

## 방향타를 이용한 선박 횡동요 제어계 설계에 관한 연구

김 영 복\*

(2001년 6월 11일 접수, 2001년 11월 16일 심사완료)

### A Study on Rudder-Roll Stabilization System Design for Ship

Young-Bok Kim

**Key Words:** Roll Motion(횡동요), Roll Stabilization Control System(횡운동 안정화 제어계), Roll Stabilizing Fin(횡동요 안정화 핀), Two-Degree-of-Freedom Servosystem(2자유도 서보계),  $H_\infty$  Control( $H_\infty$  제어), Yaw Control(요 운동 제어), Course Keeping(항로유지).

#### Abstract

In ship operation the consequence of roll motions can seriously degrade the performance of mechanical and personnel effectiveness. So many studies for the roll stabilization control system design have been performed and very good results have been achieved. In many studies, the stabilizing fins are used. Recently rudders, which have been extensively modified, have been used to exclusively to stabilize the roll. This paper examines the two-degree-of-freedom servosystem design technique to synthesize the yaw control system which achieves the course keeping object of the ship and the  $H_\infty$  control approach to suppress the roll motion, respectively.

#### 1. 서론

선박의 횡동요를 억제하기 위한 시스템 개발의 주된 목적은 화물의 안전한 수송 및 횡동요로 인하여 승선자들이 느끼는 피로감을 감소시킴으로써 작업능률을 향상시키는데 있다. 안전성 면에서 고찰해 보면 과도한 횡동요는 승선자들에게 두통, 멀미 및 피로감을 가중시켜 작업중의 안전사고를 유발시키고 결국은 작업능률을 저하시키게 된다. 또한 함선 및 참치어로선 등과 같이 선상에 항공기를 착륙시키고자 할 경우나 전투상황에서 적함에 대응하기 위해 정확하고 신속한 작전업무 수행하기 위해서는 선박의 횡동요 억제는 상당히 중요하다. 이와 같이 여러 가지 측면에서 고찰해 볼 때 선박의 횡동요를 억제하는 문제는 중요한 연구분야임을 인식할 수 있게 된다.

그래서 이러한 문제를 해결하기 위해 다양한 연구가 진행되어 보고되고 있다.<sup>(1~5)</sup> 그 예를 다음 및 Table 1과 같이 분류하여 각각에 대한 개략적인 특징을 기술한다.

**Bilge Keels** : 선체 길이방향으로 전체 선체길이의 25~50%에 해당하는 핀(fin)을 선박의 측면에 설치한다. 비교적 값이 싼 편이나 핀의 부착으로 인하여 선체저항을 증가시키는 단점이 있다. 선박의 횡동요 고유주파수 범위내에서 억제효과를 얻을 수 있으며 선속(ship speed)이 증가함에 따라 그 효과도 증가한다.

**Anti-Rolling Tanks** : 이 장치의 장점은 저속영역에서도 횡동요 억제효과를 얻을 수 있다는 것이다. 단점은 미터센터(meter center) 높이의 감소와 탱크를 설치할 공간이 필요하다는 것이다.

**Fin Stabilizers** : 이 장치는 선박이 그렇게 저속으로 항해하지 않는 한 상당히 뛰어난 횡동요 억제효과를 얻을 수 있기 때문에 아주 매력적인 장점을 가진 장치라고 할 수 있다. 그러나 특수한

\* 회원, 군산대학교 해양과학대학 기관공학과

E-mail : kpjiwoo@kunsan.ac.kr

TEL : (063)469-1849 FAX : (063)469-1841

Table 1 Overall comparison for ship roll stabilizer systems<sup>(5)</sup>

Type	General Application	% Roll Reduction	Price (\$x1000)	Installation	Remarks
FINS (small fixed)	mega yachts	90	100-200	hull-attachment; supply and install power and control cable	speed loss ; largest size about
FINS (retractable)	passenger, cruise, ferries, large RO/RO, naval combatants	90	400-1500	hull-attachment; supply and install power and control cable	size range from 2m <sup>2</sup> to 15m <sup>2</sup>
FINS (large fixed)	naval combatants	90	300-1300	hull-attachment; supply and install power and control cable	speed loss
TANKS (free surfaces)	works vessels, ferries, small passenger and cargo ships	75	30-50	install steelwork supply install power and control cables	includes liquid level monitor
TANK (U-tube)	work vessels, RO/RO vessels	75	200-300	install steel work and piping and valves; install instrument cables	includes hell control system capability
RRS	small and high speed vessels	50-75	50-250	install power and control cables	new development ; more robust steering gear may be required
Bilge keels	universal	25-50		hull attachment	speed loss

경우를 제외하고 핀을 선박의 측면에 부착하기 때 문에 Bilge keels의 경우와 마찬가지로 선체 저항을 증가시키며 장치의 설치에 상당한 비용이 요구된다.

**Rudder-Roll Stabilizer (RRS)** : 이 장치는 선박에 설치되어 있는 방향타(Rudder)를 이용하기 때문에 fin stabilizer에 비해 경제적인 부담감이 적으면서도 비슷한 효과를 얻을 수 있다. 단 보다 나은 효과를 얻기 위해서는 상대적으로 응답성이 빠른 방향타가 필요하며 이때는  $\delta_{max} = 5 \sim 20$  (deg/s) 정도의 응답성을 가진 장치가 요구된다.( $\delta$ :방향타각) 또 하나의 단점은 선박이 저속으로 운항할 경우에는 큰 효과를 볼 수 없다는 것이다.

