

용달선의 횡 동요를 억제하기 위한 곡선레일의 수평유지장치 개발

The Development of a Balancing Control System for the Anti-Rolling Rail of a Delivery Ship

변정환 · 여동준

J. H. Byun and D. J. Yeo

Key Words : Arc Shaped Rail(곡선 레일), Screw Jack(스크류 잭), Synchronous Error(동기 오차), Balancing Control(수평유지제어), Feedforward Controller(피드포워드 제어기), Input Filter(입력 필터)

Abstract : A delivery ship is used to handle the cargo with the crane to/from the ships. The ship is inclined in the direction of a cargo which is hung on a crane. In this case, a arc shaped rail should be in the equilibrium state to get good anti rolling performance. In this study, a device and control algorithm are developed to take accurate and quick equilibrium of the rail. The device is composed of a hinged immovable support and two screw jacks. And the control algorithm demands two controllers. One controller is designed such that the screw jack 1 and 2 follow the position reference signal generated by a tilt sensor. The other controller of two degree of freedom is designed to remove the synchronous error occurred between jack 1 and jack 2. The simulation results show that the desirable control performance is achieved.

1. 서 론

선체의 횡 동요(rolling)는 안정성, 작업효율에 영향을 준다. 이를 억제하기 위한 제어기와 감쇠장치(damper)에 대한 연구¹⁻⁶⁾는 오래전부터 다양하게 진행되고 있다. 최근에는 선박의 상갑판에 곡선레일(arc shaped rail)을 고정시키고 레일 위를 이동하는 가동질량(moving mass)을 감쇠기로 하여 횡 동요를 억제하는 제어방식^{3, 6)}이 주목을 받고 있다. 이 경우 레일이 선체에 고정되어 있으므로 레일과 선체의 경사는 항상 동일하다.

선박에 장착된 크레인(crane)을 이용하여 대형선박에 화물을 공급하거나 수산물 하역에 이용되는 특수선의 일종인 용달선(delivery ship)은 크레인이 화물을 적재한 방향으로 기울어지는 현상이 발생된다. 그리고 크레인이 화물을 적재하여 용달선이 기울어진 상태에서 파도 등의 외력이 가해지면 화물이 심하게 흔들리게 되

어 하역작업이 지연될 뿐만 아니라 재해의 요인으로 작용한다. 이때 선체와 레일의 경사가 일치하는 기존의 감쇠장치^{3, 4)}로 횡 동요를 억제하더라도 가동질량의 변위 폭이 제한되어 양호한 제어를 기대하기 어려워진다.

따라서 하역작업에서 한쪽방향으로 기울어지는 용달선과 같은 선박의 횡 동요를 효율적으로 억제하기 위해서는 선체의 경사와 관계없이 곡선레일이 항상 절대평행이 되도록 하는 기계장치의 개발이 선행될 필요가 있다.

본 연구는 볼 스크류 잭(ball screw jack, 이하에서는 잭)과 모터를 이용하여 곡선레일(이하에서는 레일)의 기울기를 항상 수평으로 유지할 수 있는 제어시스템의 개발에 목적을 두고 있다. 이를 위해 설계된 기계장치에 대한 수학적 모델링을 한다^{7, 8)}. 그리고 제어시스템 구조와 제어기를 결정하여 수평제어시스템을 구축한다. 이 제어시스템은 주·종축 동기방식^{9, 10)} 및 2자유도제어기법^{11, 12)}을 이용하여 설계된다. 제어기는 비교적 계산용량이 적으며 산업현장에서 많이 이용되는 PID 제어기법으로 설계한다. 마지막으로 현장의 상황을 고려한 다양한 시뮬레이션을 통하여 개발된 수평유지제어 장치의 유효성을 검증한다.

접수일 : 2004년 10월 15일
 변정환(책임저자) : 여수대학교 동력시스템공학과
 E-mail : bjh@yosu.ac.kr Tel. 061-659-3135
 여동준 : 여수대학교 동력시스템공학과

2. 수평유지 장치

2.1 수평유지 장치의 개요

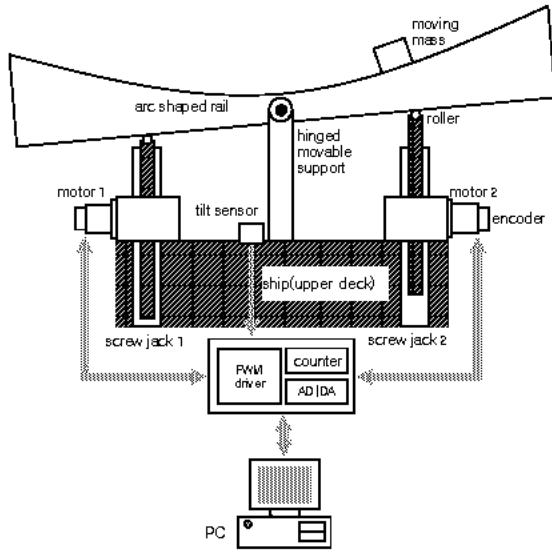


Fig. 1 Schematic diagram of a balancing control apparatus for the anti-rolling rail

