파랑중에서 자동조타로써 항행하는 선박의 추진 에너지 손실량 평가에 관한 연구

이 경 우[1] , 손 경 호[2]

A Study on Prediction of Propulsive Energy Loss Related to Automatic Steering of Ships in Seas

Gyoung-Woo Lee , Kyoung-Ho Sohn

Abstract

When an automatic course-keeping is concerned, as is quite popular in modern navigation, the closed-loop steering system consists of autopilot device, power unit (or telemotor unit), steering gear, magnetic or gyro compass and ship dynamics. The considerations of irregular disturbances to ship dynamics and a few non-linear mechanisms involved inevitably or artificially are known to be very important in properly evaluating or analyzing the automatic steering system.

In the present study, the mathematical model of each element of an automatic steering system is derived, which takes account of a few non-linear mechanisms. PD (Proportional-Derivative) controller and low-pass filter with a weather adjustment are adopted to model the characteristics of an autopilot. The practical method of imposing irregular disturbances to ship dynamics is proposed, where irregular disturbances implying irregular wave and the fluctuating component of wind. Steady wind and current effects are not considered because their contributions are nothing but the constant adjustment of a heading angle of ship.

1) 한국해양대학교 선박공학과 박사과정 선박유체 전공

2) 한국해양대학교 조선공학과 교수

Prediction method based on the principle of linear superposition is introduced for the expression of irregular disturbances. Response amplitude operator of yaw is predicted by NSM(New Strip Method), while ISSC wave spectrum and Davenport wind spectrum are employed for wave and wind spectra by fluctuation components. Semi-empirical formulae by regression analysis are used to decide the hydrodynamic coefficients and various coefficients in order to predict manoeuvring indices and equivalent rudder angle.

1. 서 론

대양에서 항행하는 거의 모든 선박은 오토파일럿을 이용하여 자동으로 선박의 침로를 유지하고 있다. 오토파일럿은 당해 선박의 현재 침로를 감지하여 목표 침로와의 편차가 최소화되도록 조타 명령을 하는 제어 장치이다. 이러한 오토파일럿은 파워 유닛, 조타기, 선체운동 및 컴퍼스와 함께 폐루프(closed-loop) 제어 시스템을 이루고 있다.

이들 요소중 선체운동은 조타기에 의한 타의 작동에 기인해서도 유발되지만, 바람, 파도 등의 끊임없는 외란에 기인해서도 선체운동이 동시에 유발된다. 이 두가지 성분을 합성한 선체운동 즉, 회두각속도가 컴퍼스를 경유해서 다시 오토파일럿으로 피드백되어 새로운 타각을 명령하게 된다. 이러한 과정에서 외란 특성은 선박 자동조타 시스템의 유일한 외부 입력으로서도 그 역할이 중요하다.

본 연구에서는 대양 항행시의 선박 자동조타 시스템의 정량적 평가, 해석을 위해서 자동조타 시스템의 수학 모델화, 불규칙 외란의 추정, 성능평가지수의 도출, 오토파일럿의 선형 및 비선형 제어 상수가 추진 에너지 손실에 미치는 영향을 정량적으로 평가, 해석한다.

제 2 장 자동조타 시스템의 수학 모델

자동조타 시스템의 구성 요소의 구체적인 수학 모델과 동작 특성은 다음과 같다.

dCollection

2.1 선체운동

자동조타의 경우 선체운동(ship dynamics)은, 보침운동(course-keeping)만을 다루기때문에 타각에 대한 회두각속도의 선형 응답으로 나타낼 수 있다[3].

$$T_1' T_2' \ddot{r}' + (T_1' + T_2') \dot{r}' + r' = K'\delta + K' T_3' \dot{\delta}' \tag{2.6}$$

2.2 컴퍼스

컴퍼스(compass)에 대해서는 식(2.7)과 같이 나타낸다.

$$\psi = \int_o^t r^* dt \qquad \text{단, } r^* = r + r_d \tag{2.7}$$

여기서 ψ는 회두각, t는 시간, r_d는 바람과 파도에 의한 회두각속도로 환산한 불규칙 외란을 나타낸다.

2.3 오토파일럿

오토파일럿은 일반적으로 선형 요소와 비선형 요소로써 구성된다. 선형 요소는 PID(비례 · 적분 · 미분) 제어에 저역 필터(low pass filter) 특성을 추가한 형태로 표현된다[5]. 비선형 요소는 천후조정기구(weather adjustment)라 불리워지며, 이것은 개개의 고주파수 파도에 대해서 너무 잦은 조타를 피할 수 있도록 인위적으로 설치한 장치인데, 보통 back lash, dead band, dual gain 등이 이용되고 있다[8]. 본 연구에서는 선형 요소로서는 PD 제어와 필터 특성을, 비선형 요소인 천후조정기구로서는 dead band를 생각하기로 한다[9]. 이들을 수학 모델화하면 식(2.8), (2.9)와 같다.

$$\dot{\delta} + T_{cr} \ddot{\delta} = -(\psi - \psi_I) - T_D \dot{r}^* \tag{2.8}$$

$$K_P(\delta' - b) \quad : \quad (\delta' > b)$$

2.1 선체운동

자동조타의 경우 선체운동(ship dynamics)은, 보침운동(course-keeping)만을 다루기때문에 타각에 대한 회두각속도의 선형 응답으로 나타낼 수 있다[3].

$$T_1' T_2' \ddot{r}' + (T_1' + T_2') \dot{r}' + r' = K'\delta + K' T_3' \dot{\delta}' \tag{2.6}$$

2.2 컴퍼스

컴퍼스(compass)에 대해서는 식(2.7)과 같이 나타낸다.

$$\psi = \int_o^t r^* \, dt \qquad \text{단,} \quad r^* = r + r_d \tag{2.7}$$

여기서 ψ는 회두각, t는 시간, r_d는 바람과 파도에 의한 회두각속도로 환산한 불규칙 외란을 나타낸다.

2.3 오토파일럿

오토파일럿은 일반적으로 선형 요소와 비선형 요소로써 구성된다. 선형 요소는 PID(비례 · 적분 · 미분) 제어에 저역 필터(low pass filter) 특성을 추가한 형태로 표현된다[5]. 비선형 요소는 천후조정기구(weather adjustment)라 불리워지며, 이것은 개개의 고주파수 파도에 대해서 너무 잦은 조타를 피할 수 있도록 인위적으로 설치한 장치인데, 보통 back lash, dead band, dual gain 등이 이용되고 있다[8]. 본 연구에서는 선형 요소로서는 PD 제어와 필터 특성을, 비선형 요소인 천후조정기구로서는 dead band를 생각하기로 한다[9]. 이들을 수학 모델화하면 식(2.8), (2.9)와 같다.

$$\delta' + T_{cr} \dot{\delta}' = -(\psi - \psi_I) - T_D r^* \tag{2.8}$$

$$\begin{cases} K_P(\delta' - b) & : \quad (\delta' > b) \end{cases}$$

dCollection

2.1 선체운동

자동조타의 경우 선체운동(ship dynamics)은, 보침운동(course-keeping)만을 다루기때문에 타각에 대한 회두각속도의 선형 응답으로 나타낼 수 있다[3].

$$T_1' T_2' \ddot{r}' + (T_1' + T_2') \dot{r}' + r' = K'\delta + K' T_3' \dot{\delta}' \tag{2.6}$$

2.2 컴퍼스

컴퍼스(compass)에 대해서는 식(2.7)과 같이 나타낸다.

$$\psi = \int_o^t r^* dt \qquad \text{단, } r^* = r + r_d \tag{2.7}$$

여기서 ψ는 회두각, t는 시간, r_d는 바람과 파도에 의한 회두각속도로 환산한 불규칙 외란을 나타낸다.

2.3 오토파일럿

오토파일럿은 일반적으로 선형 요소와 비선형 요소로써 구성된다. 선형 요소는 PID(비례 · 적분 · 미분) 제어에 저역 필터(low pass filter) 특성을 추가한 형태로 표현된다[5]. 비선형 요소는 천후조정기구(weather adjustment)라 불리워지며, 이것은 개개의 고주파수 파도에 대해서 너무 잦은 조타를 피할 수 있도록 인위적으로 설치한 장치인데, 보통 back lash, dead band, dual gain 등이 이용되고 있다[8]. 본 연구에서는 선형 요소로서는 PD 제어와 필터 특성을, 비선형 요소인 천후조정기구로서는 dead band를 생각하기로 한다[9]. 이들을 수학 모델화하면 식(2.8), (2.9)와 같다.

$$\dot{\delta}' + T_{cr}\, \delta' = -(\psi - \psi_I) - T_D r^* \tag{2.8}$$

$$\delta^{**} = \begin{cases} K_P(\delta' - b) & : \quad (\delta' > b) \\ K_P(\delta' + b) & : \quad (\delta' < -b) \\ 0 & : \quad (|\delta'| \leq b) \end{cases} \tag{2.9}$$

2.4 파워유닛

파워 유닛은 오토파일럿(또는 수동 조타인 경우에는 조타륜)으로부터 전달되는 명령

dCollection

타각 δ^{**}에 상당하는 전기 신호를 기계적 변위로 변환하여 조타기의 가변 유량 펌프를 움직이기 위한 유압장치이다[2]. 파워유닛의 동작 특성을 고려하여 임의 시각 t에서 δ^*에 대한 δ^{**}의 응답을 식(2.11)과 같이 수학 모델화한다.

$$\begin{aligned} \delta^* &= \delta_0^* && : \quad (|\delta^{**} - \delta^*| \leq 2\delta_b) \\ \delta^* &= \delta_0^* + \text{sign}(\delta^{**} - \delta^*) \int_0^t \dot{\delta}^* \, dt && : \quad (|\delta^{**} - \delta^*| > 2\delta_b) \end{aligned} \tag{2.11}$$

2.5 조타기

조타기(steering gear)의 수학 모델은 식(2.12), (2.13)과 같이 표시된다[10].

$$T_E \dot{\delta} + \delta = \delta^* \quad : \quad (|\dot{\delta}| \leq |\dot{\delta}_{max}|) \tag{2.12}$$

$$\dot{\delta} = \text{sign}(\delta^* - \delta) \, |\dot{\delta}_{max}| \quad : \quad (|\dot{\delta}| > |\dot{\delta}_{max}|) \tag{2.13}$$

제 3 장 불규칙 외란의 추정

자동조타 항행시에 선체에 작용하는 외란으로서, 불규칙 파도에 의해서 유기되는 외란과 바람의 변동 성분에 의해서 유기되는 외란을 생각한다.

