

# 스크류 잭 및 댐퍼를 이용한 가동질량 레일의 평형제어

## The Balancing Control of Moving Mass Rail by a Screw Jack and Damper

변정환 · 최명수  
J. H. Byun and M. S. Choi

**Key Words** : Screw Jack(스크류 잭), Damper(감쇠기), Balancing Control(평형제어), Delivery Ship (용달선), Moving Mass(가동질량체), Control Input Saturation(제어입력 포화), I PD Controller(I PD제어기)

**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, screw jack and damper. And the control system is based on I PD control law to consider of control input saturation and overshoot. The controller is composed of integral controller of feedforward path and proportional derivative controller of feedback path. The parameters of controller is designed to follow the reference signal and to remove overshoot. The simulation results show that the desirable control performance is achieved.

### 1. 서 론

선박의 안정성, 작업효율 등에 영향을 미치는 횡동요(rolling)를 억제하기 위한 제어기와 장치에 대한 연구<sup>1~3)</sup>는 오래전부터 다양하게 진행되고 있다. 최근에는 선박의 상갑판에 곡선레일(arc shaped rail)을 고정시키고 레일 위를 이동하는 가동질량체(moving mass)를 이용하여 횡동요를 억제하는 제어방식<sup>4, 5)</sup>이 주목을 받고 있다. 이 경우 레일이 선체에 고정되어 있으므로 레일과 선체의 경사는 항상 동일하게 된다.

선체에 장착된 크레인(crane)을 이용하여 대형선박에 화물을 공급하거나 수산물 하역에 이용되는 특수선의 일종인 용달선(delivery ship)은 크레인이 화물을 매단 방향으로 화물의 무게에 비례하여 기울어진다. 그리고 크레인에 매달린 화물에 의해 용달선이 기울어진 상태에서 파도 등의 외력을 받으면 선체와 화물이 흔들리게 되어 하역작업이 지연될 뿐만 아니라 재해의 요인으로 작용한다. 만약 용

달선의 횡동요를 억제하기 위해 레일과 가동질량체만으로 구성되는 기존의 기계장치<sup>3~5)</sup>를 이용하면 가동질량체의 이동 폭이 제한되어 효율적인 횡동요 제어를 기대하기 어려워진다.

따라서 하역작업에서 한쪽방향으로 기울어진 용달선의 횡동요를 억제하기 위해서는 선체의 기울어짐과 관계없이 가동 질량체의 이동공간을 충분히 확보할 수 있도록 하는 기계장치의 개발이 선행될 필요가 있다. 즉, 이 기계장치는 기존의 기계장치를 보완하여 선체의 기울어짐에 관계없이 레일이 항상 절대평형이 되도록 설계되어야 한다.

한편 스크류 잭(screw jack)형의 액츄에이터(actuator)는 모터, 감속장치, 스크류 등을 조합하여 모터의 회전운동을 스크류의 직선운동으로 변환시키는 기구이며, 감속장치를 통과하는 과정에서 회전속도는 감소되고 출력축 스크류의 직선 추력은 증가된다. 그리고 이것은 유·공압 실린더에 비해 비교적 간단한 시스템으로 추력을 발생시킬 수 있다.

본 연구는 스크류 잭과 댐퍼(damper)를 이용하여 가동질량체의 이동경로인 곡선레일을 선체의 기울기와 관계없이 항상 수평으로 유지할 수 있는 제어시스템의 구축에 목적을 두고 있다. 스크류 잭은 입력 출력의 감속비가 크고 중량물의 이송이 가능하지만 잭에 부착된 모터의 회전수는 정격보다 현저히 낮

---

접수일 : 2006년 12월 29일, 채택확정 : 2007년 1월 20일  
 변정환(책임저자) : 전남대학교 수산해양대학 해양기술학부  
 E-mail : bjh@chonnam.ac.kr Tel. 061-659-3135  
 최명수 : 전남대학교 수산해양대학 해양경찰학과

게 제한되므로 이송속도가 저속인 단점을 갖고 있다. 이런 특징으로 인해 스텝신호와 같은 위치지령은 제어입력 포화, 제한회전수 초과 등을 유발시킬 수 있다. 일반적인 PID제어기로 제어시스템을 구성할 경우에 위치지령의 기울기가 크면 영점은 과도 상태에서 오버슈트와 제어입력 포화의 발생요인으로 작용한다. 이와같은 사항을 고려하여 피드포워드 경로에 적분기, 피드백 경로에 비례미분기를 갖는 I-PD제어기<sup>6~8)</sup>를 이용하여 위치제어시스템을 구축한다. 끝으로 위치지령 및 외란 대한 시뮬레이션을 통하여 개발된 곡선레일 수평유지 제어시스템의 유효성을 검증한다.