위 및 Table 1에 기술한 4가지 횡동요 방지장치 중 본 연구에서는 Rudder-Roll Stabilizer (RRS), 즉 방향타를 이용한 횡동요 방지에 대해 고찰한다. 앞서 기술한 것과 같이 이 장치는 fin stabilizer와 비슷한 횡동요 억제효과를 얻을 수 있으면서도 장치의 설치 등에 따른 경제적 부담감이 극히 적을 뿐 아니라 설치 상에 있어서의 어려움도 적다. 단 보다 고도의 횡동요 억제효과를 얻기 위해서는 응답성이 빠른 방향타가 필요하나 최근에는  $\delta_{max}$ 가 20(deg/s)이상의 방향타도 개발된 상태이다. 그렇기 때문에 별다른 어려움 없이 방향타의 조정에 의해 선체 횡동요 억제효과를 얻을 수 있으며 강인제어(robust control) 알고리즘 등을 이용하여 하나의 제어기로 제어계를 구성하여 횡동요 억제 및 목표 선수각에 오차없

이 추종하도록 하는 두가지 설계사양에 대해 만족할 만한 결과를 얻은 예도 보고되어 있다.<sup>(4)</sup>

그러나 요 운동(yaw motion)과 횡동요(roll motion)를 제어하기 위한 제어입력 신호의 주파수 대역이 다르기 때문에 그에 따른 필터설계를 포함한 가중함수(weighting function)의 선정에 상당한 어려움이 수반되며 결국 구해진 제어기는 고차(17~20차)로 되어 제어계 전체에 부담을 주게 된다. 그리고 운전조건의 변화 등에 의해 방향타에 의한 횡동요 방지장치의 운용이 곤란하게 될 경우에는 요 운동 제어기능 만으로 자동항행을 수행해야 하기 때문에 본 연구에서와 같이 요 운동과 횡동요에 대해 각각의 제어계 특성에 맞게 제어기를 독립적인 개념으로 설계하는 것이 바람직할 것이다. 그래서 본 연구에서는 요 운동 제어계에 대해서는 서보기능을 강화하고 횡동요 제어계에 대해서는 외란에 대한 강인성을 충분히 고려하여 제어기를 각각 설계한다.

## 2. RRCS(Rudder-Roll Control System)의 모델링

### 2.1 제어대상선박의 모델링

횡동요 및 요 운동간의 상관관계를 고려하여 선형화된 모델은 다음과 같이 표현된다.<sup>(6)</sup>

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_s \\ \dot{r}_s \\ \dot{p} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_s \\ r_s \\ p \\ \phi \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta \quad (1)$$

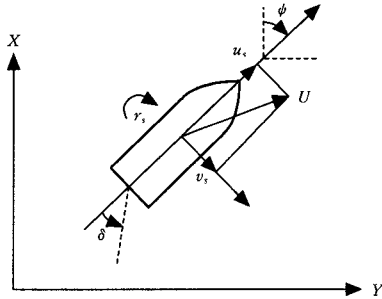


Fig. 1 Variables in the horizontal plane

단,  $u_s$  : 서지(surge) 각속도,  $v_s$  : 스웨이(sway) 각속도,  $r_s$  : 요 각도,  $p = \dot{\phi}$ ,  $r_s = \dot{\psi}$ 이며(Fig. 1 참조),  $a_{ij}$  및  $b_i$  ( $i=1, \dots, 3, j=1, \dots, 4$ )는 대상선박에 따라 결정되는 적당한 크기의 상수이다. 또한 식 (1)의 모델은 다음과 같이 스웨이-요와 횡동요에 관한 2개의 서브시스템(subsystem)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_s \\ r_s \\ \dot{\psi} \\ \dot{p} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & 0 & a_{23} & a_{24} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & 0 & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_s \\ r_s \\ \psi \\ p \\ \phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ 0 \\ b_3 \\ 0 \end{bmatrix} \delta \quad (2)$$

그리고 Van der Klugt<sup>(2)</sup>는 전달함수표현법에 기초하여 식 (3)과 같이 가장 중요한 cross-coupling 요소만을 포함하는 간략화 모델을 제안하였다. 이 모델은 방향타를 이용한 횡동요 제어계 및 자동항행시스템 설계에 아주 유용한 것으로 알려져 있다.

$$\begin{aligned} v'_s(s) &= \frac{K_{dv}}{1+T_v s} \delta(s) \\ \phi(s) &= \frac{\omega_n^2}{s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n^2} [K_{dv}\delta(s)+K_{vp}v'_s(s)+w_\phi(s)] \\ \phi(s) &= \frac{1}{(1+T_r s)s} [K_{dr}\delta(s)+K_{vr}v'_s(s)+w_\phi(s)] \quad (3) \end{aligned}$$

식 (3)에서  $v'_s$ 는 방향타 운동에 의해 발생하는 스웨이 방향의 관측된 속도를 나타내는 새로운 상태변수이다. 그리고  $w_\phi$  및  $w_\psi$ 는 파랑에 의한 영향을 나타내는 외란신호이다. 그 외의 파라미

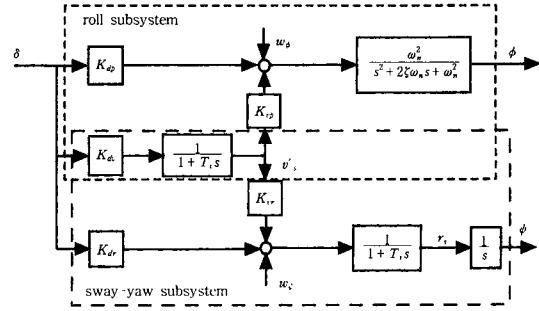


Fig. 2 Diagram showing the cross-coupling between the sway-yaw and roll subsystems<sup>(5)</sup>

터들은 제3장에서 설명하며 식 (3)은 다음과 같이 블록선도로 표현할 수 있다.

### 2.2 외란(wave) 모델

선체의 운동은 방향타 및 외란(파랑)에 의해 결정되며 외란으로 고려되는 파랑은 1차계로 표현된 모델이 자주 이용된다. 본 논문에서는 2차계로 근사화된 모델<sup>(7)</sup>을 이용하여 시뮬레이션을 실행한다. 즉

$$h_i(s) = \frac{2\zeta_0 \sigma_i}{s^2+2\zeta_0 \omega_0 s+\omega_0^2}, \quad i=1, 2. \quad (4)$$

여기서  $\sigma_i$ 는 파랑의 강도를 나타내는 상수,  $\zeta_0$ 는 댐핑계수이며  $\omega_0$ 는 파랑의 지배 주파수이다. 이것으로부터 Fig. 2의 외란 항은

$$w_\psi(s) = h_1(s)w_1(s), \quad w_\phi(s) = h_2(s)w_2(s) \quad (5)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 여기서  $w_1(s)$ ,  $w_2(s)$ 는 Gaussian white noise를 나타낸다.