3.1 불규칙 파도에 기인하는 외란 스펙트럼

파도가 선체에 유기하는 회두각속도 스펙트럼은 파도의 스펙트럼과 규칙파에 대한 선수동요 응답함수로부터 식(3.1)과 같이 계산할 수 있다. 한편, 선수동요 응답함수는 스트립 이론(New Strip Method)을 이용하여 계산한다.

$$S_{rw}(\omega) = \omega^2 \cdot S_w(\omega) \cdot \left[\frac{\phi_a}{\zeta_a}(\omega) \right]^2 \tag{3.1}$$

파도의 스펙트럼은 식(3.2)로 표시되는 ISSC 스펙트럼을 이용한다[11].

$$S_w(\omega_0) = 0.11 \, H_w^2 \, \omega_1^{-1} \left(\frac{\omega_0}{\omega_1} \right)^{-5} \exp\left[-0.44 \left(\frac{\omega_0}{\omega_1} \right)^{-4} \right] \tag{3.2}$$

dCollection

만남파 스펙트럼 $S_w(\omega)$와 ISSC 스펙트럼 $S_w(\omega_0)$ 사이에는 식(3.3)의 관계가 성립된다.

$$S_w(\omega) = S_w(\omega_0) / (1 - \frac{2\omega_0 V}{g} \cos\chi) \tag{3.3}$$

그리고 만남 주파수와 파도의 원주파수 사이에는 식(3.4)의 관계가 성립된다.

$$\omega = \omega_0(1 - \frac{\omega_0}{g} V\cos\chi) \tag{3.4}$$

3.2 응답함수의 계산

불규칙 파랑중에서 조타(操舵)하면서 항행하는 선박의 조종운동을 해석하기 위해서는, 파랑에 기인하는 외란의 스펙트럼을 구할 필요가 있다. 외란의 스펙트럼을 구하기 위해서는 먼저 규칙파에 대한 조종운동의 응답함수를 필요로 한다.

본 연구에서는 등속 이동 공간좌표계를 기초로 한 NSM의 sway-yaw-roll 운동방정식(내항성 운동방정식)을 개략적으로 검토하고, 등속 이동 공간좌표계와 선체 고정좌표계 사이에 성립하는 관계식을 도출하여 내항성 운동방정식을 조종성 운동방정식으로 변환하였다. 그리고 조종성 운동방정식에서 정의하는 sway, yaw의 응답함수를 수치 계산하였다.

3.3 추사파중에서의 외란 스펙트럼 계산

추사파중에서의 만남주파수 변환을 이용하여, 추사파중에서 항행하는 선박의 회두각속도 외란 스펙트럼은 식(3.19)와 같이 영역별로 나누어 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
&\text{영역 I} && S_{rw}(\omega)_{\text{I}} = \omega^2 \cdot S_w(\omega)_{\text{I}} \cdot \left[\frac{\phi_a}{\zeta_a}(\omega)\right]^2_{\text{I}} \\
&\text{영역 II} && S_{rw}(\omega)_{\text{II}} = \omega^2 \cdot S_w(\omega)_{\text{II}} \cdot \left[\frac{\phi_a}{\zeta_a}(\omega)\right]^2_{\text{II}} \\
&\text{영역 III} && S_{rw}(\omega)_{\text{III}} = \omega^2 \cdot S_w(\omega)_{\text{III}} \cdot \left[\frac{\phi_a}{\zeta_a}(\omega)\right]^2_{\text{III}}
\end{aligned} \tag{3.19}$$

dCollection

여기서, I, II, III는 해당 영역을 나타낸다. 식(3.19)의 각 영역에서의 파도의 만남 스펙트럼은 식(3.20)과 같다.

$$\text{영역 I} \quad S_w(\omega)_{\text{I}} = \frac{S_w(\omega_0)}{1 - \frac{2\omega V}{g}\cos\chi}$$

$$\text{영역 II} \quad S_w(\omega)_{\text{II}} = \frac{S_w(\omega_0)}{1 - \frac{2\omega V}{g}\cos\chi} \tag{3.20}$$

$$\text{영역 III} \quad S_w(\omega)_{\text{III}} = \frac{S_w(\omega_0)}{-1 + \frac{2\omega V}{g}\cos\chi}$$

그러므로 추사파중에서의 최종적인 선박의 회두각속도 외란 스펙트럼은 식(3.21)과 같다.

$$S_{rw}(\omega) = S_{rw}(\omega)_{\text{I}} + S_{rw}(\omega)_{\text{II}} + S_{rw}(\omega)_{\text{III}} \tag{3.21}$$

3.4 다방향파중의 외란 스펙트럼 계산

본 연구에서는 실제 해상 상태에 가까운 다방향파중에 항행하는 선박의 회두각속도 외란 스펙트럼을 구하기 위하여 다방향파 스펙트럼을 적용한다.

파도의 스펙트럼이 파의 평균 진행방향에 대해서 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 범위에 있어서 $\cos^2\mu$의 분포를 하고 있다고 가정하면, 파도의 스펙트럼은 식(3.22)와 같이 표현할 수 있다[28].

$$S_w(\omega, \mu) = \left(\frac{2}{\pi}\right) S_w(\omega)\cos^2\mu \quad ; \quad -90^\circ \le \mu \le 90^\circ \tag{3.22}$$

따라서 선박이 다방향파중을 항행할 때, 파도가 선체에 유기하는 불규칙 회두 각속도 스펙트럼은 식(3.23)과 같이 나타낼 수가 있다.

$$S_{rw}(\omega, \chi) = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \omega^2 \cdot S_w(\omega, \mu) \cdot \left[\frac{\phi_a}{\zeta_a}(\omega, \chi - \mu)\right]^2 d\mu \tag{3.23}$$

3.5 바람의 변동성분에 기인하는 외란 스펙트럼

바람이 선체에 유기하는 회두각속도 스펙트럼은 타각으로 환산한 변동풍의 외란 스펙

dCollection

트럼과 선박의 전달 함수를 이용하여 식(3.24)와 같이 계산할 수 있다[6].

$$S_{ru}(\omega) = S_{\delta}(\omega) \cdot |G(j\omega)|^2 \tag{3.24}$$

변동풍 외란 스펙트럼 $S_{\delta}(\omega)$은 다음과 같다.

$$S_{\delta}(\omega) = \{2f(\gamma_A) \cdot \{\overline{U}_T - V\cos\gamma_T\} / V^2\}^2 \cdot S_u(\omega) \tag{3.40}$$

한편, 풍속의 변동 성분 스펙트럼으로서는 식(3.41)로 표시되는 Davenport 스펙트럼[25]을 이용한다.

$$S_u(\omega) = 4.0\alpha \cdot \frac{(\overline{U}_T)^2}{\omega} \cdot \frac{x^2}{(1+x^2)^{4/3}} \tag{3.41}$$

3.6 유체력 미계수 및 조종성 지수 추정

선박의 전달 함수 $G(j\omega)$와 등가 타각계수 $f(\gamma_A)$를 결정하기 위해서는 유체력 미계수와 조종성 지수를 구하여야 한다. 부가질량 및 부가관성 모우멘트는 Mortora 도표[38]로부터 유도된 Clarke[39]의 회귀식을 이용하여 식(3.42)와 같이 구한다.

$$\begin{aligned}
m' &= 2C_B(B/L) \\
m'_x &= (0.03 \sim 0.05)m' \\
m'_y &= \pi\left(\frac{d}{L}\right)\left\{1.0 + 0.16C_B\left(\frac{B}{d}\right) - \frac{5.1}{(L/B)^2}\right\} \\
I'_z &= (0.24)^2 m' \\
J'_z &= \frac{\pi}{12}\left(\frac{d}{L}\right)\left\{1.0 + 0.20C_B\left(\frac{B}{d}\right) - 4.0\left(\frac{B}{L}\right)\right\}
\end{aligned} \tag{3.42}$$

유체력 미계수는 구속 모형 시험에 의해서 구할 수 있지만, 본 연구에서는 실용적인 방법으로 Inoue 회귀식[29]을 이용한다. 한편, Inoue 회귀식은 나각(hull only)상태에서의 유체력 미계수를 나타내는 식이므로, 식(2.6)의 유체력 미계수는 타가 설치된 상태의 유체력 미계수 형태로서 식(3.43)과 같이 구할 수 있다.

dCollection

트럼과 선박의 전달 함수를 이용하여 식(3.24)와 같이 계산할 수 있다[6].

$$S_{ru}(\omega) = S_{\delta}(\omega) \cdot |G(j\omega)|^2 \tag{3.24}$$

변동풍 외란 스펙트럼 $S_{\delta}(\omega)$은 다음과 같다.

$$S_{\delta}(\omega) = \{2f(\gamma_A) \cdot \{\overline{U}_T - V\cos\gamma_T\} / V^2\}^2 \cdot S_u(\omega) \tag{3.40}$$

한편, 풍속의 변동 성분 스펙트럼으로서는 식(3.41)로 표시되는 Davenport 스펙트럼[25]을 이용한다.