## 2. 평형장치의 모델링

Fig. 1은 선박의 횡동요 감쇠장치인 레일을 수평으로 유지하기 위해 설계된 장치의 개략도이다. 산업현장에서 이송기구로 이용되는 잭은 구조적으로 견고하고, 중량물의 지지가 가능하지만 이송속도가 저속인 특징을 갖고 있다. 본 연구에서는 레일의 수평유지를 위한 액츄에이터로 축 이동형 스크류 잭을 이용한다. 레일은 잭의 축에 설치된 선회축(pivot)에 의해 지지 및 회전된다. 수평유지의 속응성은 레일의 회전속도에 의해 결정되므로 기구학적으로 회전속도를 증가시키기 위해 레일의 중심부에 설치된 부동힌지지주(hinged immovable support)와 스크류 잭 간의 거리를 가능한 좁혀서 설치한다.

그리고 스크류 잭에 부착된 모터를 구동시키면 레일은 부동힌지지주를 중심으로 회전하게 된다. 레일의 빠르고 정밀한 수평유지를 위해서는 경사센서(tilt sensor)에 의해 발생하는 위치지령을 잭이 오차 없이 추종해야 한다. 그리고 가동질량의 좌우 급가속 이동으로 발생하는 토크부하(torque load)의 영향을 감소시키기 위해 댐퍼를 설치한다.

스크류 잭의 축을 상하로 이동시키는 직류 모터의 회전시스템에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

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

여기서  $\ddot{\theta}_m(t)$ 는 각가속도[rad/s<sup>2</sup>],  $T_m(t)$ 는 모터토크,  $T_r(t)$ 는 레일이 스크류 잭에 가하는 부하토크[Nm],  $J_m$ 은 질량관성모멘트[kgm<sup>2</sup>]이다.

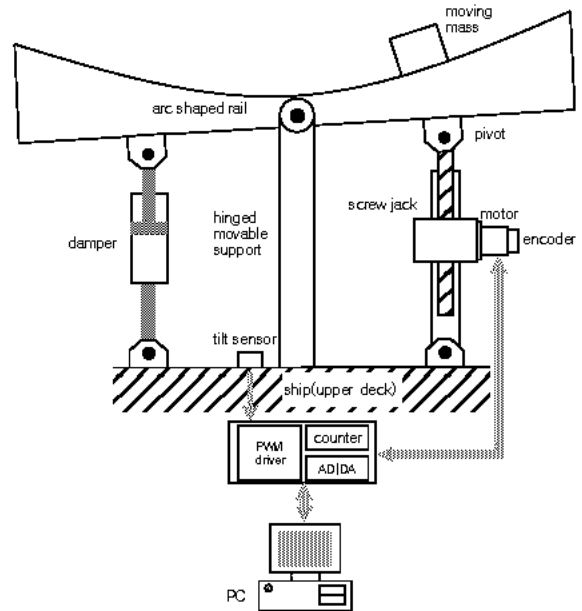


Fig. 1 Schematic diagram of a balancing control apparatus for the anti-rolling rail.

또한 직류모터의 전기시스템에 대한 회로방정식은 다음과 같다.

$$T_m(t) = K_t (K_u u(t) - K_e(t) \dot{\theta}_m(t)) / R_a \quad (2)$$

여기서  $K_u$ 는 증폭기 이득,  $u(t)$ 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 모터의 회전각  $\theta_m$ 과 스크류 잭 축의 변위  $y_1$ 에 대한 관계는 다음과 같다.

$$y_1(t) = \lambda \theta_m(t) \quad (3)$$

여기서  $\lambda = l/2\pi$ [m/rad],  $l$ 은 모터의 1회전에 대한 스크류 잭 축의 이동거리[m]이다.