### 2.3 조타장치의 비선형 특성

조타장치를 비롯하여 선박을 조종하기 위한 각종 액추에이터는 강한 비선형적 특성을 내포하고 있다. 특히 RRS의 경우에는 방향타 각의 크기와 각속도에 제한을 갖게 되며 이것이 장치의 강한 비선형성을 대표하는 것이다.

일반적으로 상선의 경우에는

$$\delta_{\max} \in [25, 35](\text{deg}), \quad \dot{\delta}_{\max} \in [2, 7](\text{deg/s}) \quad (6)$$

정도이다. 그러나 보다 효과적인 횡동요 억제를 위해서는 식 (6)에 나타낸 각각의 제한값들이 상향조정될 필요가 있다. 최근에는 이와 같은 요구를 수용할 수 있도록 그 제한값, 특히 방향타 각속도  $\dot{\delta}_{\max}$  가 15~20(deg/s) 정도로 성능이 개선된 장치도 있다. 이와 같이 본 논문에서는 조타 장치의 비선형 특성으로 식 (6)과 같은 타 운동에 대한 제한값들 만 고려한다.

### 3. 제어계의 설계

서론에서도 기술하였듯이 요 운동과 횡동요를 하나의 제어기에 의한 통합적 제어방식에 기준을 두고 제어하고자 한다면 이러한 설계과정을 통해 구한 제어기는 고차로 되어 제어계 전체에 부담을 주게될 가능성이 크다. 또한 운전조건의 변화 등에 의해 방향타에 의한 횡동요 방지장치의 운용이 곤란하게 될 때에는 요 운동 제어기능 만으로 자동항행을 수행해야 하며 이 경우에는 설정된 제어목적을 달성하는데 어려움이 야기될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 요 운동과 횡동요에 대해 각각의 제어계 특성에 맞게 요 운동 제어계에 대해서는 서보기능을 강화하고 횡동요 제어계에 대해서는 외란에 대한 강인성을 충분히 고려하여 제어기를 각각 독립적으로 설계한다.

#### 3.1 제어계 설계사양

RRCS(rudder-roll control system) 설계에 있어서 고려해야할 설계사양은 다음과 같다.

1. 횡운동(횡동요)에 있어서 고유주파수 및 감쇄비의 증가.
2. 설정된 범위 내에서 선수각(ship-heading angle)의 제어.

위의 설계사양은 주파수영역에서 각각 그 특성을 분리하여 고찰하면 쉽게 달성할 수 있다. 즉, 선수각을 설정된 범위내에서 정확하게 제어하기 위해서는 저주파 특성을 갖는 방향타 운동이 필요하며 선박 횡동요를 억제하기 위해서는 고주파 특성을 갖는 방향타 운동이 요구된다.

우선 Fig. 2(및 식 (3))로부터  $w_{\phi} = \dot{w}_{\phi} = 0$  로 두면 제어대상의 전달함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\phi}{\delta}(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} [K_{\phi\delta} + K_{\dot{\phi}\delta} \frac{K_{\dot{y}_p}}{1 + T_v s}] \quad (7)$$

$$\approx \frac{\omega_n^2 K_2 (1 + T_4 s)}{(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)(1 + T_2 s)}$$

$$\frac{\dot{\phi}}{\delta}(s) = \frac{1}{(1 + T_r s)s} [K_{\dot{\phi}\delta} + K_{\dot{\phi}\dot{\delta}} \frac{K_{\dot{y}_p}}{1 + T_v s}] \quad (8)$$

$$\approx \frac{K_1 (1 + T_3 s)}{(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)s}$$

여기서

$$K_1 = K_{\dot{\phi}\delta} K_{\dot{y}_p} + K_{\dot{\phi}\dot{\delta}}, \quad T_1 = T_r, \quad T_3 = K_{\dot{\phi}\delta} T_v / K_1 \quad (9)$$

$$K_2 = K_{\phi\delta} K_{\dot{y}_p} + K_{\phi\dot{\delta}}, \quad T_2 = T_v, \quad T_4 = K_{\phi\dot{\delta}} T_v / K_2$$

본 연구에서는 제어출력으로 요 운동과 횡동요를 고려하고 있다. 따라서 제어계를 설계할 때 요 및 횡동요를 제어하기 위한 제어계를 각각 별도로 설계하기로 한다.

#### 3.2 2자유도 서보계(Two-degree-of-freedom servo-system) 설계법을 이용한 요 운동 제어기의 설계

제어대상의 상태방정식은

$$\Sigma: \begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (10)$$

으로 표현되어 있다고 한다. 여기서  $x$ 는  $n$ 차원의 상태변수,  $u$ 는  $m$ 차원의 제어입력,  $y$ 는  $m$ 차원의 제어출력이며  $A, B, C$ 는 적당한 크기의 실수행렬이다. 이러한 시스템에 대해 스텝상의  $m$ 차원 목표신호로서

$$r_i(t) = \begin{cases} r_{i+} & (t \geq 0) \\ r_{i-} & (t < 0) \end{cases} \quad (11)$$

를 생각한다. 목표값  $r_{i+}$ 는 시각  $t=0$ 에서 주어진다고 한다. 그리고 목표신호  $r_{i+}$ 에 제어출력이 추종하도록 하는 제어계를 구성하기 위해  $(A, B)$ 는 가안정(stabilizable),  $(C, A)$ 는 가검출(detectable) 및

$$\det \begin{bmatrix} A & B \\ C & 0 \end{bmatrix} \neq 0 \quad (12)$$

라고 한다. 이러한 가정하에서 Fig. 3과 같은 2자유도계로서의 적분형 서보계가 제안되어져 있다.<sup>(8~16)</sup> 여기서 2자유도계라는 것은 목표신호에 대한 추종특성과 제어대상의 모델링 오차나 스텝상의 외란에 대한 제어특성을 독립적으로 설계하는 것이다.