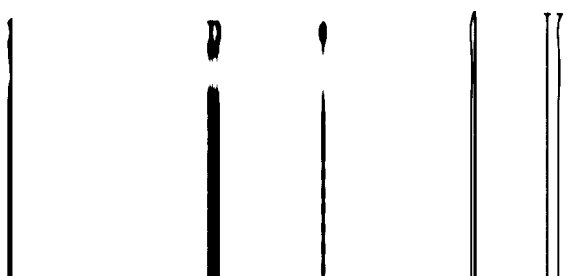
$$S_u(\omega) = 4.0\alpha \cdot \frac{(\overline{U}_T)^2}{\omega} \cdot \frac{x^2}{(1+x^2)^{4/3}} \tag{3.41}$$

3.6 유체력 미계수 및 조종성 지수 추정

선박의 전달 함수 $G(j\omega)$와 등가 타각계수 $f(\gamma_A)$를 결정하기 위해서는 유체력 미계수와 조종성 지수를 구하여야 한다. 부가질량 및 부가관성 모우멘트는 Mortora 도표[38]로부터 유도된 Clarke[39]의 회귀식을 이용하여 식(3.42)와 같이 구한다.

$$\begin{aligned}
m' &= 2C_B(B/L) \\
m'_x &= (0.03 \sim 0.05)\, m' \\
m'_y &= \pi\left(\frac{d}{L}\right)\left\{1.0 + 0.16C_B\left(\frac{B}{d}\right) - \frac{5.1}{(L/B)^2}\right\} \\
I'_z &= (0.24)^2 m' \\
J'_z &= \frac{\pi}{12}\left(\frac{d}{L}\right)\left\{1.0 + 0.20C_B\left(\frac{B}{d}\right) - 4.0\left(\frac{B}{L}\right)\right\}
\end{aligned} \tag{3.42}$$

유체력 미계수는 구속 모형 시험에 의해서 구할 수 있지만, 본 연구에서는 실용적인 방법으로 Inoue 회귀식[29]을 이용한다. 한편, Inoue 회귀식은 나각(hull only)상태에서의 유체력 미계수를 나타내는 식이므로, 식(2.6)의 유체력 미계수는 타가 설치된 상태의 유체력 미계수 형태로서 식(3.43)과 같이 구할 수 있다.



dCollection

트럼과 선박의 전달 함수를 이용하여 식(3.24)와 같이 계산할 수 있다[6].

$$S_{ru}(\omega) = S_{\delta}(\omega) \cdot | G(j\omega) |^2 \tag{3.24}$$

변동풍 외란 스펙트럼 $S_{\delta}(\omega)$은 다음과 같다.

$$S_{\delta}(\omega) = \{ 2f(\gamma_A) \cdot \{ \overline{U}_T - V\cos\gamma_T \} / V^2 \}^2 \cdot S_u(\omega) \tag{3.40}$$

한편, 풍속의 변동 성분 스펙트럼으로서는 식(3.41)로 표시되는 Davenport 스펙트럼[25]을 이용한다.

$$S_u(\omega) = 4.0\alpha \cdot \frac{(\overline{U}_T)^2}{\omega} \cdot \frac{x^2}{(1+x^2)^{4/3}} \tag{3.41}$$

3.6 유체력 미계수 및 조종성 지수 추정

선박의 전달 함수 $G(j\omega)$와 등가 타각계수 $f(\gamma_A)$를 결정하기 위해서는 유체력 미계수와 조종성 지수를 구하여야 한다. 부가질량 및 부가관성 모우멘트는 Mortora 도표[38]로부터 유도된 Clarke[39]의 회귀식을 이용하여 식(3.42)와 같이 구한다.

$$\begin{aligned}
m' &= 2C_B(B/L) \\
m'_x &= (0.03 \sim 0.05)m' \\
m'_y &= \pi(\frac{d}{L})\{ 1.0 + 0.16C_B(\frac{B}{d}) - \frac{5.1}{(L/B)^2} \} \\
I'_z &= (0.24)^2 m' \\
J'_z &= \frac{\pi}{12}(\frac{d}{L})\{ 1.0 + 0.20C_B(\frac{B}{d}) - 4.0(\frac{B}{L}) \}
\end{aligned} \tag{3.42}$$

유체력 미계수는 구속 모형 시험에 의해서 구할 수 있지만, 본 연구에서는 실용적인 방법으로 Inoue 회귀식[29]을 이용한다. 한편, Inoue 회귀식은 나각(hull only)상태에서의 유체력 미계수를 나타내는 식이므로, 식(2.6)의 유체력 미계수는 타가 설치된 상태의 유체력 미계수 형태로서 식(3.43)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
Y'_{\beta} &= (\frac{1}{2}\pi\Lambda + 1.4C_B\frac{B}{L})(1 + \frac{2}{3}\frac{\tau}{d}) + (\frac{A_R}{Ld})(\frac{V_R}{V}) f_{\alpha} \cdot (1 + a_H) \cdot \gamma_R \\
Y'_{r} &= \frac{1}{4}\pi\Lambda(1 + 0.8\frac{\tau}{d}) - (\frac{A_R}{Ld})(\frac{V_R}{V}) f_{\alpha} \cdot (1 + a_H) \cdot \gamma_R \cdot l'_R \\
N'_{\beta} &= \Lambda(1 - \frac{0.27}{l'_{\beta}}\frac{\tau}{d}) + (\frac{A_R}{Ld})(\frac{V_R}{V}) f_{\alpha} \cdot (x'_R + a_H x'_H) \cdot \gamma_R
\end{aligned} \tag{3.43}$$

dCollection

$$N_r' = -(0.54\Lambda - \Lambda^2)(1 + 0.3\frac{\tau}{d}) - (\frac{A_R}{Ld})(\frac{V_R}{V}) f_a \cdot (x_R' + a_H x_H') \cdot \gamma_R \cdot l_R'$$

$$Y_\delta' = -(\frac{A_R}{Ld})(\frac{V_R}{V}) f_a \cdot (1 + a_H)$$

$$N_\delta' = -(\frac{A_R}{Ld})(\frac{V_R}{V}) f_a \cdot (x_R' + a_H x_H')$$

여기서 τ는 트림량(선미 트림 "+")을 의미하며, Λ, l_β', f_a는 식(3.44)와 같다[29].

$$\Lambda = \frac{2d}{L}$$
$$l_\beta' = \Lambda \,/\, (\frac{1}{2}\pi\Lambda + 1.4\, C_B \frac{B}{L}) \tag{3.44}$$
$$f_a = \frac{6.13\lambda}{\lambda + 2.25} \quad (\lambda = H/C,\ H: \text{타의 높이},\ C: \text{타의 폭})$$

($\lambda = H/C$, H: 타의 높이(rudder height), C: 타의 폭(rudder chord length))

x_R', x_H', γ_R, a_H, l_R'의 값은 모형 실험 결과[30]와 문헌[40]을 참고하여 대략 식(3.45)와 같이 추정한다.

$$x_R' \approx -0.5\ ,\quad x_H' \approx -0.45\ ,\quad \gamma_R \approx 0.4$$
$$a_H \approx 0.63\, C_B - 0.15\ ,\quad l_R' \approx -0.9 \tag{3.45}$$

타에의 유효유입속도 V_R은 식(3.46), (3.47)과 같이 구한다[31].

$$V_R = \sqrt{u_R^2 + v_R^2} \approx u_R \tag{3.46}$$

$$u_R = \varepsilon n P \sqrt{1 - 2(1-\eta\ \mathrm{k})s + \{1 - \eta\ \mathrm{k}(2 - \mathrm{k})\}s^2} \tag{3.47}$$

여기서 $\varepsilon = \frac{1-w_R}{1-w_P}$, $\eta = \frac{D}{H}$, $\mathrm{k} = \frac{\mathrm{k_x}}{\varepsilon}$, $s = 1 - \frac{V(1-w_P)}{nP}$

타 위치에서의 유효 반류계수 w_R은 실선의 경우 대략 0.25, 타에 유입하는 유체흐름의 프로펠러에 의한 증속율 $\mathrm{k_x}$는 대략 0.6으로 추정한다. 프로펠러 위치에서의 유효 반류계수 w_P는 Taylor에 의한 실선 추정값[32]을 이용하여 식(3.48)과 같이 추정한다.

$$w_P = 0.551 - 1.333\, C_B + 1.357 C_B^2 \tag{3.48}$$

그리고 프로펠러 회전수 n의 추정은 식(3.49)와 같은 근사식을 이용한다[33].

$$n = 1.744\,(\frac{V}{D})\left\{C_T(\frac{S_A}{Ld}) \cdot (\frac{L}{D}) \cdot (\frac{d}{D})\right\}^{\frac{1}{3}} \tag{3.49}$$

dCollection

여기서 $S_A = LB(1.22\frac{d}{B} + 0.46)(C_B + 0.765)$ (Olsen 식)

$C_T = C_F(1 + K) + C_W + \triangle C_F$ (3차원 해석법)

$C_F = 0.463(\log_{10} Rn)^{-2.6}$ 단, Rn : Reynolds 수 (Schoenherr 식)

$C_W = \frac{R_W}{0.5\rho S_A V^2}$, $\gamma_W = \frac{R_W}{\rho L^2 V^2}$ 단, R_W : 조파저항

$C_W = 2\gamma_W(\frac{L^2}{S_A})$ (γ_W: 문헌[32]의 도표로부터 구함)

$\triangle C_F = 0.0004 \sim 0.00015$ (full ship)

$= 0.0004 \sim 0.00025$ (fine ship)

$K = 0.017 + 20.0\frac{C_B}{(L/B)^2\sqrt{B/d}}$ (Gross-Watanabe 식)

3.7 회두각속도 외란

식(3.1)과 (3.24)와 같이 회두각속도로 환산한 외란 스펙트럼이 구해지면 회두각속도 외란의 시계열은 식(3.50)과 같다.

$$r_d(t) = \sum_{i=1}^{\infty}\sqrt{2\,S_r(\omega_i)\,\delta\omega}\cdot\sin(\omega_i t + \varepsilon_i) \tag{3.50}$$

여기서 $S_r(\omega)$는 외란 스펙트럼 밀도함수로서 식(3.1) 또는 식(3.24)로 주어지는 $S_{rw}(\omega)$ 또는 $S_{ru}(\omega)$이다. 그리고 ε는 랜덤 위상각으로서 0에서 2π 사이의 값을 가지는 난수를 취하도록 한다.