식 (1)~(3)을 이용하여  $u(t)$ 와  $y_1(t)$ 의 관련 항으로 정리하면 모터가 포함된 스크류 잭의 운동방정식은 다음과 같이 된다.

$$\frac{1}{\lambda} \frac{J_m}{K_t} \ddot{y}_1(t) + \frac{1}{\lambda} \frac{K_e}{R_a} \dot{y}_1(t) + \frac{1}{K_t} T_r(t) = \frac{K_u}{R_a} u(t) \quad (4)$$

여기서  $\dot{y}_1(t)$ 는 스크류 잭 축의 속도[m/s],  $\ddot{y}_1(t)$ 는 가속도[m/s<sup>2</sup>]이다.

한편 Fig. 2는 스크류 잭에 의한 레일의 운동방정식을 구하기 위한 자유물체도를 나타내고 있다. Fig. 2에서 중심  $o$ 점으로부터  $l_j$ ,  $l_d$ 만큼 떨어진  $a$ ,  $b$  지점에 스크류 잭에 의한 힘  $f_j(t)$ 와 점성댐퍼의 감

쇠력  $f_d(t)$ [N]가 작용하면 레일은 회전운동을 하게 되며, 운동방정식은 다음과 같이 된다.

$$J\ddot{\theta}_r(t) = f_j(t)l_j - f_d(t)l_d \quad (5)$$

여기서  $\dot{\theta}_r(t)$ 는 각속도[rad/s<sup>2</sup>],  $J$ 은 레일의 질량관성모멘트[kgm<sup>2</sup>]이다.

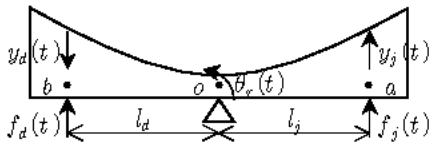


Fig. 2 The free body diagram of a arc shaped rail.

그리고 레일의 회전각  $\theta_r(t)$ 에 대한 스크류 잭 축과 댐퍼가 연결된 점  $a, b$ 의 변위  $y_j(t), y_d(t)$ 는 다음과 같다.

$$y_j(t) = l_j\theta_r(t) \quad (6)$$

$$y_d(t) = l_d\theta_r(t) \quad (7)$$

또한 레일이 스크류 잭으로부터 받는 힘  $f_j(t)$ 와 점성댐퍼의 감쇠력  $f_d(t)$ 는 다음과 같이 된다.

$$f_j(t) = \frac{\eta}{\lambda} T_r(t) \quad (8)$$

$$f_d(t) = B_d \dot{y}_d(t) \quad (9)$$

여기서  $\eta$ 는 스크류 잭의 마찰효율,  $B_d$ 는 댐퍼의 점성감쇠계수[Ns/m],  $\dot{y}_d(t)$ 는 점성댐퍼가 연결된 점  $b$ 의 속도[m/s]이다.

식 (6)~(9)를 식 (5)에 대입하면 레일의 회전운동 방정식은  $y_j(t)$ 와  $T_r(t)$ 의 관련 항으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\lambda J_r}{\eta l_j^2} \ddot{y}_j(t) + \frac{\lambda B_d l_d^2}{\eta l_j^2} \dot{y}_j(t) = T_r(t) \quad (10)$$

한편 하역작업 시에 용달선의 횡 경사각이 작은 값을 고려하면 레일의 회전각  $\theta_r(t)$ 도 작은 값이 되어  $y_j(t) = y_i(t)$ 로 둘 수 있다. 따라서 식 (4)를 식 (10)에 대입하여 정리하면 스크류 잭과 레일이 결합된 운동방정식은 다음과 같다.

$$M_a \ddot{y}_j(t) + M_b \dot{y}_j(t) = u(t) \quad (11)$$

여기서  $M_a = \frac{R_a}{K_a K_v} \left( \frac{J_m}{\lambda} + \frac{\lambda J_r}{\eta l_j^2} \right)$ ,  
 $M_b = \frac{K_e}{\lambda K_a} + \frac{\lambda R_a B_d l_d^2}{\eta K_a K_v l_j^2}$ 이다.

