음과 같이 나타낸다.

$$F_c = f * C \quad (2)$$

여기서, F_c 는 크립력, f 는 크리피지 계수이다.

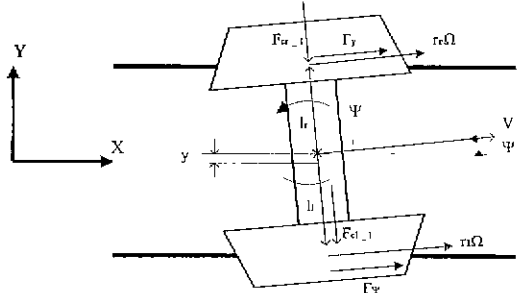


Fig. 1 Lateral Free-Body Diagram of Cone Type

2.2 콘(Cone)형 크레인

2.2.1 횡방향 (Lateral Motion)

Fig. 1은 휠과 레일에 있어서 횡방향으로 영향을 주는 요소들을 나타낸 것이다. y 는 크레인의 횡변위를 나타내고, $r_0\Omega$ 는 우측, $r\Omega$ 는 좌측 휠의 속도를 나타낸다. 여기서, r_0 는 우측 휠 반경, r 은 좌측 휠 반경을 나타내며, Ω 는 휠의 회전 각속도를 나타낸다. F_y 는 횡변위를 제어하기 위해, F_ψ 는 요각을 제어하기 위해 휠에 부착해 놓은 모터에서 발생하는 구동력이다. F_{cr-l} 은 우측 휠, F_{cl-l} 은 좌측 휠에 작용하는 횡방향 크립력이다.

뉴턴의 제 2법칙(Newton's 2nd Law)에 의해 콘형 구동 휠을 가진 크레인의 횡방향 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[7]

$$m\ddot{y} = (F_y + F_\psi)\sin\psi - (F_{cr-l} + F_{cl-l}) \quad (3)$$

여기서, m 은 크레인의 질량이고, F_y 와 F_ψ 는 모터에서 발생하는 힘으로써 제어력을 나타내고, F_{cl-l} 과 F_{cr-l} 은 좌우 휠에 작용하는 횡방향 크립력이다. 횡방향 크립력은 식 (2)에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{cr-l} &= f_{22} * C_{r-l} \\ F_{cl-l} &= f_{22} * C_{l-l} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, f_{22} 는 횡방향 크립계수로써, Kalker 이론을 바탕으로 구해진다. C_{l-l} 과 C_{r-l} 은 좌우 횡방

향 크리피지(Lateral Creepage)를 나타낸다.

크립 이론에 의한 좌우 휠의 횡방향 크리피지는 식 (1)에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{r-l} = \frac{(\dot{y} - r_r \Omega \sin \Psi)}{V} \quad (5)$$

$$C_{l-l} = \frac{(\dot{y} - r_l \Omega \sin \Psi)}{V}$$

여기서, V 는 크레인의 진행방향 속도인데, 이것은 갠트리 크레인의 주행속도와 같다. \dot{y} 은 크레인의 횡방향 속도이고, Ψ 는 크레인의 요(Yaw)각이고, Ω 는 휠의 회전 각속도이다. r_r 은 우측 휠 반경, r_l 은 좌측 휠 반경이다. $-V$ 는 차량 속도이므로, $V = r_0 \Omega$ 이다

식 (4)와 (5)를 정리하여 식 (4)에 대입하면, 콘형 휠을 가진 크레인의 횡방향 운동방정식은 다음과 같다

$$\ddot{y} = -\frac{2f_{22}}{mV} \dot{y} + \frac{2f_{22}}{m} \sin \Psi + \frac{F_y + F_\Psi}{m} \sin \Psi \quad (6)$$

2.2.2 요방향(Yaw Motion)

Fig. 2는 콘형 휠을 가진 크레인의 회전 운동에 있어서 휠과 레일에 작용하는 요소들을 나타낸 것이다. $l_r \dot{\Psi}$ 는 크레인의 회전에 의해 발생하는 우측 휠의 속도이고, $l_l \dot{\Psi}$ 는 좌측 휠의 속도로서 서로 반대 방향으로 발생한다. $V \frac{r_0 + y\lambda}{r_0}$ 는 우측, $V \frac{r_0 - y\lambda}{r_0}$ 는 좌측 레일의 속도를 나타낸다

크레인의 중심에서 우측 휠과 레일의 접촉점까지의 거리는 $l_r = l - \frac{y}{\cos \Psi}$ 이고, 좌측 휠의 경우는 $l_l = l + \frac{y}{\cos \Psi}$ 이다. l 은 크레인이 어느 한쪽으로도 치우치지 않은 상태에서 크레인의 중심에서 휠과 레일의 접촉점까지의 거리이다.