제 4 장 자동조타 시스템의 평가

4.1 성능평가지수의 도출

본 연구에서는 Hasegawa의 정의에 따라, 선박의 조종운동을 나타내는 전후동요 운동방정식으로부터 추진 에너지 손실량의 관점에서 성능평가지수를 도출, 식(4.14)와 같이 표시된다.

dCollection

$$J = \frac{1}{2}\overline{\phi^2} + \frac{a_{rr}}{a_{VV}}\overline{r^{\cdot 2}} + \frac{a_{\delta\delta}}{a_{VV}}\overline{\delta^2} \tag{4.14}$$

여기서 $\overline{\phi^2}$, $\overline{r^{\cdot 2}}$, $\overline{\delta^2}$는 각각 ϕ, r, δ의 제곱평균치이다.

4.2 성능평가지수의 계산법

자동조타 시스템의 성능평가지수 J를 수치 계산하는 첫번 째 방법은, 시뮬레이션 기법을 이용하여 직접 ϕ, r, δ의 시계열을 구하여 이들의 제곱평균치를 구하는 것이다. 이 때에는 외란의 시계열을 미리 알고 있어야 한다. 시뮬레이션 기법을 이용하면 시스템의 각 요소가 비선형항을 포함하고 있어도 계산이 가능하다. 시뮬레이션 기법에 의해서 성능평가지수를 계산할때 $\overline{\phi^2}$, $\overline{r^{\cdot 2}}$, $\overline{\delta^2}$는 식(4.17)과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned}
\overline{\phi^2} &= \frac{1}{T_H}\int_0^{T_H} \phi^2\, dt \\
\overline{r^{\cdot 2}} &= \frac{1}{T_H}\int_0^{T_H} (\frac{L}{V})^2 r^2\, dt \\
\overline{\delta^2} &= \frac{1}{T_H}\int_0^{T_H} \delta^2\, dt
\end{aligned} \tag{4.17}$$

여기서 T_H는 측정 시간이다.두번 째 방법은 시스템의 전달함수를 이용하여 주파수 응답법에 의해 ϕ, r, δ의 스펙트럼을 구하고 각각의 스펙트럼의 면적을 전 주파수 영역에서 적분하여 제곱평균치를 구하는 것이다[6]. 이때에는 외란의 스펙트럼을 미리 알고 있어야 한다. 주파수 응답법은 시스템의 각 요소가 비선형항을 포함하고 있으면 계산이 불가능하다. 주파수 응답법에 의해서 성능평가지수를 계산할 때 $\overline{\phi^2}$, $\overline{r^{\cdot 2}}$, $\overline{\delta^2}$는 식(4.18)과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned}
\overline{\phi^2} &= \int_0^{\infty} S_\phi(\omega)\, d\omega \\
\overline{r^{\cdot 2}} &= (\frac{L}{V})^2 \int_0^{\infty} S_r(\omega)\, d\omega \\
\overline{\delta^2} &= \int_0^{\infty} S_\delta(\omega)\, d\omega
\end{aligned} \tag{4.18}$$

dCollection

여기서 $S_\phi(\omega)$, $S_r(\omega)$, $S_\delta(\omega)$는 각각 회두각, 회두각속도, 타각의 스펙트럼을 의미하며, 이들은 주파수 응답법에 의해 식(4.19)와 같이 주어진다.

$$
\begin{aligned}
S_\phi(\omega) &= |\, G_\phi(j\omega)\,|^2\, S_{rd}(\omega) \\
S_\delta(\omega) &= \left|\, \frac{-K_P(1+T_D j\omega)}{(1+T_E j\omega)} \,\right|^2 S_\phi(\omega) \\
S_r(\omega) &= \left|\, \frac{K(1+T_3 j\omega)}{(1+T_1 j\omega)\,(1+T_2 j\omega)} \,\right|^2 S_\delta(\omega)
\end{aligned}
\tag{4.19}
$$

여기서 $j = \sqrt{-1}$, ω는 원주파수, $S_{rd}(\omega)$는 외란 스펙트럼이다. 그리고 $G_\phi(j\omega)$는 외란 $r_d(s)$에 대한 회두각 $\phi(s)$의 전달함수 $G_\phi(s)$에 s 대신 $j\omega$를 대입한 것이다. $G_\phi(s)$는 식(4.24)와 같이 구해진다.

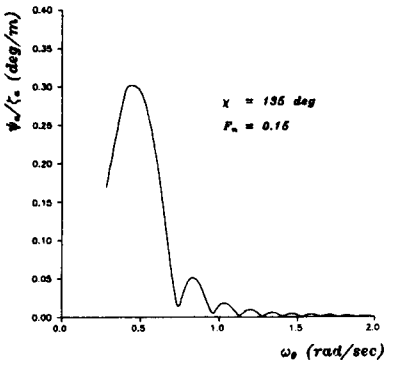
$$
G_\phi(s) = \frac{(1+T_E s)(1+T_1 s)(1+T_2 s)}{s(1+T_E s)(1+T_1 s)(1+T_2 s) + K_P K(1+T_D s)(1+T_3 s)} \tag{4.24}
$$

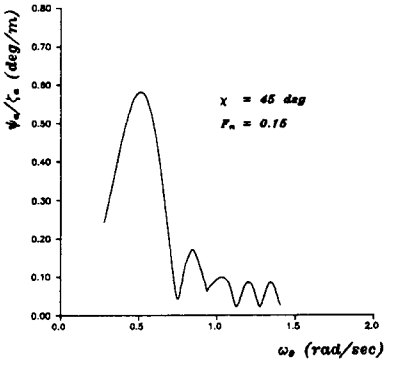
제 5 장 수치 계산 및 고찰

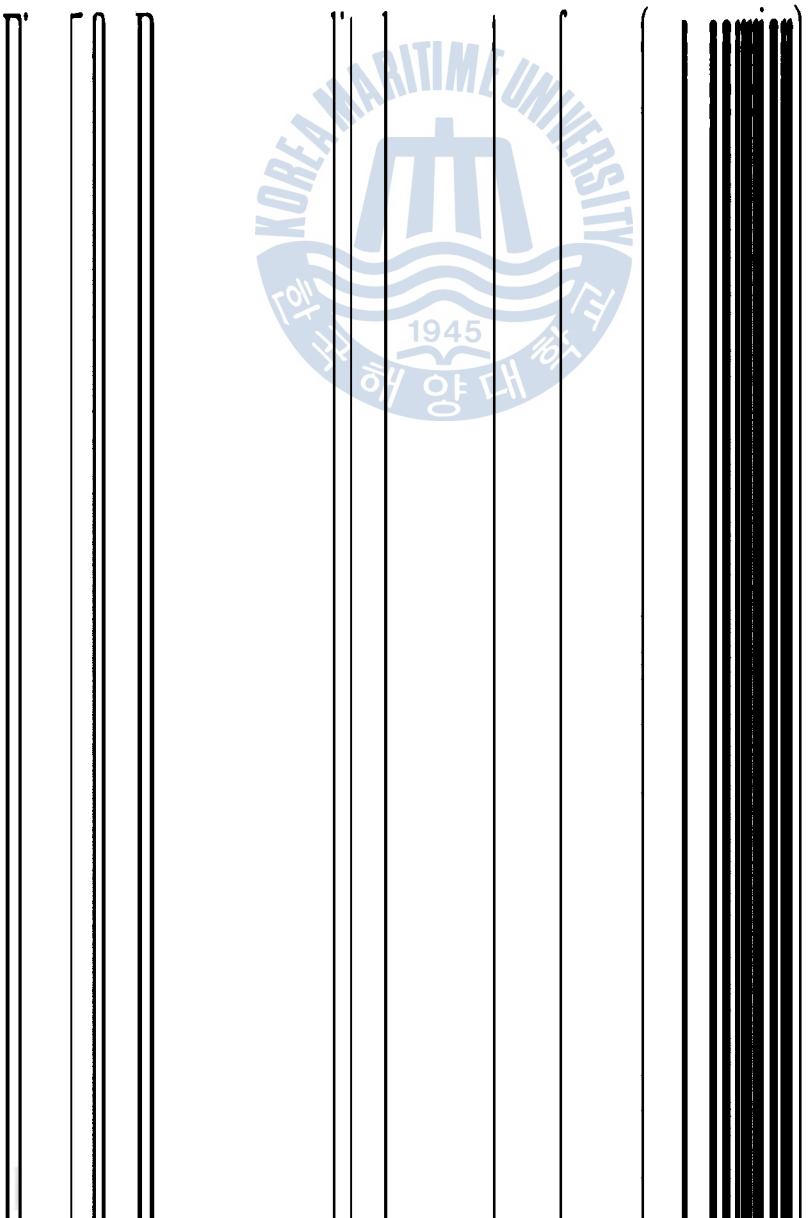
5.1 공시선과 계산 조건

오토파일럿의 선형 및 비선형 제어 상수가 추진 에너지 손실에 미치는 영향을 정량적으로 평가, 해석하기 위해서, 수치 계산에 이용한 선박은 소형 어선 1척과 대형 광석운반선 1척이다. 외란의 계산 조건으로서는, 가장 대표적인 해상 상태인 평균 풍속 ($\overline{U_T}$) 10 $m/\sec$를 상정하였으며, 이 평균 풍속에 대응하는 파랑 특성은 평균 파주기 5.74 초 유의파고 2.2 m이다. 그리고 진풍향(γ_T)과 파도의 진행방향(χ)은 동일한 것으로 가정하였고, 바람과 파도는 $\chi = \gamma_T = 135°$ (선수 사풍, 선수 사파) 방향과 $\chi = \gamma_T = 45°$ (선미 사풍, 선미 사파) 방향이다. 그리고 광석운반선과 어선의 항행속도는 각각 Froude 수 0.15, 0.25 이다.