제어대상의 모델링 오차나 스텝상의 외란에 대처하기 위해서는 내부모델 원리(internal model principle)에 따라 적분보상이 필요하나 그와 같은 불확실성이 존재하지 않을 경우에는 적분보상은 필요하지 않게 된다. 2자유도 제어계 설계의 관점에서 이 문제를 고려한다면 목표신호에 대한 추종특성과 모델링 오차나 외란에 대한 제어특성은 독립적으로 설계해야 한다는 것을 의미한다. 따라서 제어계의 적분보상효과는 그와 같은 불확실성이 존재할 경우에만 나타나면 된다. 이와 같은 특성을 갖는 2자유도계로서의 서보계의 구성법에 대해 설명한다. 우선 적분보상으로서 추종오차  $e(t)$ 를 적분하는

$$w(t) = \int_0^t e(\tau) d\tau + w(0) \quad (13)$$

형태를 고려한다. 그리고 적분보상효과를 제어계에 부여하기 위한 새로운 입력을  $v(t) \in R^m$ 로 두고 제어입력을

$$u(t) = F_0 x(t) + H_0 r_i(t) + v(t) \quad (14)$$

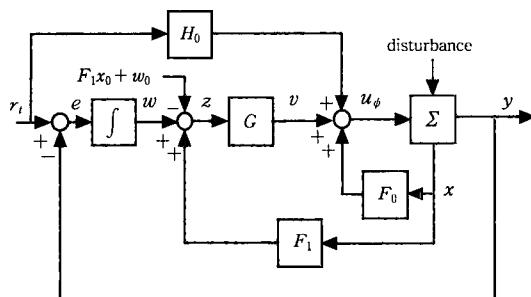


Fig. 3 A two-degree-of-freedom servosystem (yaw motion control system)

라 두면 상태방정식은

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{w}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A+BF_0 & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ w(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} v(t) + \begin{bmatrix} BH_0 \\ I \end{bmatrix} r_i(t) \quad (15)$$

$$y(t) = [C \ 0] \begin{bmatrix} x(t) \\ w(t) \end{bmatrix}$$

로 된다. 여기서  $F_0, H_0$ 는 적분보상을 행하지 않은 추종계(tracking system)의 이득이며 이것은 최적레귤레이터 이론에 의해 Riccati 방정식

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (16)$$

의 반정정(positive semidefinite)해  $P$ 를 이용하면 식 (17)과 같이 결정된다.<sup>(8~16)</sup> 단,  $Q \geq 0, R > 0$  이다.

$$F_0 = -R^{-1}B^T P$$

$$H_0 = [-F_0 \ I] \begin{bmatrix} A & B \\ C & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} \quad (17)$$

그런데,

$$v(t) = 0 \quad (18)$$

라 두면 식 (14)의 제어입력은 적분보상기를 갖지 않는 추종계의 제어입력과 일치한다. 이때 (15)식의 제어계에 있어서 상태  $x(t)$ 의 거동(behavior)은

$$x(t) = (A + BF_0)^{-1} \dot{x}(t) - (A + BF_0)^{-1} BH_0 r_i(t) \quad (19)$$

와 같이 나타낼 수 있고 추종오차  $e(t)$ 는

$$\begin{aligned} e(t) &= r_i(t) - Cx(t) \\ &= r_i(t) - C(A + BF_0)^{-1} \dot{x}(t) \\ &\quad + C(A + BF_0)^{-1} BH_0 r_i(t) \\ &= -C(A + BF_0)^{-1} \dot{x}(t) \end{aligned} \quad (20)$$

와 같이 쓸 수 있다. 따라서 오차의 적분값  $w(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$w(t) = \int_0^t e(t)dt + w(0) \quad (21)$$

$$= -F_1x(t) + F_1x(0) + w(0)$$

단,

$$F_1 = C(A + BF_0)^{-1} \quad (22)$$

이다. 여기서  $z(t)$ 를

$$z(t) = w(t) + F_1x(t) - F_1x(0) - w(0) \quad (23)$$

와 같이 정의하면 항상

$$z(t) = 0 \quad (24)$$

가 성립한다. 여기서 새로운 입력  $v(t)$ 로서 다음과 같이 나타내어지는 것을 고려한다.

$$v(t) = Gz(t) \quad (25)$$

이때 모델링 오차나 외란이 존재하지 않으면 어떠한 이득  $G$ 에 대해서도

$$z(t) = 0, v(t) = 0 \quad (26)$$

가 성립한다. 즉, 어떠한 이득  $G$ 에 대해서도 제어대상에 모델링 오차나 외란이 존재하지 않는다면 목표신호에 대한 제어출력은 적분보상기를 갖지 않는 추종계의 제어출력에 일치한다는 것을 의미한다. 다시 말하면 적분보상효과는 그와 같은 불확실성이 존재하는 경우에 대해서만 나타난다는 것을 알 수 있다. 이상으로부터 이득  $G$ 는 목표신호에 대한 응답특성에는 어떠한 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다.

여기서 제어계가 서보계로 동작하기 위해서는 제어계가 안정하도록 하는 이득  $G$ 를 선택하지 않으면 안된다. 이와 같은 조건을 만족하는 이득  $G$ 는

$$\begin{bmatrix} I & 0 \\ F_1 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A + B(F_0 + GF_1) & BG \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & 0 \\ F_1 & I \end{bmatrix}^{-1} \quad (27)$$

$$= \begin{bmatrix} A + BF_0 & BG \\ 0 & F_1BG \end{bmatrix}$$

로부터 알 수 있듯이  $(F_1BG)$ 를 안정하게 하는 범위의  $G$ 를 선택하면 된다. 이득  $G$ 에 의해서 제어대상의 모델링 오차나 외란이 존재할 경우의 응답특성은 목표신호에 대한 응답특성과는 독립적으로 조정 가능하게 된다. 그래서 적분보상기를 포함한 확대계(augmented system)의 상태방정식은

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{w}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A + B(F_0 + GF_1) & BG \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ w(t) \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$+ \begin{bmatrix} BH_0 \\ I \end{bmatrix} r_1(t) + \begin{bmatrix} BG \\ 0 \end{bmatrix} (F_1x(0) + w(0))$$

$$y(t) = [C \quad 0] \begin{bmatrix} x(t) \\ w(t) \end{bmatrix}$$

와 같이 나타내어지며 결국 그 구조는 Fig. 3과 같다.