뉴턴의 제 2법칙(Newton's 2nd Law)에 의해 콘형 휠 구동부의 요방향 운동방정식은 다음과 같다.

$$I \ddot{\Psi} = l_l F_\Psi - l_r F_y - T_{creep} \quad (8)$$

여기서, T_{creep} 은 크리피력에 의해 발생하는 토크를 의미하며, 다음과 같이 구해진다.

$$T_{creep} = (F_{cl-y} * l_l) - (F_{cr-y} * l_r) \quad (9)$$

여기서, F_{cl-y} 와 F_{cr-y} 는 좌, 우측 휠에 작용하는

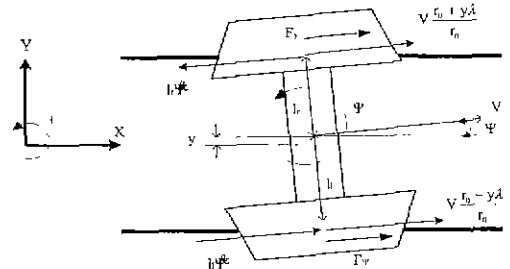


Fig. 2 Yaw Free-Body Diagram of Cone Type

회전 크리피이다.

식 (1)과 식 (2)에 의해 요방향 크리피력은 다음과 같다

$$F_{cr-y} = f_{11} \cdot \frac{V - l_r \dot{\Psi} - \frac{V(r_0 + y\lambda)}{r_0}}{V} \quad (10)$$

$$F_{cl-y} = f_{11} \cdot \frac{V + l_l \dot{\Psi} - \frac{V(r_0 - y\lambda)}{r_0}}{V}$$

여기서, F_{cl-y} 와 F_{cr-y} 는 좌우 요방향 크리피력을 나타내고, f_{11} 은 종방향 크리피지 계수이다.

콘형 크레인의 요방향 운동방정식은 다음과 같다

$$\ddot{\Psi} = -\frac{2f_{11}(l^2 + (\frac{y}{\cos \Psi})^2)}{IV} \dot{\Psi} - \frac{2f_{11}l\lambda}{Ir_0} y$$

$$+ \frac{l + \frac{y}{\cos \Psi}}{I} F_\Psi - \frac{l - \frac{y}{\cos \Psi}}{I} F_y \quad (11)$$

2.3 플랫(Flat)형 크레인

2.3.1 횡방향 (Lateral Motion)

Fig 3은 플랫형 휠을 가진 크레인의 휠과 레일에 있어서 횡방향으로 영향을 주는 요소들을 나타낸 것이다. 각 요소는 콘형과 같다.

뉴턴의 제 2법칙(Newton's 2nd Law)을 이용하여 플랫형 휠을 가진 크레인의 횡방향 운동방정식은 다음과 같다

$$m\ddot{y} = 2(F_{rr} - F_{rl}) - (F_{cr-l} + F_{cl-l}) + (F_y + F_\psi)\sin\psi \quad (12)$$