dCollection







dCollection

여기서 $S_\phi(\omega)$, $S_r(\omega)$, $S_\delta(\omega)$는 각각 회두각, 회두각속도, 타각의 스펙트럼을 의미하며, 이들은 주파수 응답법에 의해 식(4.19)와 같이 주어진다.

$$
\begin{aligned}
S_\phi(\omega) &= |\, G_\phi(j\omega)\,|^2\, S_{rd}(\omega) \\
S_\delta(\omega) &= \left|\, \frac{-K_P(1+T_D j\omega)}{(1+T_E j\omega)} \,\right|^2 S_\phi(\omega) \\
S_r(\omega) &= \left|\, \frac{K(1+T_3 j\omega)}{(1+T_1 j\omega)\,(1+T_2 j\omega)} \,\right|^2 S_\delta(\omega)
\end{aligned}
\tag{4.19}
$$

여기서 $j = \sqrt{-1}$, ω는 원주파수, $S_{rd}(\omega)$는 외란 스펙트럼이다. 그리고 $G_\phi(j\omega)$는 외란 $r_d(s)$에 대한 회두각 $\phi(s)$의 전달함수 $G_\phi(s)$에 s 대신 $j\omega$를 대입한 것이다. $G_\phi(s)$는 식(4.24)와 같이 구해진다.

$$
G_\phi(s) = \frac{(1+T_E s)(1+T_1 s)(1+T_2 s)}{s(1+T_E s)(1+T_1 s)(1+T_2 s) + K_P K(1+T_D s)(1+T_3 s)} \tag{4.24}
$$

제 5 장 수치 계산 및 고찰

5.1 공시선과 계산 조건

오토파일럿의 선형 및 비선형 제어 상수가 추진 에너지 손실에 미치는 영향을 정량적으로 평가, 해석하기 위해서, 수치 계산에 이용한 선박은 소형 어선 1척과 대형 광석운반선 1척이다. 외란의 계산 조건으로서는, 가장 대표적인 해상 상태인 평균 풍속 ($\overline{U}_T$) 10 $m/\sec$를 상정하였으며, 이 평균 풍속에 대응하는 파랑 특성은 평균 파주기 5.74 초 유의파고 2.2 m이다. 그리고 진풍향(γ_T)과 파도의 진행방향(χ)은 동일한 것으로 가정하였고, 바람과 파도는 $\chi = \gamma_T = 135^\circ$ (선수 사풍, 선수 사파) 방향과 $\chi = \gamma_T = 45^\circ$ (선미 사풍, 선미 사파) 방향이다. 그리고 광석운반선과 어선의 항행속도는 각각 Froude 수 0.15, 0.25 이다.

dCollection

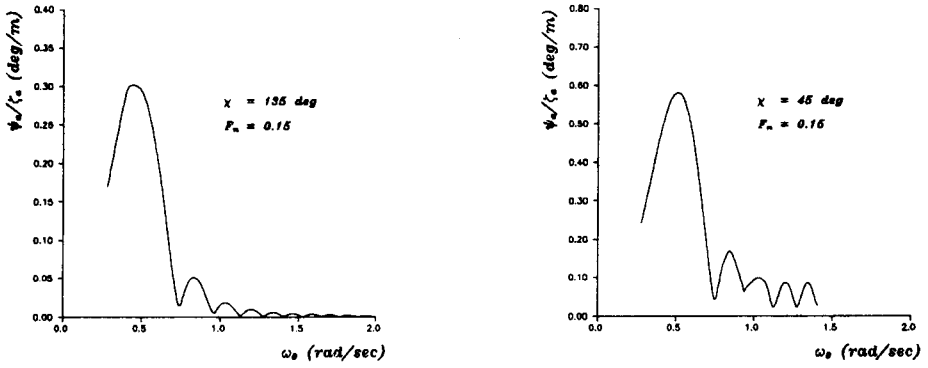


Fig. 5.3 Response amplitude operator of yaw(ore carrier)

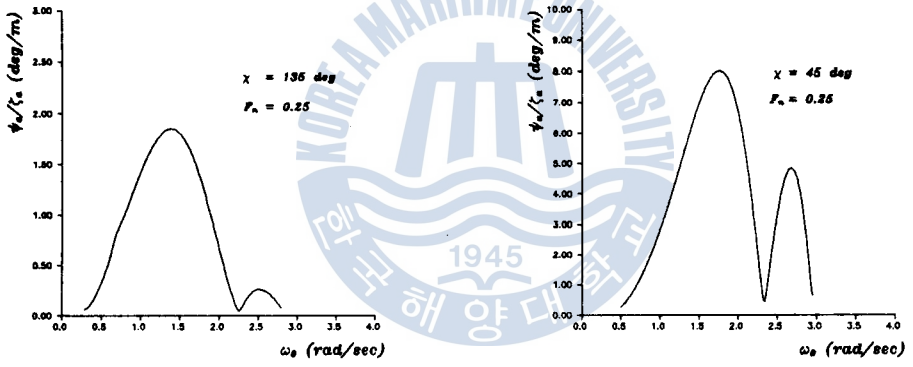


Fig. 5.5 Response amplitude operator of yaw(fishing boat)

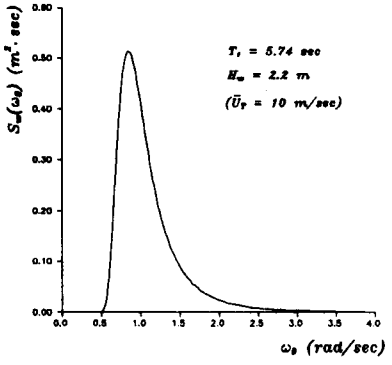


Fig. 5.12 ISSC wave spectrum

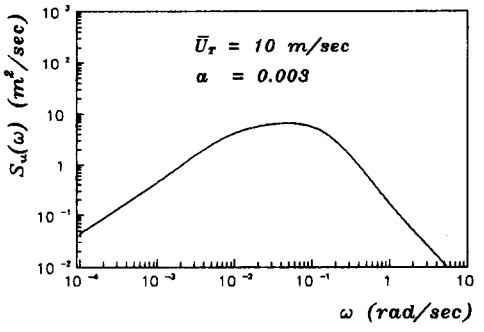
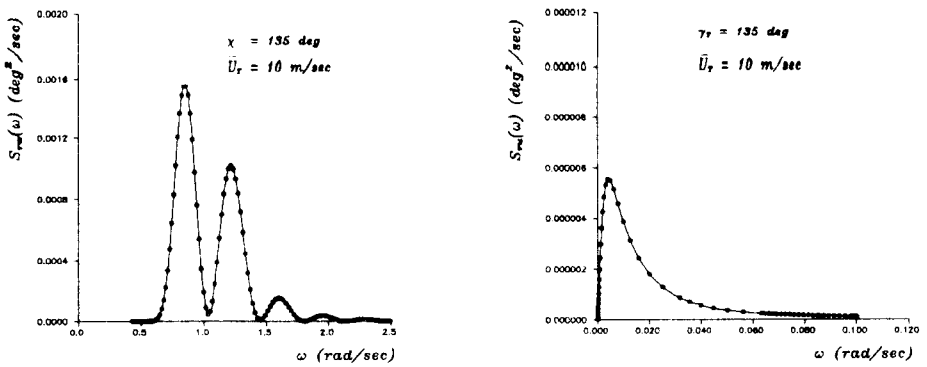


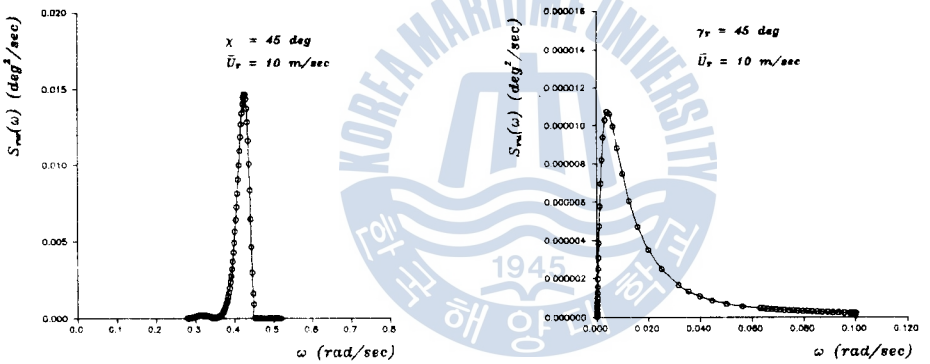
Fig. 5.13 Davenport wind spectrum

dCollection



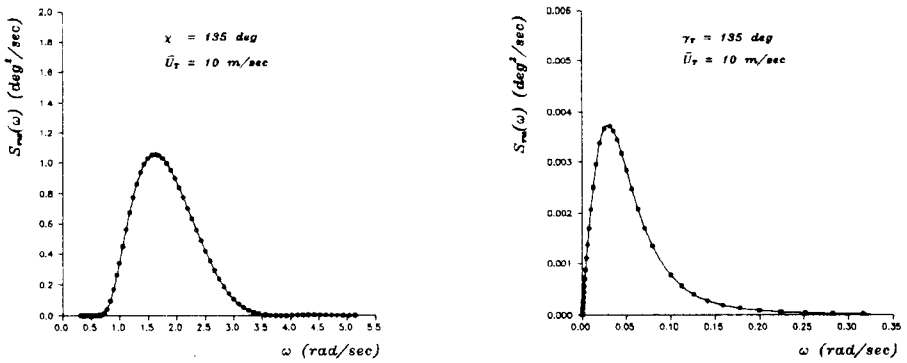
(a) wave (b) wind

Fig. 5.14 Disturbance spectrum due to wave & wind(ore carrier)