단, Fig. 3에서  $\Sigma$ 는 제어대상(ship)을 나타내며 외란은 여러 형태의 것을 고려할 수 있으나 특히 선체 횡동요를 억제하기 위한 제어입력(Fig. 4의  $u_\phi$ )이 여기에 포함된다.

### 3.3 횡동요 제어기의 설계( $H_\infty$ 제어기법에 의한 제어기의 설계)

본 연구에서는 Fig. 4와 같이 일반화 플랜트를 구성하고 제어사양을 만족하는 횡동요 제어기를 구하기로 한다. 여기서  $d_1'$ 은 Fig. 2에 나타난 Gaussian white noise  $w_\phi$ 에 해당하며  $d_2$ 는 요 운동을 제어하기 위한 제어신호이다. 이 신호는 요 운동 제어계에 있어서는 순수한 제어입력이지만

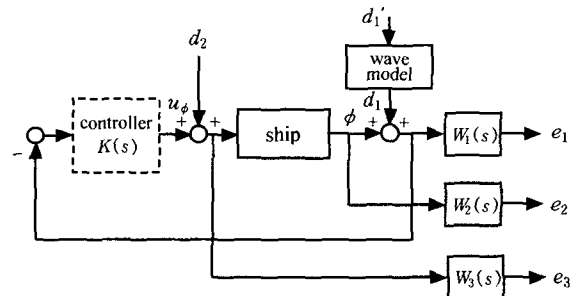


Fig. 4 A schematic diagram of the generalized plant (roll motion control system)

횡동요 제어계의 관점에서는 하나의 외란으로 취급할 수 있으므로 Fig. 4와 같이 나타내었다.

Fig. 4에서  $W_1(s)$ 은 파랑이 횡동요에 미치는 영향을 억제하기 위한 가중함수(weighting function)이며  $W_2(s)$ 는 외란  $d_2$ (요 운동 제어신호)가 저주파 특성을 갖는다는 것을 고려하여 이 신호가 횡동요에 미치는 영향을 최소화하기 위해 도입된 가중함수이다. 그리고  $W_3(s)$ 는 횡동요 제어기의 제어신호가 요 운동 제어기의 제어신호에 비해 상대적으로 고주파 특성을 갖는다는 것을 고려하여 도입된 가중함수이다. 보다 상세한 표현은 시뮬레이션과정에서 기술하기로 한다.

따라서 Fig. 4에서 외란  $d_i(i=1, 2)$ 에서 출력  $e_j(j=1, \dots, 3)$ 까지의 전달함수를  $T_{e,d}$ 라 두면 횡동요 제어기 설계문제는 다음의 조건

$$\|T_{e,d}\|_{\infty} < 1 \quad (29)$$

을 만족하는 제어기  $K(s)$ 를 구하는 것과 동가이다.

결국 횡동요 및 요 운동을 제어하기 위한 제어 신호  $\delta$ (Fig. 2참조)는 Fig. 3의  $u_{\phi}$ 와 Fig. 4의  $u_{\psi}$ 가 결합된  $\delta = u_{\phi} + u_{\psi}$ 의 형태로 주어진다.

#### 4. 시뮬레이션

본 장에서는 본 연구에서 고려하고 있는 제어계 설계법의 유효성을 검증하기로 한다. 먼저 식 (7)~(9)로 표현된 제어대상에 있어서 각각의 파라미터가 다음과 같이 주어지는 경우를 생각한다.<sup>(3)</sup>

$$\begin{aligned} T_v &= 78/U, & K_{dr} &= -0.0027U, & K_{\psi p} &= 0.21U \\ T_r &= 13/U, & K_{\phi p} &= -0.0014U^2, & \omega_n &= 0.63 \\ K_{\psi r} &= -0.46, & K_{dr} &= 0.01U, & \zeta_n &= 0.064 + 0.0038U \end{aligned} \quad (30)$$

여기서  $U$ 는 선박의 주행속도를 나타낸다.

그리고 외란은 Fig. 2에서 횡운동계에 인가되는 외란항  $w_{\phi}$ 만 고려한다. 즉 식 (4)에서 각 파라미터를 다음과 같이 결정하였다.<sup>(7)</sup>

$$\zeta_0 = 0.05, \quad \omega_0 = 0.5, \quad \sigma = 1.0 \quad (31)$$

#### 4.1 요 운동 제어기

3.2절에서 설명하였듯이 요 운동제어기에는 서보기능을 강화하기 위해 Fig. 3과 같은 2자유도 서보계 설계법으로 제어기를 설계하였다. 이때 구한 제어기의 각각의 파라미터는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F_0 &= [-8.6110 \times 10^{-1} \quad -1.0935 \quad -2.4495 \times 10^{-1}] \\ F_1 &= [2.9391 \times 10^{-2} \quad 5.1685 \times 10^{-2} \quad 1.4269 \times 10^{-2}] \\ G &= -2.9391 \\ H_0 &= -3.4024 \times 10 \end{aligned} \quad (32)$$

이때 선박의 주행속도는  $U = 10$  [m/s]로 하였다.