Fig. 1은 용달선의 횡 동요 감쇠장치인 레일을 수평으로 유지하기 위해 설계된 장치의 개략도이다. 산업현장에서 이송기구로 이용되는 객은 구조적으로 견고하고, 중량물의 지지가 가능하지만 이송속도가 저속인 특징을 갖고 있다. 본 연구에서는 레일의 수평유지를 위한 액츄에이터로서 두 대의 축 이동형 객을 이용한다. 레일은 객의 축에 설치된 롤러에 의해 지지되고, 레일과 롤러의 접촉면적은 마찰력을 고려하여 최대한 좁게 한다. 수평유지의 신속성은 레일의 이동속도에 의해 결정된다. 따라서 기구학적으로 레일의 이동속도를 증가시키기 위하여 레일 중심에 설치된 부동지지주(hinged immovable support)와 양 객간의 거리를 가능한 좁혀서 설치한다. 또한 부동지지주를 중심으로 객1과 객2의 축을 각각 상반된 상·하방향으로 이동시키기 위해 모터1과 2를 반대방향으로 구동시키면 레일의 이동속도는 배가될 수 있다.

레일의 신속, 정밀한 수평유지를 위해서는 객 1, 객2가 경사센서(tilt sensor)에 의해 발생하는 위치지령을 빠르게 추종해야 하고, 또한 추종 중에 두 객간의 정밀한 위치동기가 요구된다. 이 위치동기는 가동 질량의 좌·우 급가속 이동에 의한 상하 흔들림 현상을 제거할 수 있다. 이하에서는 수평유지 장치에 대한 모델링을 하

고 제어기를 설계한다.

2.2 수평유지 장치의 모델링

객의 축을 상·하로 이동시키는 직류 모터의 회전시스템에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

$$T_m(t) = J_m \ddot{\theta}_m(t) + B_m \dot{\theta}_m(t) + T_r(t) \quad (1)$$

여기서, $\theta_m(t)$ 는 회전각[rad], $\dot{\theta}_m(t)$ 는 각속도[rad/s], $\ddot{\theta}_m(t)$ 는 각가속도[rad/s²], $T_m(t)$ 는 모터의 토크[Nm], $T_r(t)$ 는 레일에 의한 부하토크[Nm], J_m 은 질량관성모멘트[kgm²/rad], B_m 은 등가점성마찰계수[Nm/rad/s]이다.

또한 직류모터의 전기시스템에 대한 회로방정식은 다음과 같다.

$$K_a e_a(t) = R_a i_a(t) + K_e \dot{\theta}_m(t) \quad (2)$$

$$T_m(t) = K_t i_a(t) \quad (3)$$

여기서, K_a 는 증폭기 이득, $e_a(t)$ 는 전기자전압[V], R_a 는 전기자저항[Ω], $i_a(t)$ 는 전기자전류[A], K_e 는 역기전력상수[V/rad/s], K_t 는 토크상수[Nm/A]이다.

그리고 부동지지주를 중심으로 균등 분할된 한쪽의 레일질량 M_r 에 대한 객의 병진운동방정식은 다음과 같다.

$$F_r(t) = M_r \ddot{y}(t) + B_r \dot{y}(t) \quad (4)$$

여기서, $y(t)$ 는 레일을 지지하고 있는 객의 병진거리[m], $\dot{y}(t)$ 는 선속도[m/s], $\ddot{y}(t)$ 는 선가속도[m/s²], $F_r(t)$ 는 레일이 객으로부터 받는 힘[N], M_r 는 하나의 객이 지지하는 레일의 질량[kg], B_r 은 객의 등가점성마찰계수[N/m/s]이다.

한편 모터 축의 회전각 θ_m [rad]과 객의 변위 y [m]에 대한 관계는 다음과 같다.

$$y(t) = \lambda \theta_m(t) \quad (5)$$

여기서, $\lambda = l/2\pi$ [m/rad], l 는 모터축의 1회전에 대한 객의 이동거리[m]이다.