(a) wave (b) wind

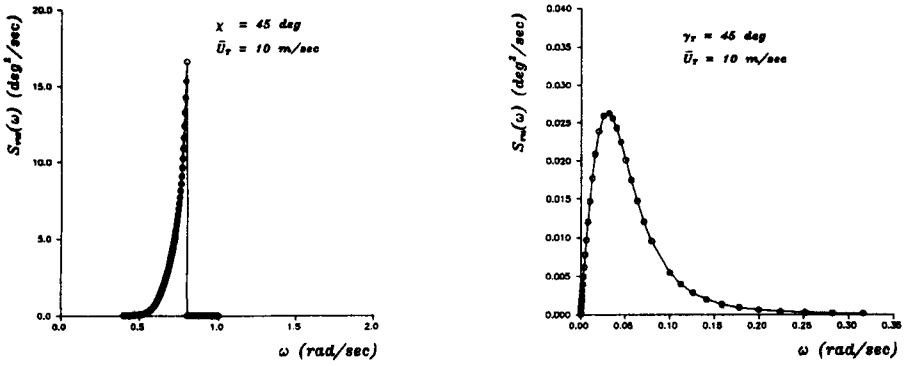
Fig. 5.15 Disturbance spectrum due to wave & wind(ore carrier)



(a) wave (b) wind

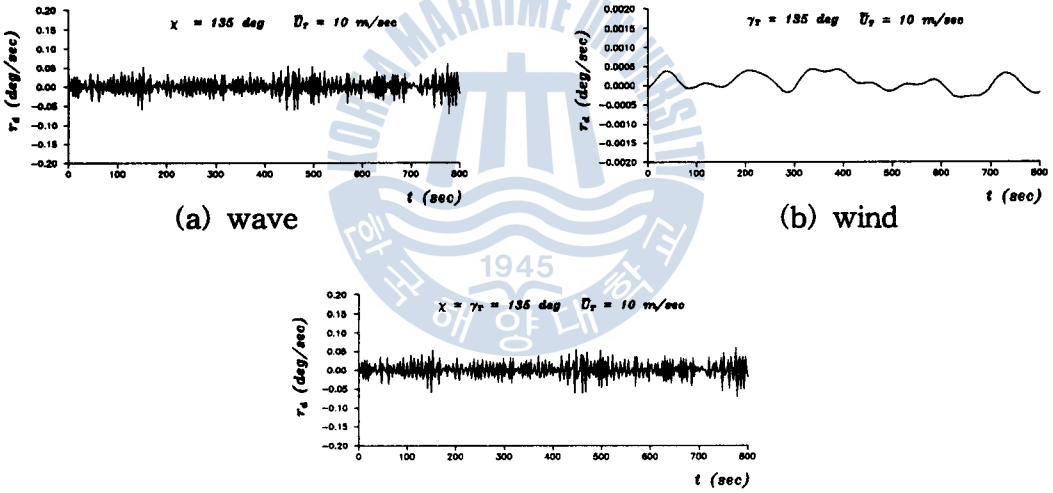
Fig. 5.16 Disturbance spectrum due to wave & wind(fishing boat)

Collection



(a) wave (b) wind

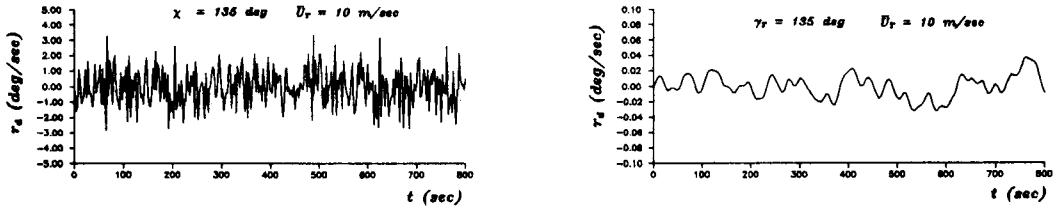
Fig. 5.17 Disturbance spectrum due to wave & wind(fishing boat)



(a) wave (b) wind

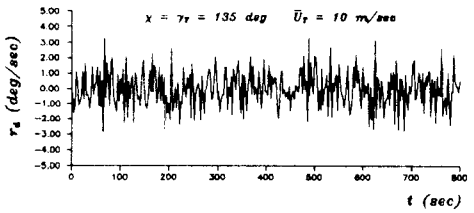
(c) wave and wind

Fig. 5.18 Time history of disturbance due to wave & wind(ore carrier)



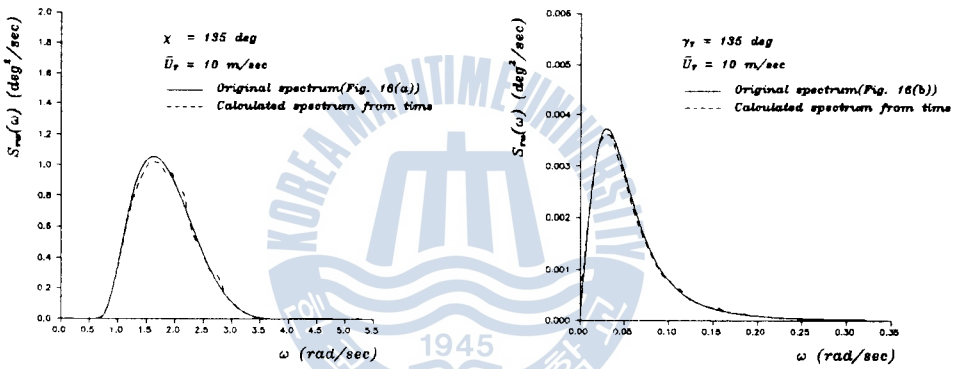
(a) wave (b) wind

dCollection



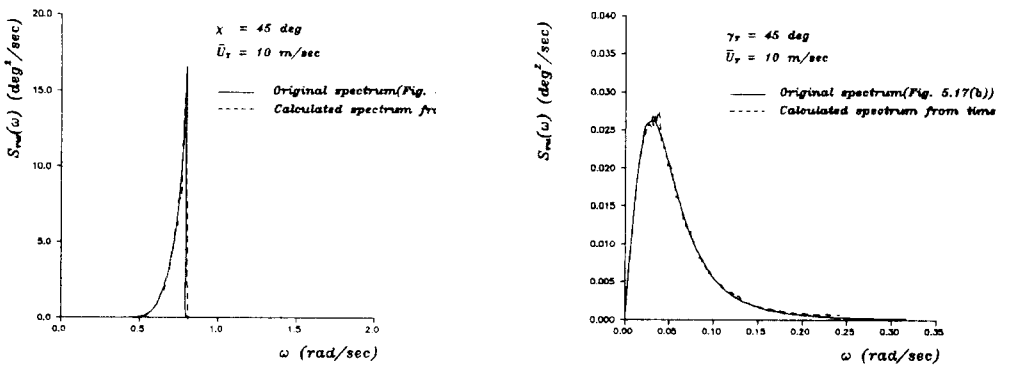
(c) wave and wind

Fig. 5.20 Time history of disturbance due to wave & wind(fishing boat)



(a) wave (b) wind

Fig. 5.24 Comparison of original spectrum with calculated spectrum from time history(fishing boat)



(a) wave (b) wind

Fig. 5.25 Comparison of original spectrum with calculated spectrum from time history(fishing boat)

dCollection

5.3 다방향파중의 불규칙 외란 스펙트럼 계산 결과

본 절에서는 실제 해상 상태에 가까운 다방향파중을 항행하는 선박의 회두각속도 외란 스펙트럼의 계산 결과를 설명한다. 파도의 스펙트럼은 제 3장의 식(3.2)와 같은 ISSC 스펙트럼을 사용하였으며, 식(3.22)의 방향 분포함수(directional spreading function)를 적용하여 다방향파 스펙트럼을 추정하고, 이때 다방향 스펙트럼의 퍼짐각(spreading angle)은 22.5° 이다. 그리고 방향파의 갯수는 7개로 한다. 다방향파의 스펙트럼과 성분파의 회두각속도 응답을 이용하여 식(3.23)에 의해 다방향파중에 파도가 선체에 유기하는 불규칙 회두 각속도 스펙트럼을 구한다. 그리고 이들 계산 결과와 단방향파중의 계산 결과인 Figs. 5.14 ~5.17를 Figs. 5.29 ~5.32에 동시에 나타낸다.

어선의 경우, Figs. 5.31 ~5.32에서와 같이 공통적으로 단방향파에서의 해석 결과가 다방향파에서의 결과보다 과대 평가됨을 알 수 있다.

Figs. 5.29 ~5.32에서 볼 수 있듯이, 단방향 및 다방향파에 의한 해석 방법에는 상당한 차이를 보이고 있다. 그러므로 보다 정확한 불규칙 외란 스펙트럼의 계산을 위해서는 실제 해상에 가까운 다방향 스펙트럼의 적용이 타당하다고 생각한다.