#### 4.2 횡동요 제어기

파랑외란에 강인한 제어계를 설계하기 위해  $H_{\infty}$  제어이론에 기초하여 Fig. 4와 같이 일반화 플랜트를 구성하고 식 (29)와 같이 주어지는 설계 사양을 만족하도록 하는 제어기를 MATLAB<sup>(17)</sup>을 이용하여 설계하였다. 설계과정에 결정한 각각의 가중함수는 다음과 같으며 각각의 주파수응답을 Fig. 5에 나타낸다.

$$\begin{aligned} W_1 &= \frac{10s^2 + s + 2.5}{s^2 + 1.65s + 0.225} \\ W_2 &= \frac{s + 0.001}{s^2 + s + 0.24} \\ W_3 &= \frac{s + 1}{s + 100} \end{aligned} \quad (33)$$

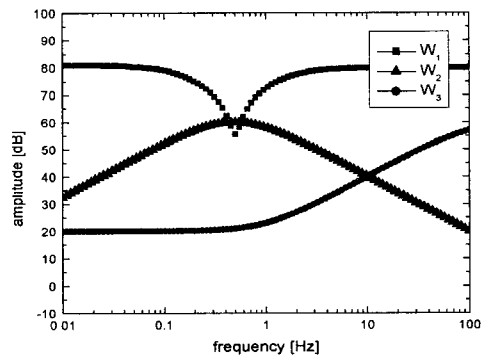


Fig. 5 Frequency responses of the weighting functions

그리고 시행착오를 거쳐 다음과 같이 횡동요 제어기  $K(s)$ 를 구하였다.

$$K(s) = \frac{K_n(s)}{K_d(s)} \quad (34)$$

$$K_n(s) = 2.8843s^7 + 3.0136 \times 10^2 s^6 + 1.1992 \times 10^3 s^5 + 1.3281 \times 10^3 s^4 + 9.3698 \times 10^2 s^3 + 4.9252 \times 10^2 s^2 + 1.2987 \times 10^2 s + 1.0165 \times 10$$

$$K_d(s) = s^8 + 1.1137 \times 10^2 s^7 + 5.9987 \times 10^3 s^6 + 1.2416 \times 10^2 s^5 + 1.2517 \times 10^2 s^4 + 8.3387 \times 10^3 s^3 + 3.7629 \times 10^2 s^2 + 8.9452 s + 0.7220$$

4.3 시뮬레이션 고찰

식 (32) 및 (34)와 같이 구한 제어기를 이용하여 시뮬레이션을 실행하였다. 이때 RRS의 경우에는 방향타 각의 크기와 각속도에 제한을 갖게 되는데 본 연구에서는

$$\delta_{\max} \in [25, 30](\text{deg}), \quad \dot{\delta}_{\max} \in [15, 20](\text{deg/s}) \quad (35)$$

와 같이 두 가지 경우<sup>(7)</sup>에 대해 시뮬레이션을 실행하였다. 이때 Fig. 6은 2자유도 서보계로 구성된 요 운동제어계의 스텝응답을 나타내고 있다. 그리고 Fig. 7은 방향타에서 횡동요까지 및 방향타에서 요 운동까지의 개루프계의 주파수 응답을 각각 나타내고 있으며 페루프계의 주파수 응답은 Fig. 8에 나타내었다. 또한 외란으로 고려하고 있는 파랑모델<sup>(7)</sup>의 주파수 응답을 Fig. 9에 나타낸다.

[case 1]

$$(\delta_{\max} = 25[\text{deg}], \dot{\delta}_{\max} = 15 [\text{deg/s}], U = 8 [\text{m/s}])$$

식 (4)와 같은 파랑모델의 파라미터가 식 (31)과 같이 주어지는 파랑외란이 존재할 때의 개루프(open loop) 및 페루프계(closed loop system)의 외란응답을 Fig. 10~Fig. 13에 나타낸다. 여기서 Fig. 10는 개루프계의 횡동요를 나타내며 Fig. 11은 페루프계의 횡동요를 나타낸다. 그리고 Fig. 12는 페루프계의 요 운동을 나타내며 Fig. 13은 외란에 의해 야기된 선체 횡동요를 안정화하기 위한 방향타의 운동을 나타내고 있다.

[case 2]

$$(\delta_{\max} = 25[\text{deg}], \dot{\delta}_{\max} = 15 [\text{deg/s}], U = 10 [\text{m/s}])$$

식 (4)와 같은 파랑모델의 파라미터가 식 (31)과 같이 주어지는 파랑외란이 존재할 때의 개루프

프 및 페루프계의 외란응답을 Fig. 14~Fig. 17에 나타낸다. 여기서 Fig. 14는 개루프계의 횡동요를 나타내며 Fig. 15는 페루프계의 횡동요를 나타낸다. 그리고 Fig. 16은 페루프계의 요 운동을 나타내며 Fig. 17은 외란에 의한 선체 횡동요를 안정화하기 위한 방향타 운동을 나타내고 있다.

위의 결과 및 여러 경우의 시뮬레이션 결과를 토대로 성능평가를 해 보았다. 평가기준은 다음과 같이 주어지는 식<sup>(18)</sup>을 이용하였다.

$$\text{Reduction (\%)} = 100 \times \frac{\text{AP-RRCS}}{\text{AP}} \quad (36)$$

여기서 RRCS와 AP는 페루프계 및 개루프계의 횡동요 응답에 대한 표준편차(standard deviation)를 나타낸다. 그리고 식 (36)에 주어진 방법에 따라 행한 제어성능 평가결과를 Table 2에 정리하였다. 이 결과는 참고문헌으로 소개된 연구결과<sup>(3~7,18)</sup>와 비교할 때 제어기의 차수가 저차(제어기의 분모의 차수가 8차)인 반면 제어성능 면에서는 대등하거나 보다 양호한 결과를 얻었다.

Table 2 Simulation results with variable parameters

Parameters			Reduction (%)
$\delta_{\max}$	$\dot{\delta}_{\max}$	$U$	
25	15	8	53.80
30	20	8	53.79
25	15	10	66.85
30	20	10	66.85