그리고 레일이 객에 가하는 부하토크 $T_r(t)$ 와 레일이 객으로부터 받는 힘 $F_r(t)$ 의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_r(t) = \frac{1}{\lambda} T_r(t) \quad (6)$$

식(1)~(6)을 이용하여 $e_a(t)$ 와 $y(t)$ 의 관련항으로 정리하면 다음과 같이 된다.

$$e_a(t) = K_m \ddot{y}(t) + K_{\dot{y}} \dot{y}(t) \quad (7)$$

여기서, $K_m = \frac{R_a}{K_a K_t \lambda} (J_m + \lambda^2 M_r)$,

$K_b = \frac{R_a}{K_a K_t \lambda} (B_m + \lambda^2 B_r) + \frac{K_e}{\lambda K_a}$ 이다.

식(7)을 라플라스 변환하여 $e_a(s)$ 를 입력, $y(s)$ 를 출력으로 하는 전달함수 $P(s)$ 는 다음과 같다.

$$P(s) = \frac{y(s)}{e_a(s)} = \frac{1}{s(K_m s + K_b)} \quad (8)$$

3. 제어시스템

3.1 제어시스템의 구조

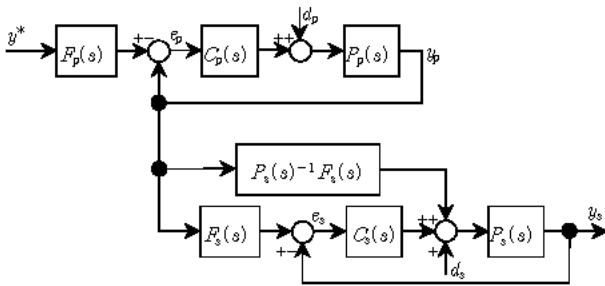


Fig. 2 Block diagram of a balancing control system for the anti-rolling rail

본 연구는 레일의 정밀한 수평유지에 목적을 두고 있으며, 용달선이 기울어진 방향의 잵을 위로, 반대방향의 잵을 아래로 이동시켜 레일의 정밀한 수평을 실현시키기 위한 제어시스템은 Fig. 2와 같다. 경사센서로부터 발생되는 위치지령 y^* 에 잵1의 출력 y_p 를 잵2의 위치지령으로 이용하는 구조이므로 잵1이 위치지령 y^* 를 추종하고, 잵2의 위치오차 $e_s(y_p - y_s)$ 가 0이 되면 레일은 수평이 된다. 이때 e_s 는 잵간에 발생하는 위치동기오차로 볼 수 있다.

잵1의 제어시스템은 제어대상 $P_p(s)$ 가 위치지령 y^* 를 추종하고 잵2의 제어대상 $P_s(s)$ 가 잵1의 출력 y_p 를 용이하게 추종할 수 있도록 위치제어기 $C_p(s)$ 와 입력필터(input filter) $F_p(s)$ 로 구성된다. 그리고 잵2는 과도상태 및 외란 d_p, d_s 등에 의해 발생하는 동기오차 e_s 를 빠르게 제거하기 위하여 피드백제어기 $C_s(s)$ 와 피드포워드제어기 $F_s(s), P_s(s)^{-1}$ 으로 구성된다.

이하에서 변수의 첨자 p 는 잵1의 위치제어, s

는 잵2의 동기제어에 관련된 것임을 의미한다.

3.2 잵1의 제어기

잵1의 제어대상 $P_p(s)$ 는 식(8)로부터 다음과 같이 된다.

$$P_p(s) = \frac{1}{s(K_{mp}s + K_{bp})} \quad (9)$$

위치제어기 $C_p(s)$ 로는 명령추종 및 외란제거를 고려하여 적분기가 포함된 PID제어기를 이용한다.

$$C_p(s) = \alpha_k \left(1 + \frac{1}{\alpha_i s} + \alpha_d s \right) \quad (10)$$

식(10)의 $C_p(s)$ 만으로 제어시스템을 구성할 경우, 영점은 과도상태에서 오버슈트를 발생시키는 요인으로 작용한다. 따라서 영점을 소거하기 위한 입력필터 $F_p(s)$ 를 추가하면 제어시스템의 전달함수는 다음과 같이 된다.

$$\frac{y_p(s)}{y^*(s)} = \frac{P_p(s)C_p(s)F_p(s)}{1 + P_p(s)C_p(s)} \quad (11)$$

여기서, $F_p(s) = \frac{1}{s^2 + \frac{1}{\alpha_d}s + \frac{1}{\alpha_d\alpha_i}}$ 이다.