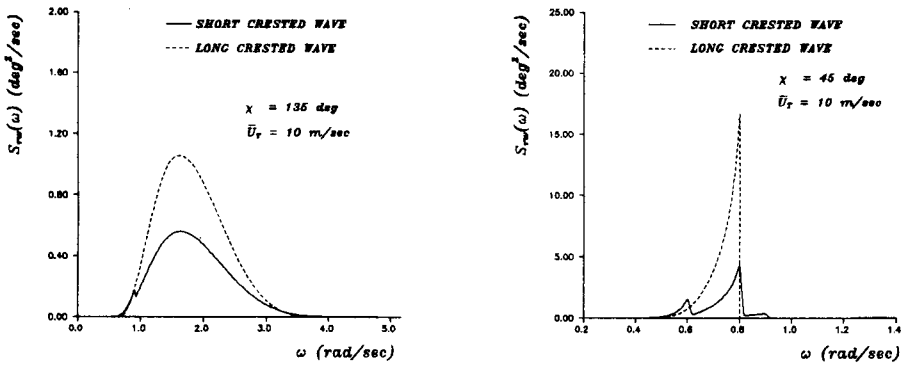


Fig. 5.31 Comparison of disturbance spectrum due to wave(fishing boat)

dCollection

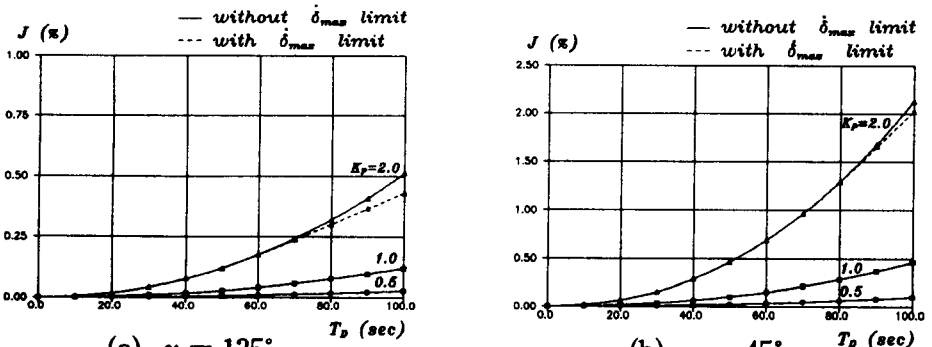
5.4 자동조타 시스템의 성능평가지수 계산 결과

5.4.1 선형 요소만을 포함하는 자동조타 시스템의 평가

5.2, 5.3절의 외란 특성을 이용하여 공시선박의 성능평가지수 계산 결과를 Figs. 5.37~5.48에 보인다. Figs. 5.37~5.48에 의하면 주파수 응답법에 의한 계산 결과와, 동일한 조건하에서의 시뮬레이션 기법에 의한 계산 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.그리고 양 선박에 공통된 사항으로서 T_D를 증가시키면 J의 값이 커지는데, 이것은 다음과 같은 이유로써 설명될 수 있을 것이다. 파도의 고주파수 성분의 영향으로, 회두각속도의 변동이 심한 상태에서 T_D를 증가시키면 타의 움직임이 오히려 빈번해지고 타각이 커진다. 따라서 조타에 기인하는 에너지 손실이 증대되어 결국 J가 커진다. 이러한 경향은 동일한 해상 조건에서 상대적으로 외란이 크게 작용하는 소형 어선의 경우 더욱 심하다. 그리고 양 선박 모두 침로 안정한 특성을 가지므로 비례 제어만으로써 충분히 시스템을 안정시킬 수 있으나, 만약 침로 불안정한 선박의 경우 또는 시스템 내부에 비선형 요소(예, 천후조정기구 또는 파워유닛 등)를 고려하는 경우에는 T_D의 필요성이 대두될 수도 있다. 왜냐하면 미분제어는 일반적으로 시스템의 안정화에 기여하기 때문이다. 그리고 J에 미치는 K_P의 영향은 특히 T_D 값이 큰 영역에서의 과대한 K_P는 J를 커지게 한다는 것을 알 수 있다. 한편, 시뮬레이션 기법에 의한 J의 계산 결과중 조타기의 최대 타각속도 $\dot{\delta}_{max}$의 영향을 나타낸 것이 Fig. 5.39, 5.40과 Fig. 5.45, 5.46이다. 광석운반선의 경우에는 $\dot{\delta}_{max}$의 유무에 따라 J의 계산 결과에 큰 차이를 보이지 않지만, 소형 어선의 경우에는 상당한 차이를 보이고 있다. 소형 어선의 경우에는 큰 외란의 작용하에서 조타기의 1차 지연요소에 의해 시스템이 불안정하게 되는데, 비선형 요소인 타각속도 제한을 가함으로써 시스템이 안정화됨을 나타낸다. 따라서 주파수 응답법은 작은 외란하에서 시스템이 충분히 안정할 때에는 유용하지만, 큰 외란하에서는 적용이 곤란함을 알 수 있다. 더우기 실제의 자동조타 시스템에는 인위적으로 또는 불가피하게 비선형 요소가 포함되어 있는데, 이러한 비선형 요소들의 영향을 충분히 고려한 성능평가지수의 계산에는 시뮬레이션 기법이 보다 정확하고 유용함을 알 수 있다. 그리고 다방향파중의 외란 특성을 이용한 계산 결과는 단방향파 해석에 의한 결과와 비교해서 정량적인 값의 차이는 보이지만, 대체적으로 비슷한 경향을 보인다. 이러한 정량적인 차이는 Figs 5.29 ~

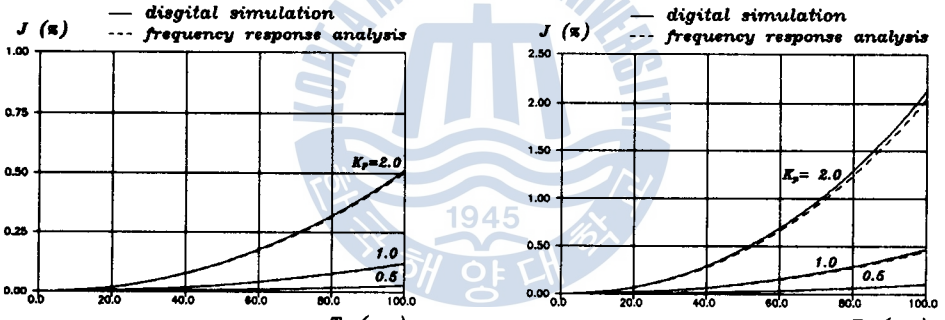
dCollection

5.32에 나타나 있는 외란 특성의 변화에 따른 결과로서, 보다 정확한 자동조타 시스템의 평가는 다방향파중의 외란 특성을 이용하는 것이 타당하다고 생각한다



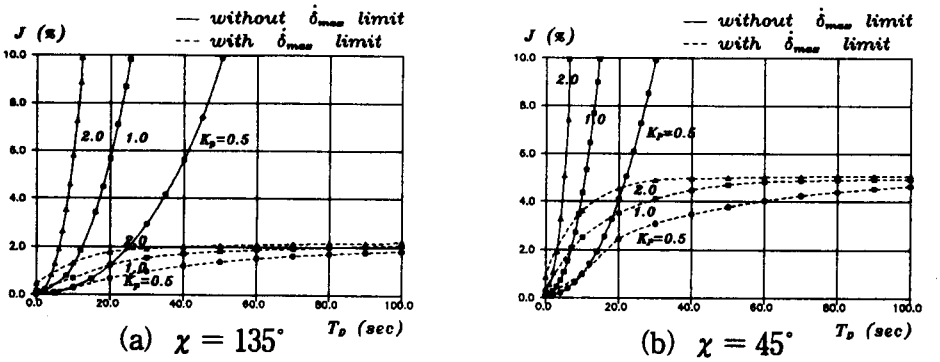
(a) $\chi = 135°$ (b) $\chi = 45°$

Fig. 5.39 Performance index curves(ore carrier, digital simulation)



(a) $\chi = 135°$ (b) $\chi = 45°$

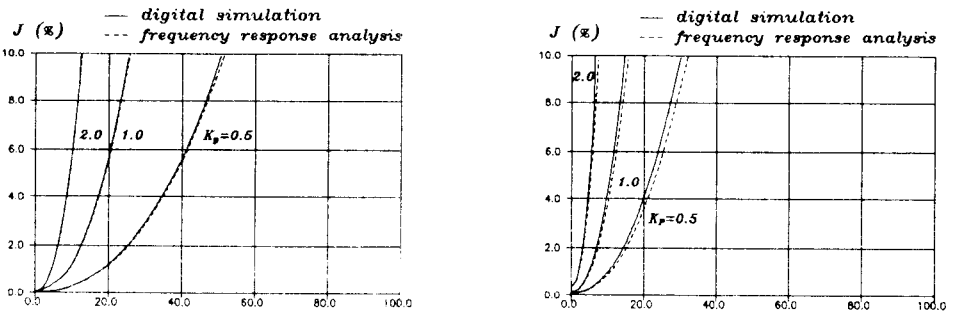
Fig. 5.41 Performance index curves(ore carrier)



(a) $\chi = 135°$ (b) $\chi = 45°$

Fig. 5.46 Performance index curves in short crested waves fishing boat,

dCollection



(a) $\chi = 135°$ (b) $\chi = 45°$

Fig. 5.48 Performance index curves in short crested waves(fishing boat)

5.4.2 비선형 요소와 필터 특성을 포함하는 자동조타 시스템의 평가

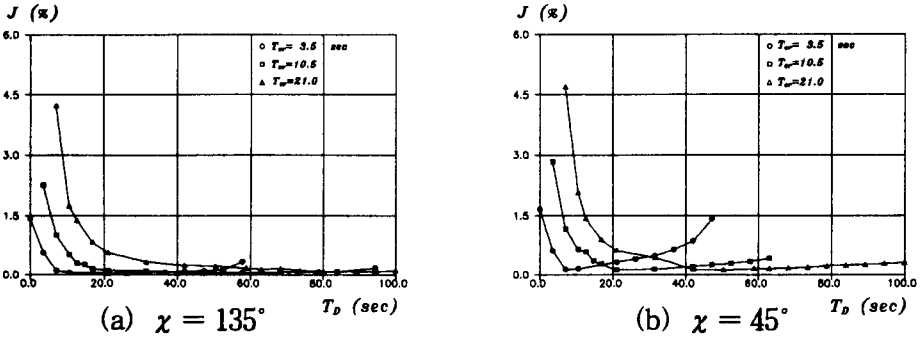
5.2, 5.3절의 외란 특성을 이용하여, 비선형 요소와 필터 특성을 포함하는 자동조타 시스템의 성능평가지수 계산 결과를 Figs. 5.49 ~5.60에 나타낸다. 성능평가지수 J의 값이 클수록 자동조타 항행시 추진 에너지 손실이 증대됨을 의미한다. 그리고 Figs. 5.49 ~5.60에서 해당되는 마크안에 까맣게 칠한 것은 시스템이 불안정하게 되는 한계점을 나타낸다. Figs. 5.49 ~5.52는 타각정수 K_P와 천후조정기구의 dead band 폭 b를 일정하게 유지하고, 미분제어 시정수 T_D가 0에서 100초까지 변화할 때, 필터 시정수 T_{cr}의 영향을 조사한 결과이다. 필터의 특성 ($T_D > T_{cr}$)을 고려할 때, Fig. 5.49, 5.50으로부터 어선의 경우에는 T_{cr}이 클수록 시스템이 안정되고, 아울러 큰 값의 T_D 영역에서 추진 에너지 손실이 감소됨을 알 수 있다. 한편, 광석운반선의 경우에는 Fig. 5.51, 5.52로부터 T_{cr}이 작을수록 추진 에너지 손실이 작다는 것을 알 수 있다. Figs. 5.53 ~5.56은 K_P와 T_{cr}을 일정하게 유지하였을 때 천후조정기구의 dead band 폭 b의 영향을 조사한 결과이다. Fig. 5.53, 5.54의 어선의 경우에는 b가 작아지면 큰 값의 T_D 영역에서 시스템이 불안정해지며, $b = 2$도일 때가 시스템이 안정하고 추진 에너지 손실도 작다는 것을 알 수 있다. Fig. 5.55, 5.56은 광석운반선의 계산 결과로서 시스템은 전반적으로 안정하며, $b = 0$도일 때가 추진 에너지 손실이 가장 작다는 것을 나타내고 있다. 따라서 동일한 해상 조건하에서 소형선의 경우는 대형선보다 외란이