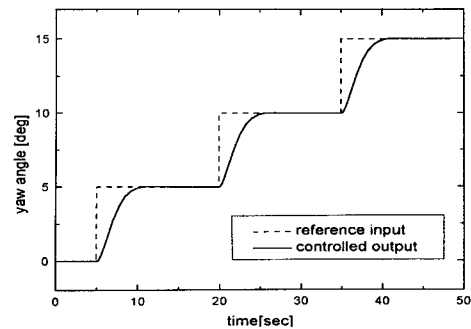


Fig. 6 Step response of yaw control system without disturbance



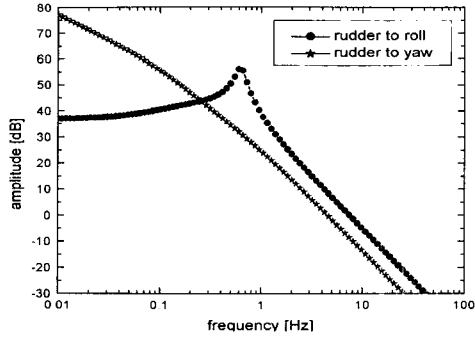


Fig. 7 Frequency responses of open loop systems

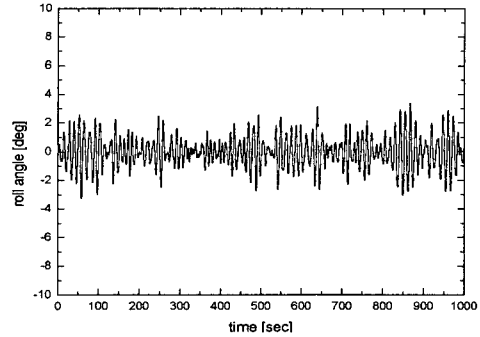


Fig. 11 Roll motion of closed loop system

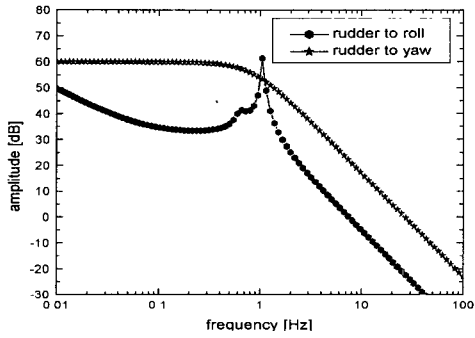


Fig. 8 Frequency responses of closed loop systems

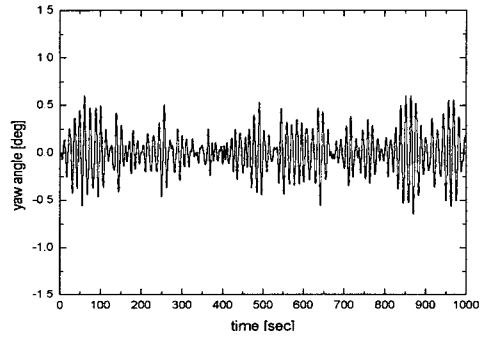


Fig. 12 Yaw motion of closed loop system

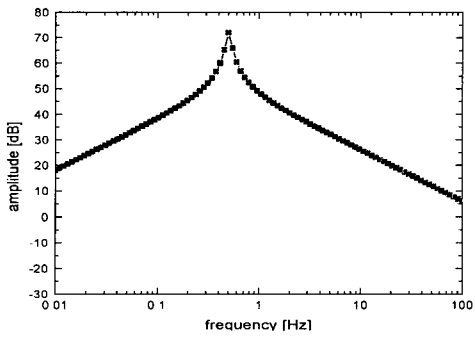


Fig. 9 Frequency response of wave model

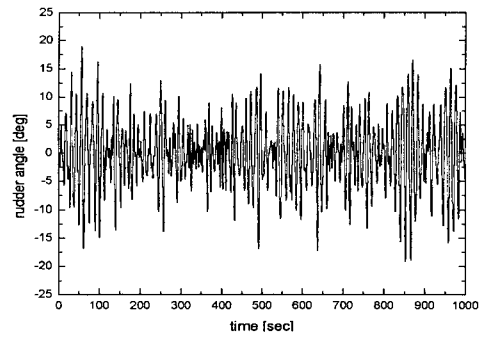


Fig. 13 Rudder angle of closed loop system

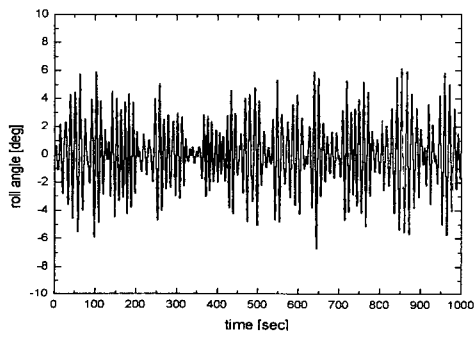


Fig. 10 Roll motion of open loop system

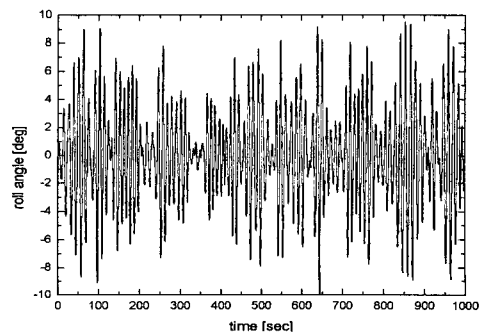


Fig. 14 Roll motion of open loop system

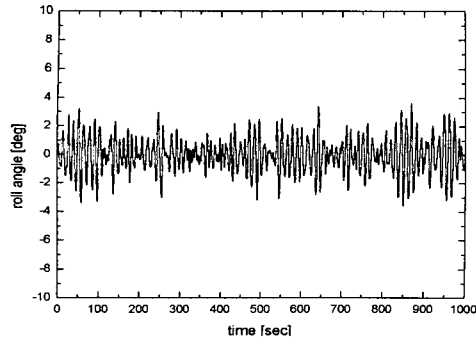


Fig. 15 Roll motion of closed loop system

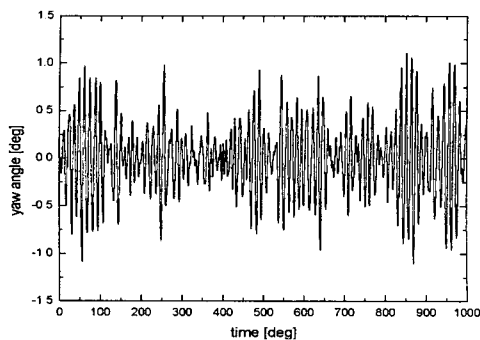


Fig. 16 Yaw motion of closed loop system

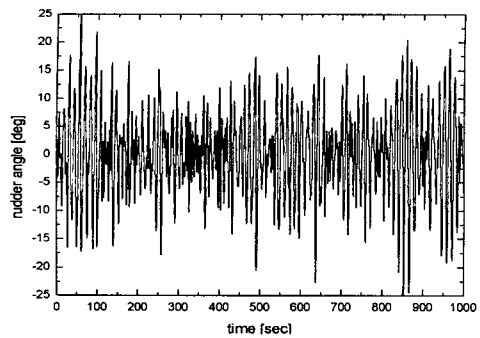


Fig. 17 Rudder angle of closed loop system

## 5. 결 론

본 연구에서는 파랑 등에 의해 발생하는 선박의 횡동요를 억제하기 위한 방안으로 방향타를 이용하는 방법에 대해 고찰하였다. 이 방법은 장치 설치에 따른 비용부담이 적을 뿐 아니라 비교적 고속의 주행속도에서는 상당한 효과가 있음이 이미 검증되어 있다. 그러나 기존의 횡동요를 억제하기 위한 방향타의 제어신호는 선박의 선수각을 일정하게 유지하기 어렵게 할 뿐 만 아니라

운전조건의 변화 등에 의해 방향타에 의한 횡동요 방지장치의 운용이 곤란하게 되어 요 운동 제어기능 만으로 자동항행 임무를 수행해야 할 경우에는 제어알고리즘을 수정해야 하거나 수동조종모드로 전환하여 운항해야하는 등의 여러 가지 어려움이 수반되게 된다. 그래서 본 연구에서는 요 운동과 횡동요에 대해 각각의 제어개 특성에 맞게 제어기를 독립적인 개념으로 설계하였다. 즉 요 운동 제어기는 서보기능을 강화하기 위해 2자유도 서보계 설계법을 이용하여 제어기를 설계하였으며 횡동요 제어기는 외란에 대한 강인성을 충분히 고려하여  $H_{\infty}$  제어기법으로 제어기를 각각 설계하였다. 설계된 제어기는 기존의 통합적 제어기법으로 설계된 제어기에 비해 저차이면서 제어성능 면에서는 대등하거나 양호한 결과를 얻었다.

## 후 기

이 논문은 2000년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었습니다. 관계자 여러분께 감사 드립니다.(과제번호 : KRF-00-H00011)

## 참고문헌

- (1) Burger, W. and Corbet, A. G., 1960, *Ship Stabilizers, Their Design and Operation in Correcting the Rolling Ships*, A Handbook for Merchant Navy Officers, Pergamon Press Ltd., London.
- (2) Van der Klugt, P. G. M., 1987, *Rudder Roll Stabilization*, Ph. D. Thesis, Delft University of Technology, The Netherlands.
- (3) Lauvdal, T. and Fossen, T. I., 1998, "Rudder Roll Stabilization of Ships Subject to Input Rate Saturation Using a Gain Scheduling Control Law," *Proc. of IFAC CAMS '98*, pp. 121~126.
- (4) Yang, C. and Blanke, M., 1998, "Rudder-Roll Damping Controller Design Using  $\mu$  Synthesis," *Proc. of IFAC CAMS '98*, pp. 127~132.