식(10)의 제어기 계수 $\alpha_p, \alpha_i, \alpha_d$ 에 대한 결정 방법은 다음과 같다. 퍼센트 오버슈트 O_p 와 정착시간 τ_p 를 설계조건으로 하여 다음과 같은 대표극점을 구한다.

$$q_p \hat{q}_p = -\zeta_p \omega_{np} + j\omega_{np} \sqrt{1 - \zeta_p^2} \quad (12)$$

여기서, ζ_p 는 감쇠비, ω_{np} 는 고유진동수이다.

$$\zeta_p = \sqrt{\frac{[\ln(O_p/100)]^2}{\pi^2 + [\ln(O_p/100)]^2}}, \omega_{np} = \frac{4}{\tau_p \zeta_p} \quad (13)$$

그리고 $-\zeta_p \omega_{np} \gg r_p$ 를 만족하는 실수축상의 한 극점 r_p 를 지정하면 설계조건을 만족하는 특성방정식은 다음 식으로 된다.

$$s^3 - (q_p + \hat{q}_p + r_p)s^2 + (q_p \hat{q}_p + q_p r_p + \hat{q}_p r_p)s - q_p \hat{q}_p r_p = 0 \quad (14)$$

한편 식(11)에서 제어기의 계수가 포함된 특성방정식은 다음과 같다.

$$s^3 + \frac{K_{bp} + \alpha_k \alpha_d}{K_{mp}} s^2 + \frac{\alpha_k}{K_{mp}} s + \frac{\alpha_k}{K_{mp} \alpha_i} = 0 \quad (15)$$

식(14)와 (15)의 계수를 비교하면 식(10)의 계수는 다음과 같이 결정된다.

$$\alpha_k = K_{mp}(q_p \hat{q}_p + q_p r_p + \hat{q}_p r_p), \alpha_i = \frac{-\alpha_k}{K_{mp} q_p \hat{q}_p r_p} \quad (16)$$

$$\alpha_d = -\frac{K_{mp}(q_p + \hat{q}_p + r_p) + K_{bp}}{\alpha_k}$$

3.3 잭2의 제어기

잭2의 제어대상 $P_s(s)$ 와 제어기 $C_s(s)$ 는 각각 다음 식과 같다.

$$P_s(s) = \frac{1}{s(K_{ms}s + K_{bs})} \quad (17)$$

$$C_s(s) = \beta_k(1 + \frac{1}{\beta_i s} + \beta_d) \quad (18)$$

잭2의 제어기는 위치지령 y_p 를 추종함으로써 축간의 동기오차 e_s 를 0으로 수렴하도록 하는 역할을 담당한다. 따라서 속응성을 고려하여 피드포워드제어기 $C_{fs}(s)$ 와 피드백제어기 $C_s(s)$ 를 설계한다. 이때 외란제거 성능에 관계되는 제어기 $C_s(s)$ 의 계수 $\beta_p, \beta_i, \beta_d$ 는 3.2의 $C_p(s)$ 와 동일한 방식으로 결정한다. Fig. 2에서 외란 d_s 로부터 출력 y_s 까지 전달함수는 식(19)와 같이 된다. 이것은 계단 외란이 인가될 경우에도 일정 시간이 경과되면 적분기에 의해 동기오차 e_s 가 0으로 수렴됨을 의미한다.

$$\frac{y_s(s)}{d_s(s)} = \frac{P_s(s)}{1 + P_s(s)C_s(s)} \quad (19)$$

$$= \frac{s}{K_{ms}s^3 + (K_{bs} + \beta_k\beta_d)s^2 + \beta_k s + \beta_k/\beta_i}$$

한편 제어대상 $P_s(s)$ 가 2차 지연시스템이므로 위치지령 y_p 에서 출력 y_s 까지 전달되는 과정에 시간지연(delay time)이 발생되고, 이 시간지연은 동기오차 e_s 의 요인이 된다. 따라서 시간지연을 감소시키기 위하여 $F_s(s)$ 에 $P(s)^{-1}$ 을 부가한다. 여기서 $P_s(s)^{-1}$ 는 $P_s(s)$ 의 역 모델(inverse model)이다. 위치지령 y_p 에서 출력 y_s 까지의 전달함수는 다음 식으로 된다.

$$\frac{y_s(s)}{y_p(s)} = \frac{F_s(s)[1 + P_s(s)C_s(s)]}{1 + P_s(s)C_s(s)} = F_s(s) \quad (20)$$

여기서, 입력필터는 $F_s(s)$ 는 제어시스템의 안정성을 보장하고 정상오차를 제거하기 위하여 $P_s(s)^{-1}F_s(s) \in RH_\infty$ 와 $F_s(0) = 1$ 을 만족해야 한다¹³⁾. 본 연구에서는 $P_s(s)$ 가 2차 시스템임을