식 (11)을 라플라스 변환하여  $u(s)$ 를 입력,  $y_j(s)$ 를 출력으로 하면 제어대상의 전달함수는 다음과 같이 된다.

$$P(s) = \frac{1}{s(M_a s + M_b)} \quad (12)$$

그리고 Fig. 3은 제어대상의 블록선도를 나타내고 있다.

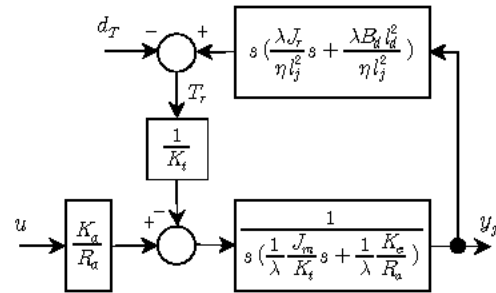


Fig. 3 The block diagram of a transfer function  $P(s)$ .

### 3. 제어기 설계

용달선의 경사에 대응하여 잭의 축을 상하로 이동시킴으로써 레일의 수평을 실현시키기 위한 제어 시스템은 Fig. 2와 같다. 본 연구에서 액츄에이터로 이용되는 스크류 잭은 입력력의 기어 비가 크므로 중량물의 이송이 가능하다. 그러나 잭에 부착된 모터의 회전수는 정격보다 현저히 낮게 제한되므로 이송속도가 저속인 단점을 갖고 있다. 이와 같은 특징으로 인해 스텝신호와 같은 위치지령은 제어입력의 포화, 제한회전수 초과 등을 유발시킬 수 있다.

일반적인 PID제어기로 제어시스템을 구성할 경우에 위치지령  $r(s)$ 의 기울기가 크면 영점은 과도상태에서 오버슈트와 제어입력 포화의 발생요인으로 작용한다. 이와 같은 사항을 고려하여 피드포워드 경로에 적분기  $C_I(s)$ , 피드백 경로에 비례미분기  $C_{PD}(s)$ 를 갖는 I-PD제어기를 이용하여 위치제어 시스템을 구축한다.

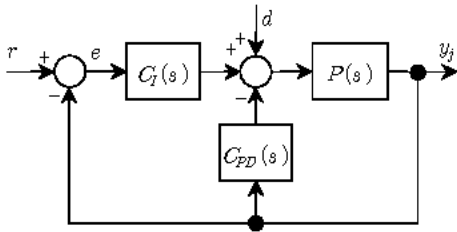


Fig. 4 The block diagram of a balancing control system for the anti-rolling rail.

그리고 스크류 잭이 위치지령  $r(s)$ 를 신속하게 추종하여 곡선레일이 수평을 유지하도록 하는 I-PD 제어기의 전달함수는 다음 식과 같다.

$$C_I(s) = \frac{K_p}{T_i s} \quad (13)$$

$$C_{PD}(s) = K_p(1 + T_d s) \quad (14)$$

여기서  $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ 는 각각 비례이득, 적분시간, 미분 시간을 의미한다.

식 (12), (13), (14)를 이용하면 폐루프 전달함수는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{y_j(s)}{r(s)} &= \frac{P(s)C_I(s)}{1 + P(s)(C_I(s) + C_{PD}(s))} \\ &= \frac{\frac{K_p}{M_a T_i}}{s^3 + \frac{M_b + K_p T_d}{M_a} s^2 + \frac{K_p}{M_a} s + \frac{K_p}{M_a T_i}} \end{aligned} \quad (15)$$

제어기 계수  $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ 의 결정방법은 다음과 같다. 퍼센트 오버슈트  $O_p$ 와 정착시간  $T_s$ 를 설계조건으로 하여 대표극점을 구한다.

$$q_p, \hat{q}_p = -\zeta\omega_n + j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2} \quad (16)$$

여기서  $\zeta$ 는 감쇠비,  $\omega_n$ 는 고유진동수이다.

$$\zeta = \sqrt{\frac{[\ln(O_p/100)]^2}{\pi^2 + [\ln(O_p/100)]^2}}, \omega_n = \frac{4}{T_s \zeta} \quad (17)$$