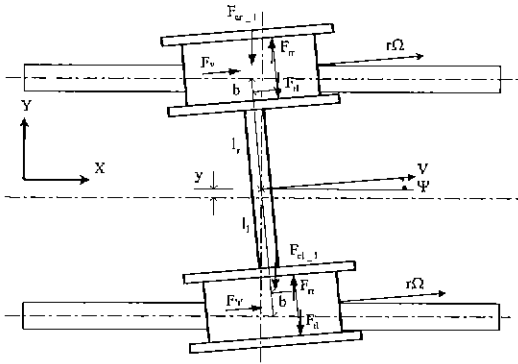


Fig. 3 Lateral Free-Body Diagram of Flat Type

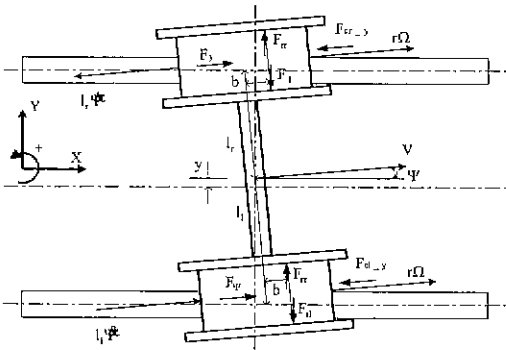


Fig. 4 Yaw Free-Body Diagram of Flat Type

여기서, m 은 크레인의 전체 질량을 나타내고, y 는 횡방향 변위, ψ 는 크레인의 회전각을 나타낸다. F_{rr} 은 좌측 휠플랜지에서, F_{rl} 은 우측 휠플랜지에서 일어나는 충격력을 나타낸다.

플랫형 휠을 가진 크레인의 횡방향 운동방정식은 다음과 같다

$$\dot{y} = -\frac{2f_{22}}{mV}\dot{y} + \left(\frac{2f_{22}}{m} + \frac{F_y + F_\psi}{m}\right)\sin\psi + \frac{2F_{rr} - 2F_{rl}}{m} \quad (13)$$

2.3.2 요방향 (Yaw Motion)

Fig. 4는 플랫형 휠을 가진 크레인에서, 휠과 레일에 있어서 회전에 영향을 주는 요소를 나타낸 것이다.

뉴턴 제 2법칙(Newton's 2nd Law)에 의해 플랫형

휠을 가진 크레인의 요방향 운동방정식은 다음과 같다.

$$I\ddot{\psi} = l_l F_\psi - l_r F_y - T_{creep} + b(F_{rr} - F_{rl}) \quad (14)$$

여기서, I 는 질량관성모멘트, T_c 는 크립력에 의해 발생하는 토크이다. 콘형과 같은 방식으로 요방향 크립력을 구하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

플랫형 휠을 가진 크레인의 요방향 운동방정식은 다음과 같다.

$$\ddot{\psi} = -\frac{2f_{11}(l^2 + (\frac{v}{\cos\psi})^2)}{IV}\dot{\psi} + \frac{b(F_{rr} - F_{rl})}{I} + \frac{(l + \frac{v}{\cos\psi})}{I}F_\psi - \frac{(l - \frac{v}{\cos\psi})}{I}F_y \quad (15)$$

3. 시뮬레이션

본 장에서는 앞에서 구한 크레인의 운동방정식과 제어 알고리즘을 바탕으로, 제어기를 적용하지 않았을 때와 제어기를 적용했을 때 비례-미분 제어기(Proportional-Derivative Controller)와 모델 참조 제어기(Model Based Controller)에 따른 크레인 구동현상을 룬지-쿠타(Runge-Kutta) 기법을 이용한 시뮬레이션을 통해 알아보도록 한다. 시뮬레이션 주파수(Simulation Frequency)는 1000Hz로 하였으며, 제어 주파수(Control Frequency)는 100Hz로 하였다. Table 1은 크레인의 파라미터 값이며, 파라미터 값들은 실제 구현하고자 하는 크레인의 사양이다.

Table 1. Crane Parameters

Parameters	Value
Mass of Crane	400 ton
Moment of Inertia of a Mass	$4.0 \times 10^7 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$
Width of Crane	25 m
Width of Cone Wheel	0.275 m
Width of Flat Wheel	0.175 m
Longitudinal Creep Coefficient	$1.5 \times 10^7 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$
Lateral Creep Coefficient	$1.5 \times 10^7 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$
Wheel Radius	0.38 m

3.1 제어기의 적용

3.1.1 비례-미분 제어기

1) 콘형 크레인 구동부

크레인의 속도는 $4m/s$, 휠 답면구배는 $0.25rad$ 으로 하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 주파수, 즉, Time Step은 $1000Hz$, 제어입력 주파수 (Control Input Frequency)는 $100Hz$ 로 하였다.