고려하여 $F_s(s)$ 를 다음과 같이 결정한다.

$$F_s(s) = \left(\frac{1}{\tau s + 1}\right)^2 \quad (21)$$

식(21)을 식(20)에 대입하면 τ 값이 작을수록 속응성이 향상됨을 확인할 수 있다. 반면 잭2의 위치지령 y_p 는 잭1에 부착된 엔코더 출력이므로 $F_s(s)$ 의 τ 값은 센서잡음과 속응성을 동시에 고려하여 결정할 필요가 있다.

4. 시뮬레이션 및 고찰

본 연구에서 제안된 용달선의 횡 동요를 억제하기 위한 곡선레일의 수평유지제어 알고리즘에 대한 타당성 검증에 이용되는 부품의 특성값은 Table 1과 같다. 이 값과 식(9)-(21)을 이용하여 구한 잭1과 잭2의 제어기 계수값은 Table 2와 같다.

Table 1 Specifications of apparatus

parts	specification	
ball screw jack	rated lead [m/rev]	8.00×10^{-4}
	rated load [kg]	5.09×10^1
	B_j [N/m/s]	5.25×10^{-2}
mass	rail mass(1/2) M_r [kg]	4.08×10^{-1}
	moving mass M_m [kg]	3.58×10^{-1}
motor	K_t [Nm/A]	1.88×10^{-1}
	K_v	9.62×10^0
	K_e [V/rad/s]	2.04×10^{-1}
	R_b [Ω]	1.10×10^0
	J_m [kgm ² /rad]	1.64×10^{-4}
	B_m [Nm/rad/s]	1.05×10^{-2}

Table 2 Parameters of controllers

jack	parameter	
jack1	$C_p(s)$	$\alpha_p = 9.87 \times 10^4$ $\alpha_i = 3.92 \times 10^{-2}$ $\alpha_d = 1.01 \times 10^{-2}$
	$F_p(s)$	$1/\alpha_p, 1/(\alpha_d\alpha_i)$
jack2	$C_s(s)$	$\beta_p = \alpha_p, \beta_i = \alpha_i, \beta_d = \alpha_d$
	$F_s(s)$	$\tau = 0, 0.01$
	$P_s(s)^{-1}$	$[1/s(0.78s + 216.12)]^{-1}$

동기오차의 발생요소에는 레일 위에서 횡동요를 억제하기 위해 이동하는 가동질량 M_m 과 제어대상 $P_p(s)$, $P_s(s)$ 의 계수값 변동 등이 있다. 이들을 고려한 시뮬레이션 조건은 다음과 같고 Matlab의 Simulink로 시뮬레이션을 행한다.

(1) 가동질량 M_m 에 의해 발생하는 부하토크는 M_m 의 크기 및 가속도, 레일의 길이 등을 고려하여 $T_L(t) = 6.93 \sin(\omega t)$ [Nm]로 하며, Fig. 3과 같다.

(2) $P_p(s)$ 와 $P_s(s)$ 의 계수값이 동일하면 위치동기의 성능을 검증하기 곤란하므로 $P_p(s)$ 는 10%, $P_s(s)$ 는 30% 변동시킨다.

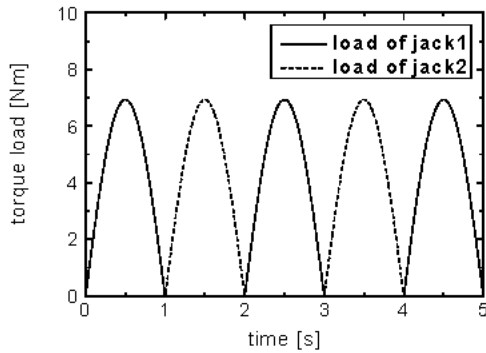


Fig. 3 Torque load[Nm] of the jack1, 2

Fig. 4, 6, 8은 피드포워드제어기 및 입력필터가 각각 $P_s(s)^{-1}F_s(s) = 0$ 및 $F_s(s) = 1$ 인 경우, Fig. 5, 7, 9는 피드포워드제어기 및 입력필터가 포함된 경우의 스텝, 램프, 사인 응답선도이다. 응답선도에서 상단의 실선 y_p 와 점선 y_s 는 각각 잭1과 잭2의 위치응답을 나타낸 것이다. 그리고 하단의 e_s 는 $P_s(s)^{-1}F_s(s) = 0$ 및 $F_s(s) = 1$ 인 경우의 동기오차이며, e_{s1} , e_{s2} 는 $P_s(s)^{-1}F_s(s)$ 를 포함하면서 $F_s(s)$ 의 τ 값을 각각 0, 0.01로 한 경우의 동기오차이다.