또한  $-\zeta\omega_n \gg r_p$ 를 만족하는 실수축상의 한 극점  $r_p$ 를 지정하면 설계조건을 만족하는 특성방정식은 다음으로 된다.

$$\begin{aligned} s^3 - (q_p + \hat{q}_p + r_p)s^2 + (q_p \hat{q}_p + q_p r_p + \hat{q}_p r_p)s \\ - q_p \hat{q}_p r_p = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

한편 식 (15)에서 구한 특성방정식과 식 (18)의 계수를 비교하면 제어기의 계수는 다음과 같이 결정된다.

$$\begin{aligned} K_p &= M_a(q_p \hat{q}_p + q_p r_p + \hat{q}_p r_p) \\ T_i &= -\frac{K_p}{M_a q_p \hat{q}_p r_p} \\ T_d &= -\frac{M_a(q_p + \hat{q}_p + r_p) + M_b}{K_p} \end{aligned} \quad (19)$$

#### 4. 시뮬레이션 및 고찰

본 연구에서는 곡선레일의 수평유지에 필요한 모터, 스크류 잭, 댐퍼 등의 계수값을 다음과 같이 설정한다. 모터는 200W급이며, 증폭기 이득  $K_g$ 는 15, 전기자저항  $R_a$ 는  $1.53[\Omega]$ , 역기전력상수  $K_e$ 는 0.22 [V/rad/s], 토크상수  $K_t$ 는 0.22[Nm/A], 질량관성모멘트  $J_m$ 은  $0.0018[\text{kgcm}^2]$ 이다. 그리고 스크류 잭은 정격 추진력 및 이동속도가 981[N], 0.09[m/s]이며, 마찰효율  $\eta$ 는 0.21, 모터 1회전에 대한 축의 이동거리  $l$ 은 0.003[m]이다. 그리고 댐퍼의 점성감쇠계수  $B_d$ 는  $500[\text{Ns/m}]$ , 레일의 질량관성모멘트  $J_r$ 은  $15[\text{kgm}^2]$ 이며, 부동 힌지지주의 중심으로부터 스크류 잭 및 댐퍼까지의 거리  $l_r$ ,  $l_d$ 는 0.2[m], 0.7[m]이다. 그리고 설계조건인 퍼센트 오버슈트  $O_p$ 와 정착시간  $T_s$ 를 각각 5%, 0.05[s]로 설정하고, 위에서 제공된 장치의 계수값을 식 (12)~(19)에 대입하면 I-PD 제어기의 계수값을 구한다.

그리고 제어대상의 계수값 변동 및 토크 외란 인가에 의한 곡선레일 수평유지 제어시스템의 응답특성 변화를 비교확인하기 위한 시뮬레이션 조건은 다음과 같다.

- 곡선레일의 질량관성모멘트  $J_r$ 을  $15[\text{kgm}^2]$ 에서  $75[\text{kgm}^2]$ 으로 댐퍼의 점성감쇠계수  $B_d$ 를  $500[\text{Ns/m}]$ 에서  $2500[\text{Ns/m}]$ 으로 변동시키다.
- 가동 질량체가 곡선레일 위에서 왕복 운동하는 것을 고려하기 위해 정현파의 토크외란  $d_T(t) = 5\sin(4\pi t + 2\pi)[\text{Nm}]$ 을 인가한다.

Fig. 5는 용달선의 경사에 대응하여 곡선레일을 평형상태로 만들기 위해 스크류 잭에 인가된 위치지령  $r$ 에 대한 출력응답 및 제어입력을 나타내고 있다. 위치지령  $r$ 은 0.5[s]의 시점에서 발생되며, 이동거리가 0.03[m]인 스텝신호이다.