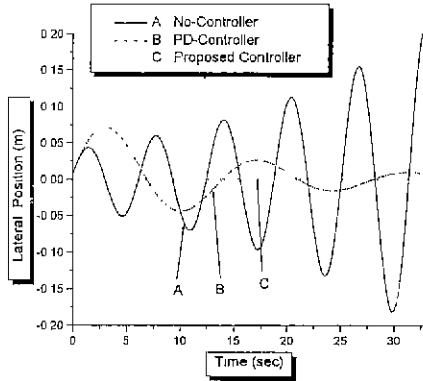


Fig. 5 Lateral Position of Cone Type according to Application of The Controllers

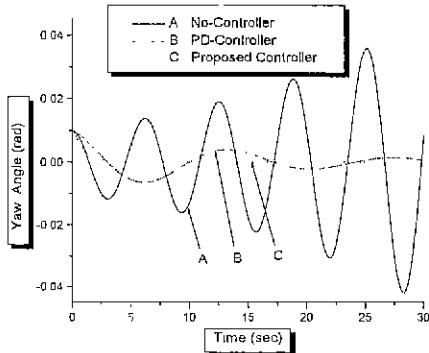


Fig 6 Yaw Angle of Cone Type according to Application of Controllers

비례게인 K_p 는 1.5×10^6 이고 미분게인 K_v 는 1.8×10^4 이다. 게인값이 매우 큰것은 운동방정식의 정보를 고려하지 않는 비례-미분 제어기의 단점이기도 하지만, 실제 크레인의 구동휠은 한쪽이 6개인데 본 논문에서는 하나로 가정하여 운동방정식을 유도하였기 때문에 휠이 감당해야 하는 하중이 매우 크므로 게인값이 클 수밖에 없다.

비례-미분 제어기를 적용하였을 경우, 기준 입력값을 따라가기는 하지만 시간이 많이 걸린다는 단점과 게인값이 크므로 인해 노이즈나 외란에 매우 민감하게 반응한다는 단점을 가지고 있다.

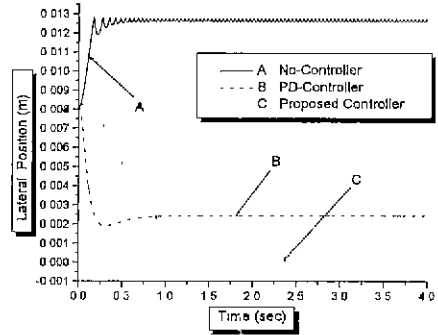


Fig. 7 Lateral Position of Flat Type according to Application of Controllers

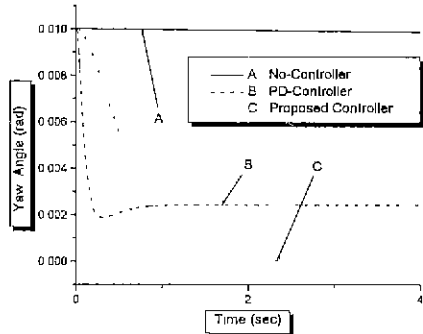


Fig. 8 Yaw Angle of Flat Type according to Application of Controllers

2) 플랫폼 크레인의 구동부

콘형과 마찬가지로 크레인의 속도는 $4m/s$ 로 시뮬레이션 하였다. 비례게인 K_p 는 6.2×10^9 이고, 미분게인 K_v 는 8.0×10^4 이다. 게인값이 콘형에 비해서도 매우 크다. 앞에서 언급했듯이 큰 게인값에 따른 노이즈나 외란에 민감하다는 문제점이 발생할 수 있다. Fig 7은 비례-미분 제어에 의한 플랫폼 크레인의 횡변위를 나타낸 것으로서, 콘형에 비해 1초 이내로 빨리 제어되지만, $0.00242m$ 의 정상상태 오차가 발생한다. 또, Fig. 8은 요각의 변화를 나타낸

것인데, 역시 정상상태 오차가 $0.0025rad$ 이 발생한
다.

3.1.2 모델 참조 제어기

1) 콘형 크레인 구동부

콘형 크레인에 적용된 모델 참조 제어기의 비례
게인 K_p 는 15이고, 미분게인 K_v 는 7.7이다.

Fig 5에서 보면 알 수 있듯이, 정상상태 오차는
존재하지 않으며, 비례-미분 제어기보다 빠른 6초 내
에 원하는 기준입력을 따라간다 또한, 게인값도 작
으므로, 비례-미분 제어기에 비해 노이즈나 외란에
둔감하다.

2) 플랫폼형 크레인 구동부

플랫폼형 크레인에 적용된 모델 참조 제어기의 비
례게인 K_p 는 10이고, 미분게인 K_v 는 6.3이다.

Fig. 7에서 보면 알 수 있듯이, 콘형과 마찬가지로
정상상태 오차는 존재하지 않지만, 비례-미분 제
어기보다 약간 늦은 3초 내에 원하는 기준입력을 따
라간다 역시, 게인값이 작으므로 비례-미분 제어기
에 비해 노이즈나 외란에 둔감하다.