- (5) Sellars, F. H. and Martin, J. P., 1992, "Selection and Evaluation of Ship Roll Stabilization Systems," *Marine Technology*, Vol. 29, No. 2, pp. 84~101.

- (6) Christensen A. and Blanke, M., 1986, "A Linearized State-Space Model in Steering and Roll of a High-Speed Container Ship," *Technical Report 86-D-574*, Servolaboratoriet, Technical University of Denmark.
- (7) Fossen, T. I., 1994, *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley and Sons Ltd.
- (8) Fujisaki Y. and Ikeda, M., 1992, "A Two-degree-of-freedom Design of Optimal Servosystem," *Proc. of 31st IEEE CDC*, pp. 3588 ~ 3589.
- (9) Fujisaki, Y. and Ikeda, M., 1991, "Synthesis of Two-degree-of-freedom Servosystems," *Trans. SICE*, Vol. 27, No. 8, pp. 907~914.
- (10) Hagiwara, T., Yamasaki, T. and Araki, M., 1993, "A Two-degree-of-freedom Design Method of LQI Servosystem, Part I," *Preprints of 12th IFAC World Congress*, Vol. I, pp. 453~455.
- (11) Hagiwara, T., Ohtani, Y. and Araki, M., 1991, "A Design Method of LQI Servo Systems with Two Degree of Freedom," *Trans. iSCIE*, Vol. 4, No. 12, pp. 501~510.
- (12) Kim, Y., Fujisaki, Y. and Ikeda, M., 1994, "Robust Stability and High-gain Compensation of a Two-degree-of-freedom Servosystem," *The 17th SICE Symposium on Dynamical System Theory*, pp. 325~330.
- (13) Kobayashi, M., Kim, Y. B., Ikeda, M. and Fujisaki, Y., 1995, "On Robust Stability of Two-degree-of-freedom Servosystem Incorporating an Observer," *The 39th Annual Conference of iSCIE*, pp. 263~264.
- (14) Kim, Y. B., Ikeda, M., Kobayashi, M. and Fujisaki, Y., 1995, "High-gain Compensation of a Two-degree-of-freedom Servosystem Incorporating an Observer," *The 24th SICE Symposium on Control Theory*, pp. 107~110.
- (15) Kim, Y. B., Fujisaki, Y. and Ikeda, M., 1998, "Robust Stability of Two-degree-of-freedom Servosystem with a Tuning Gain," *Trans. SICE*, Vol. 34, No. 10, pp. 1411~1418.
- (16) Kim, Y. B., 2000, "Robust Stability of a Two-Degree-of-Freedom Servosystem with Structured and Unstructured Uncertainties," *KSME Int. Journal*, Vol. 14, No. 11, pp. 1198~1205.
- (17) Sanov, M. G., Limebeer, D. J. N. and Chiang, R. Y., 1992, *Robust Control Toolbox User's Guide*, The MathWorks Inc..
- (18) Oda, H. et. al., 1992, "Rudder-Roll Stabilization Control System through Multivariable Auto Regressive Model," *Proc. of the IFAC CAMS '92*, Genoa, Italy, pp. 113~127.