Fig. 5(a)의  $y_1$ 은 레일의 질량관성모멘트  $J_r$  및

댐퍼의 점성감쇠계수  $B_d$ 의 변동이 없을 경우의 응답이다.  $y_2$ 는  $J_r$ 을 변동시킨 경우의 응답이며,  $y_3$ 는  $B_d$ 를 변동시킨 경우의 응답을 나타내고 있다. 그리고 Fig. 5(b)의  $u_1, u_2, u_3$ 는 각각  $y_1, y_2, y_3$ 에 대한 모터 드라이버에 입력되는 전압을 나타내고 있다.  $y_1$ 은 I-PD제어기가 설계조건에 퍼센트 오버슈트  $O_p$ 와 정착시간  $T_s$ 를 충족시키고 있음을 나타내고 있다. 그리고 식 (12)의 제어대상에 대해 I-PD제어기로 제어시스템을 구성하면 식 (15)의 페루프 전달함수와 같이 영점이 존재하지 않으므로 오버슈트를 발생시키는 요인 중의 하나를 제거한 것으로 볼 수 있다. 따라서 Fig. 5(b)의  $u_1$ 과 같이 과도상태에서 급격한 기울기의 제어입력을 피할 수 있으며, 일반적인 PID제어기와 달리 작은 값이 된다. 한편 계수값이 변동된 경우, 과도상태에서  $u_1$ 에 비해  $u_2, u_3$ 의 최대 크기는 증가되며,  $y_1$ 에 비해  $y_2$ 는 응답이 빠르며,  $y_3$ 는 응답이 늦고 오버슈트가 발생되지만 정상상태에서는 동일하게 오차가 소멸된다.

Fig. 5에서는 스크류 잭이 위치지령  $r$ 을 오차없이 추종하여 곡선레일이 평형상태로 될 수 있음 확인하였다. 다음은 선체의 횡 동요를 억제하기 위해 곡선레일 위에서 이동하는 가동 질량체의 왕복운동이 곡선레일의 평형상태에 어떤 영향을 미치는지 검토한다.

Fig. 6은 2.5[s]에서 4.0[s]까지 정현파의 토크외란  $d_T$ 를 Fig. 3과 같이 스크류 잭에 인가한 경우의 응답이며, 이 외란은 모터의 부하로 작용하여 곡선레일의 원활한 평형유지를 방해하는 역할을 한다.

Fig. 6(a)는 외란  $d_T$ 에 의한 스크류 잭의 위치변동을 나타내고 있으며,  $y_1$ 은  $J_r, B_d$ 의 변동이 없을 경우,  $y_2$ 와  $y_3$ 는 각각  $J_r, B_d$ 를 증가시킨 경우의 응답이다. 그리고 Fig. 6(b)의  $u_1, u_2, u_3$ 는 Fig. 5(b)에서와 동일하게  $y_1, y_2, y_3$ 의 제어입력이다.  $y_2$ 는  $J_r$ 을 증가시키면  $y_1$ 에 비해 외란  $d_T$ 에 민감하고  $u_2$ 도  $u_1$ 에 비해 증가된다. 그리고  $y_3$ 는  $B_d$ 를 증가시키면  $y_1$ 에 비해 외란  $d_T$ 에 둔감하고  $u_3$ 도  $u_1$ 에 비해 작지만 Fig. 5에서와 같이 응답성이 낮다. 그러나  $y_2, y_3$ 은  $y_1$ 과 같이 제한된 범위 이상으로는 증가되지 않으며, 외란이 소멸되면 일정한 시간이 경과한 후 원래의 상태로 복귀됨을 나타내고 있다.

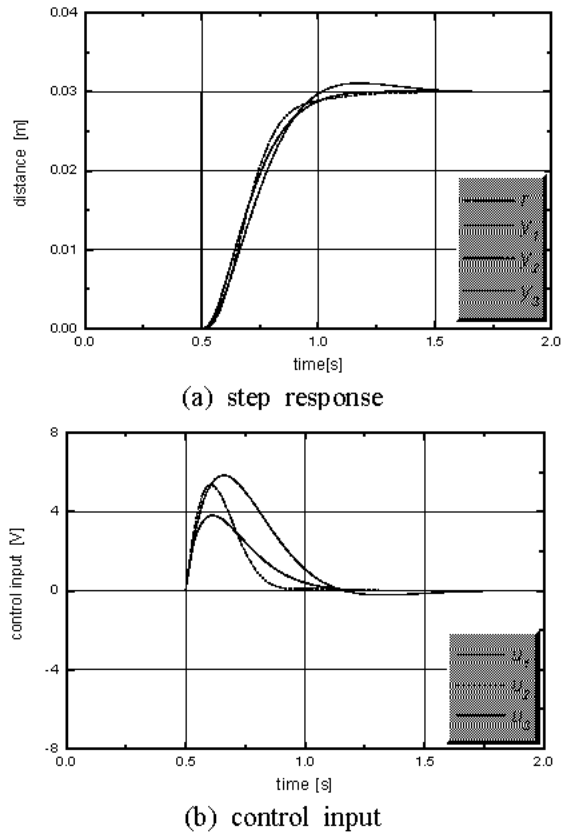


Fig. 5 The step responses and control input.