Fig. 4, 5는 스텝입력에 대한 과도상태 및 외란에 의해 발생하는 동기오차를 나타내고 있다. Fig. 4에서는 최대 0.04[mm], Fig. 5에서는 0.01[mm]의 동기오차가 발생된다. 과도상태에서 e_s 에 비해 e_{s1} , e_{s2} 가 감소되는 것은 잭2의 피드포워드제어기가 잭1의 출력인 y_p 를 신속히 추종하게 함으로써 가능해진다. 그리고 정상상태에서 0.02[s] 동안 6.93[Nm]의 임펄스 외란을 잭1

에는 0.4[s], 잭2에는 0.7[s]에서 인가한 경우에 잭1, 잭2의 제어기가 각각의 외란을 제거함으로써 동기오차 e_s , e_{s1} , e_{s2} 는 0[mm]로 수렴된다. 잭1보다 잭2의 외란에 의한 동기오차가 큰 것은 잭2가 잭1의 출력 y_p 를 추종하기 때문이며, 잭1의 외란에 대해 e_s 보다 e_{s1} , e_{s2} 의 동기오차가 작은 것은 과도상태에서와 같이 추종성능이 향상됨을 의미한다. 한편 e_{s1} , e_{s2} 는 τ 값을 작게 할수록 동기오차가 더욱 감소됨을 나타내고 있다.

Fig. 6, 7은 램프입력 및 부하 T_L 에 대한 동기오차를 나타내고 있다. 램프입력은 용달선에 장착된 크레인이 부두의 화물을 용달선으로 이동시키는 과정에서 발생하는 경사센서의 출력을 가정한 것이다. 즉 크레인이 화물을 들어올릴 때 선박이 경사지는 구간(0-2[s], 10[mm/s]), 화물을 들어올려 선박의 경사가 일정한 구간(2-3[s], 0[mm/s]), 화물을 선박에 하역함으로써 경사이전으로 복귀하는 구간(3-5[s], 20[mm/s])으로 구분한다. 그리고 선박이 경사진 구간에서도 질량 M_m 은 레일위에서 연속적으로 이동하므로 전체 구간(0-5[s])에서 Fig. 3과 같은 부하 T_L 을 인가한다. Fig. 6은 램프지령에 대해 부하 T_L 이 Fig. 4의 임펄스 외란에 비해 동기오차에 미치는 영향이 작으며, 잭1의 출력을 잭2의 입력으로 하는 제어시스템의 기본구조에 의해 잭1보다 잭2의 부하가 동기오차에 미치는 영향이 큼을 나타내고 있다. 한편 램프입력의 기울기가 변동되는 구간에서 발생하는 최대 동기오차는 e_s 는 0.03[mm]이지만, e_{s1} 는 0.005[mm], e_{s2} 는 0.01[mm]이하로 된다. 그리고 동기오차를 제거하는데 경과된 시간도 피드포워드제어기가 포함된 Fig. 7의 경우가 Fig. 6보다 단축된다. 이것은 부하 T_L 에 대해 잭1, 잭2가 램프지령을 추종함과 동시에 동기오차를 0.01[mm]이하로 감소시킴으로써 원활한 레일의 수평유지가 가능함을 의미한다.

Fig. 8, 9는 선박이 일정한 각도로 기울지 않은 상태에서 파도에 의해 잭1, 잭2에 사인파의 위치지령 및 부하 T_L 이 가해질 경우의 동기오차를 나타낸 것이다. Fig. 8에서 일정한 시간이 경과되면 e_s 는 0.02[mm]의 범위 내에서 위치동기가 되지만, Fig. 9는 피드포워드제어기에 의해

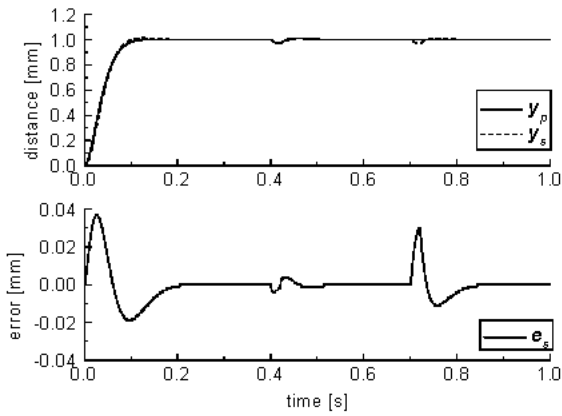


Fig. 4 Step response of a balancing control system without controller $P_s(s)^{-1}F_s(s)$