4. 결 론

콘(Cone)형과 플랫폼(Flat)형의 철의 가진 겐트리 크
레인의 횡방향, 회전방향(요방향) 운동방정식을 유도
하고, 추종된 모델의 구동 특성을 알아보기 위해 유
도된 운동방정식에 모델 참조 제어기를 제안하여,
비례-미분 제어기와의 비교를 통해 그 장단점을 알
아보았다

플랫폼 철을 가진 크레인의 경우, 크레인의 속도
에 비해 크레인이 횡방향으로 구동할 수 있는 구동
여유 $0.0127m$ 는 매우 작으므로 아주 짧은 시간에
횡플랜지와 레일의 충돌이 일어난다. 이러한 충돌은
콘형에서 발생하는 횡진동의 영향과 같이 크레인의
정밀위치제어 뿐 아니라 횡플랜지와 레일의 충돌에
의한 크레인의 진동 또는 흔들림으로 컨테이너의 혼
들림을 유발할 수 있다 이러한 문제점은 크레인의
자동화, 무인화를 저해하는 요소이다. 요각은 아주
작은 값이지만 충돌에 의해 서서히 감소함을 알 수
있었다. 일반적으로 직선레일로 되어있는 항만 컨테
이너 터미널의 경우, 횡진동이 계속 발생하는 콘형
의 경우보다 횡진동 없이 주행할 수 있는 플랫폼 형
이 적합함을 알 수 있었다

비례-미분 제어기를 적용하였을 경우, 플랫폼 크
레인의 경우 콘형 크레인의 비해 매우 빠른 시간이

1초 이내로 제어되지만, 횡변위의 정상상태 오차
 $0.00242m$ 요각의 정상상태 오차 $0.0025rad$ 이 발
생한다. 크레인의 구동에 있어서 이 정도의 오차는
충분히 제어되었다고 할 수 있다. 콘형과 플랫폼 모
두 게인값이 매우 크므로 노이즈나 외란에 매우 민
감할 수 있다는 단점이 있다.

제안된 제어기를 적용하였을 경우, 콘형의 경우
6초 이내, 플랫폼형의 경우 3초 이내에 정상상태 오차
없이 기준입력에 수렴하였으며, 게인값도 작으므로
노이즈나 외란에 둔감함을 알 수 있었다 비례-미분
제어기를 적용하였을 경우와 제안된 제어기를 적용
하였을 경우의 크레인 구동특성의 비교를 통해 제안
된 제어기의 유효성을 확인할 수 있었다.

본 논문의 주 관심대상이 횡변위와 요각이므로
주행에 관련해서는 관심있게 다루질 않았다. 앞으로
주행속도가 일정한 경우가 아닌, 구동모터에 의해
주행 속도도 변하는 경우, 즉 실제에 더욱 가까운 운
동방정식을 유도해야 할 것이다.

본 연구는 해양수산부 및 과학기술부에서 시행
하는 연구개발사업인 중점국가과제(철도항만핵
심기술개발) 내용의 일부입니다.

참고문헌

- 1 한국기계연구원, 겐트리 크레인 설계 및 제어 기
술 개발, "2차년도 최종 보고서, pp. 1~15, 2000.
- 2 이형우, 이성섭, 박찬훈, 박경택, 이만형, "크레인
구동부의 Yaw Motion에 관한 연구," 한국자동차
어학회 추계학술대회, pp. 336, 2000.
- 3 이형우, 이성섭, 박찬훈, 박경택, 이만형, "크레인
구동부의 Lateral Motion에 관한 연구," 한국정밀
공학회 추계학술대회, pp. 703~707, 2000.
- 4 Richard L. Burden and J. Douglas Faires, Numerical
Analysis, PWS Publishing Company, Fifth Edition.
1993
- 5 박찬경, 박기준, 박준서, 배대성, "철도차량 동특성
해석을 위한 철/레일 상호작용의 선형모델링 연
구," 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp 51
7~524, 1998.
- 6 한형석, 허신, 하성도, "철도차량 차륜/레일 접촉모
듈 개발," 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp.
358~364, 1999.
- 7 R. M. Goodall "Tilting Trains and Beyond The
Future for Active Railway Suspensions," Computing
& Control Engineering Journal , October pp 221~
230, 1999.