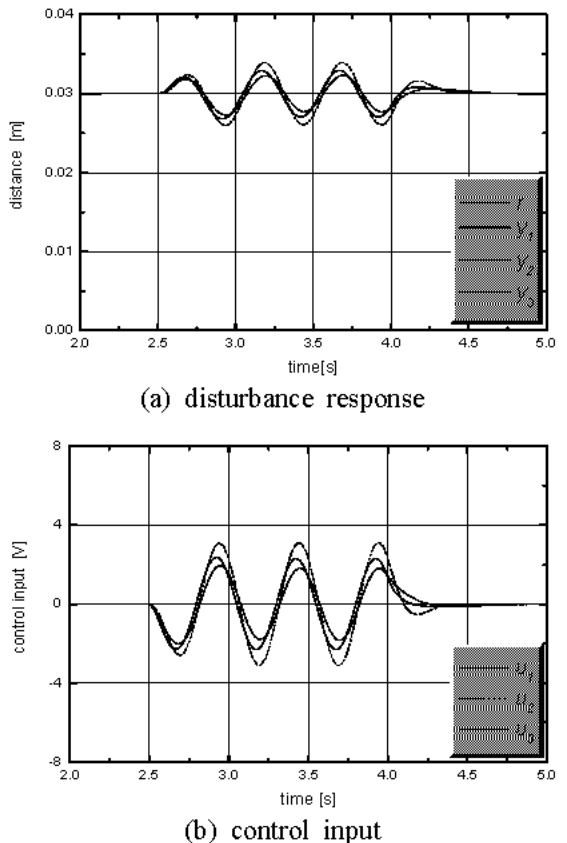


Fig. 6 The disturbance response and control input.

## 5. 결 론

본 연구는 스크류 잭과 댐퍼를 이용하여 곡선레일을 원활하게 수평으로 유지할 수 있는 제어시스템의 구축에 목적을 두고 있다. 스크류 잭은 입출력의 감속비가 크므로 중량물의 이송이 가능하지만 이송속도가 저속으로 되는 단점을 갖고 있다. 따라서 오버슈트와 제어입력 포화가 발생되지 않도록 피드포워드 경로에 적분기, 피드백 경로에 비례미분기를 갖는 I-PD제어기를 이용하여 위치제어시스템을 구축하였다. 그리고 위치지령 및 토크외란 대한 시뮬레이션 응답으로부터 다음사항을 확인하였다.

- 설계된 제어기는 과도상태에서 제어입력의 포화를 억제하면서 스크류 잭이 위치지령을 원활히 추종하도록 하였다. 따라서 스크류 잭은 곡선레일을 평형상태 만들기 위한 액츄에이터로 이용될 수 있음을 확인하였다.
- 정현파의 토크외란에 대해 스크류 잭은 제한된 범위 내에서 작은 영향을 받았으며, 외란이 소멸되면 원래의 안정상태로 복귀하였다. 이것은 횡 동요억제를 위해 가동 질량체가 레일 위를 왕복운동 하더라도 스크류 잭이 곡선레일을 안전하게 지지할 수 있음을 의미한다.

이상의 결과로부터 I-PD제어기를 이용하여 설계된 수평유지 제어시스템의 유효성을 확인할 수 있었다.

## 후 기

이 논문은 2006년 전남대학교 수산과학연구소 Innovation o6사업에 의해 수행된 연구입니다.

## 참고 문헌

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. 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.
5. 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.
6. Doyle, J. C., Francis, B. A. and Tannenbaum, A. R., 1992, "Feedback Control Theory", Maxwell Macmillan.
7. Ogata, K., 1997, "Modern Control Engineering", Prentice Hall.
8. 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.