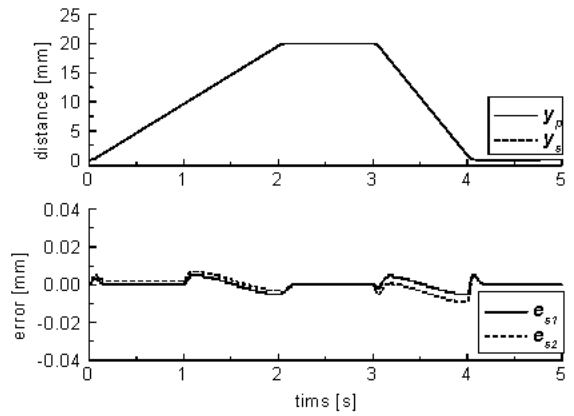


Fig. 7 Lamp response of a balancing control system with controller $P_s(s)^{-1}F_s(s)$

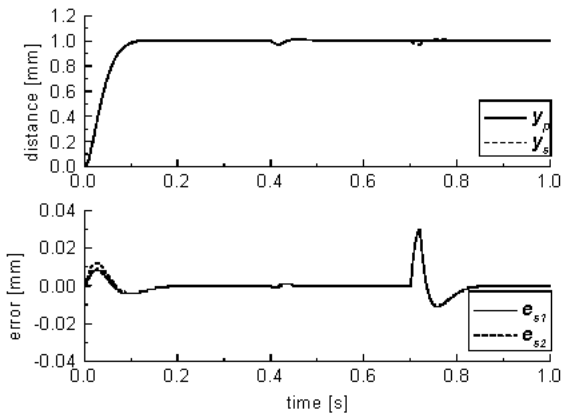


Fig. 5 Step response of a balancing control system with controller $P_s(s)^{-1}F_s(s)$

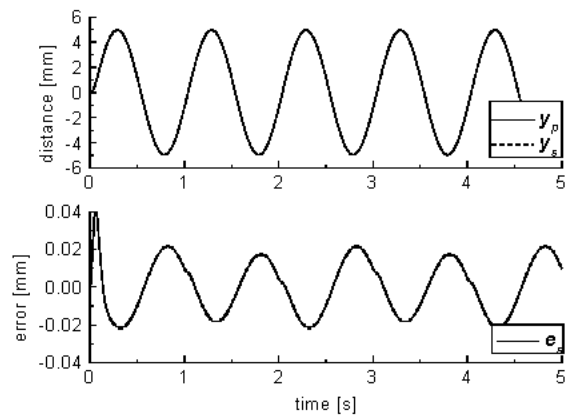


Fig. 8 Sinusoidal response of a balancing control system without controller $P_s(s)^{-1}F_s(s)$

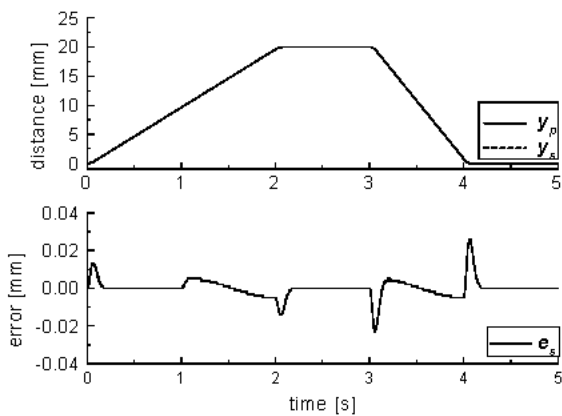


Fig. 6 Lamp response of a balancing control system without controller $P_s(s)^{-1}F_s(s)$

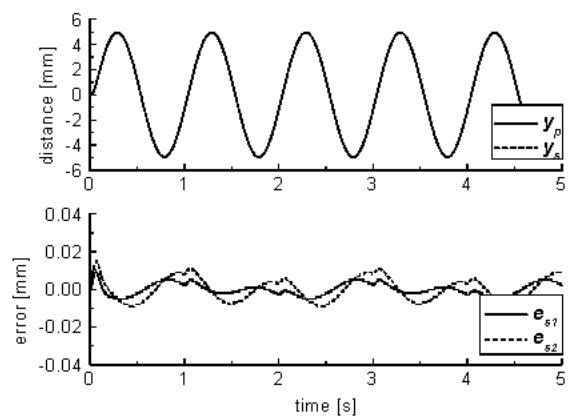


Fig. 9 Sinusoidal response of a balancing control system with controller $P_s(s)^{-1}F_s(s)$

e_{s1} 는 0.005[mm], e_{s2} 는 0.01[mm]의 범위 내로 동기오차를 억제하고 있음을 나타내고 있다. 이것은 Fig. 1의 레일 수평유지 장치가 일반 선박에도 적용 가능 하며, 가동질량의 이동 폭을 증가시킬 수 있음을 의미한다.

5. 결론

본 연구에서는 부동흔지지주와 축 이동형 스크류 잭을 이용하여 용달선이 경사진 경우에도 횡 동요 억제용 곡선레일을 수평으로 유지시키기 위한 기계장치를 고안하였다. 이 장치에서 스크류 잭의 상하 이동시에 발생하는 동기오차를 감소시키기 위하여 2자유도제어기법에 기초한 동기제어시스템을 설계하였다. 이때 스크류 잭1과 잭2의 위치제어기는 PID제어기를, 피드포워드제어기는 잭2의 역 모델을 이용하였다. 그리고 현장상황을 고려한 시뮬레이션을 통하여 다음 사항을 확인하였다.

- (1) 잭1의 위치출력이 잭2의 위치지령으로 되는 제어알고리즘은 잭1에 인가된 부하가 동기오차에 미치는 영향을 감소시킬 수 있었다.
- (2) 위치지령이 변동되는 경우에 잭2의 역 모델을 이용한 피드포워드제어기가 추종성능을 향상시켜 동기오차를 감소시키는 효과를 얻을 수 있으며, 입력 필터의 τ 값을 적절하게 선택함으로써 동기오차를 작게 조절할 수 있었다.
- (3) 비교적 간단한 제어시스템으로 잭1, 잭2가 위치지령을 추종함과 동시에 동기오차를 0[mm]로 수렴시킴으로써 곡선레일의 수평유지 장치를 용달선에 적용 가능함을 확인하였으며, 잭1보다 잭2의 부하가 동기오차에 미치는 영향이 크기 때문에 보다 원활한 수평유지를 위해 이에 대한 보완이 필요함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 중소기업청 지원으로 수행된 산·학·연 공동기술개발 지역컨소시엄사업의 결과입니다.

참고문헌

1. Lloyd, A. R. J. M., 1989, "Seakeeping : Ship Behaviour in Rough Weather", Ellis Horwood.

2. Fossen, T. I., 1995, "Guidance and Control of Ocean Vehicles", John Wiley & Sons.
3. Koike, Y., Saeki, A., Mutaguchi, M., Imazeki, M., Miyabe, H. and Yamashita, S., 1999, "Application of Hybride Anti-Rolling System to Actual Ship", Transaction on SNAJ, Vol. 185, pp. 111-117.
4. Tsukioka, S., Saeki, A., Miyabe, H. and Fujita, T., 1998, "Development and Sea Trial of a Hybrid Anti-rolling System for R/V "MIRAI"", Transaction on SNAJ, Vol. 184, pp. 187-192.
5. Oikawa, M., Koike, Y., Chatani, K. and Shigematsu, S., 1993, "Study and At-sea Experiment on Actively Controlled Anti-Rolling System", Transaction on SNAJ, Vol. 174, pp. 217-223.
6. Kim, Y. B. and Byun, J. H., 2001, "A Study on the Design of the Anti-Rolling Control System for a Ship", Journal of CASE, Vol. 7, No. 5, pp. 438-444.
7. Ogata, K., 1992, "System Dynamics", Prentice Hall.
8. Takagi, S., 1988, "Control Engineering", Corona Publishing Co., Ltd.
9. Nakamura, M., Hiyamizu, D. and Kyura, N., 1997, "A Method for Contour Control of Mechatronic Sero System with Master-Slave Axes by use of Synchronous Position Control", SICE, Vol. 33, No. 4, pp. 274-279.
10. Byun, J. H. and Kim, Y. B., 2002, "A Study on Construction of Synchronous Control System for Extension and Stability", Transactions of KSME, Vol. 26, No. 6, pp. 1135-1142.
11. Doyle, J. C., Francis, B. A. and Tannenbaum, A. R., 1992, "Feedback Control Theory", Maxwell Macmillan.
12. Kuo, B. C., 1995, "Automatic Control Systems", Prentice Hall.
13. Sugie, T and Yoshikawa, T., 1986, "General solution of robust tracking problem in Two-Degree-of-Freedom", IEEE Transaction on Automatic Control, Vol. AC-33, No. 6, pp. 552-554.