dCollection

상대적으로 크게 작용하고 있으므로 b를 높혀 주어야 한다는 것을 알 수 있다. Figs. 5.57 ~5.60은 T_{cr}과 b를 일정하게 유지하였을 때 타각정수 K_P의 영향을 조사한 결과이다. Fig. 5.57, 5.58에서 어선의 경우에는 K_P가 작을수록 시스템도 안정하고 추진 에너지 손실이 작다는 것을 알 수 있다. Fig. 5.59, 5.60은 광석운반선의 계산 결과로서 시스템은 전반적으로 안정하며, K_P의 크기에 별 영향을 받지 않지만 $K_P = 2$일 때가 추진 에너지 손실이 작다는 것을 알 수 있다.

다방향파중의 외란 특성을 이용한 계산 결과는 주파수 응답법 계산 결과와 마찬가지로 단방향파 해석 결과와 비교해서 거의 동일한 경향을 보이고 있다. 단, 파도에 기인하는 불규칙 회두각속도 외란 특성의 변화에 의해서 시스템의 불안정을 나타내는 한계점의 이동을 볼 수 있다.

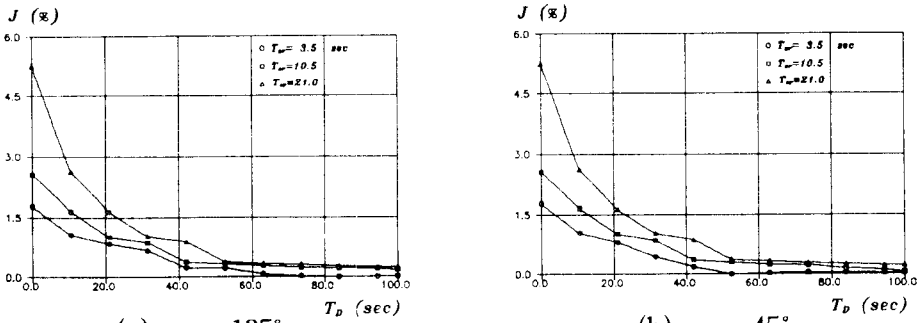
이상의 계산 결과에서 알 수 있듯이, 동일한 해상 조건하에서 소형선과 대형선의 경우 오토파일럿의 제어 상수의 영향은 거의 반대 경향을 보이고 있다. 따라서 특정 선박의 최적 조타를 위한 제어 상수는, 본 논문에서 제시한 평가법에 의해 검토되어져야 하며, 선박의 종류, 해상 상태에 따라서 오토파일럿의 운항 지침이 달라질 수 있다. 그리고 Figs. 5.49 ~5.60에 공통된 사항으로서, T_D를 증가시키면 대체로 추진 에너지 손실이 감소됨을 알 수 있다. 이러한 경향은 Hasegawa[6]의 연구 결과와 약간 상이하다. 한편, Hasegawa[6]의 연구에서는 자동조타 시스템 내부에 삽입된 비선형 요소와 필터 특성을 전혀 고려하지 아니하였으므로 본 연구 결과와 직접 비교는 곤란하다.



(a) $\chi = 135°$ (b) $\chi = 45°$

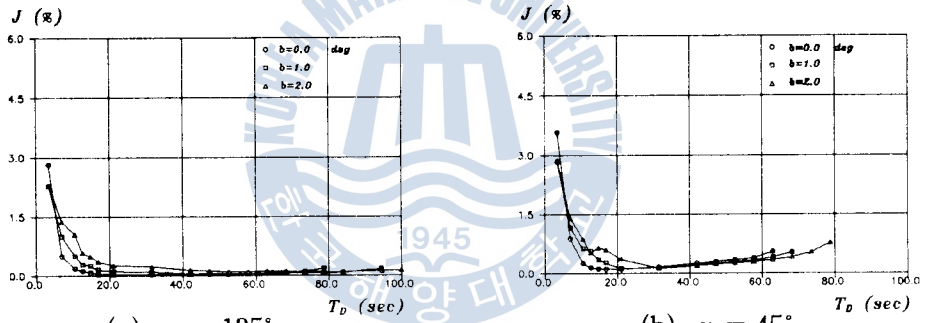
Fig. 5.50 The effect of filter time constant on propulsive energy loss in in short crested waves(fishing boat, $K_P = 0.5$, $b = 1.0$ deg)

dCollection



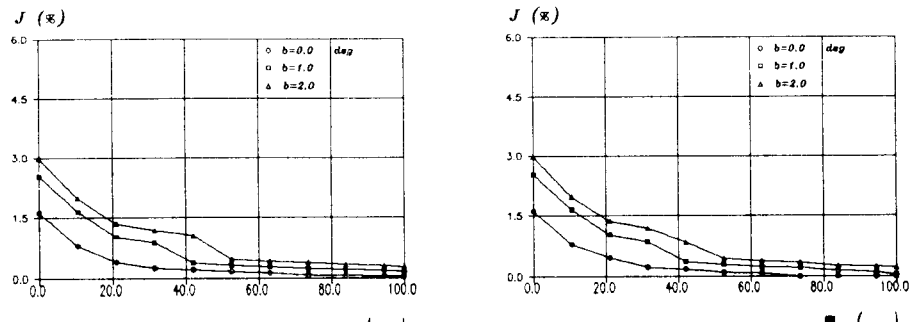
(a) $\chi = 135°$ (b) $\chi = 45°$

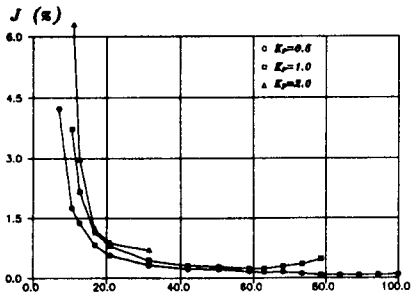
Fig. 5.52 The effect of filter time constant on propulsive energy loss in short crested waves(ore carrier, $K_P = 0.5$, $b = 1.0\,\mathrm{deg}$)



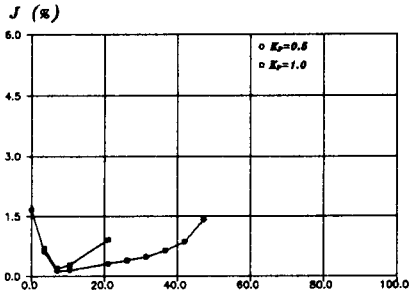
(a) $\chi = 135°$ (b) $\chi = 45°$

Fig. 5.54 The effect of weather adjuster on propulsive energy loss in short crested waves(fishing boat, $T_{cr} = 10.5\,\mathrm{sec}$, $K_P = 0.5$)





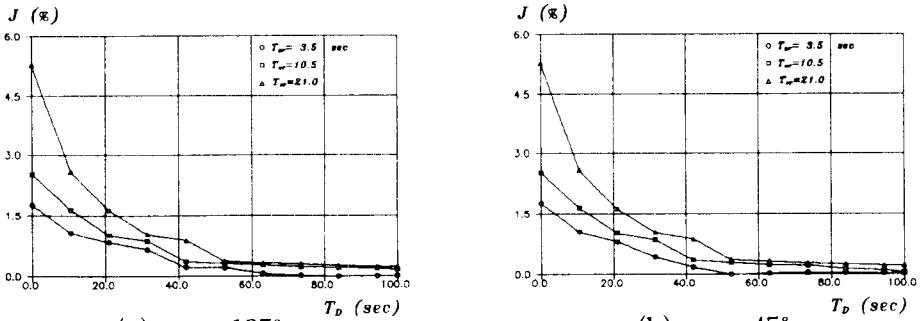
(a) $\chi = 135°$



(b) $\chi = 45°$

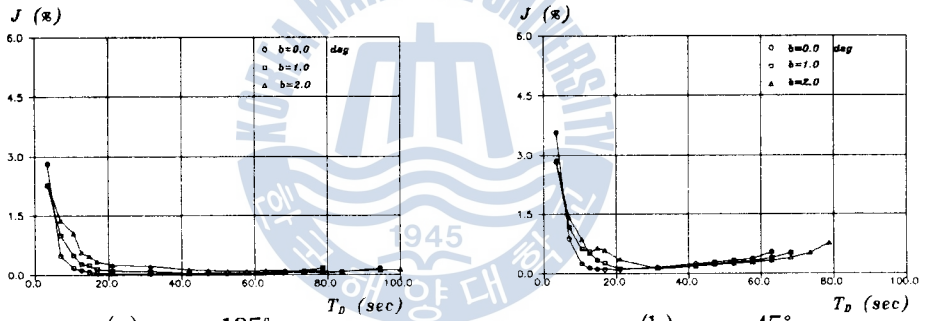
KOREA MARITIME UNIVERSITY 1945 한국해양대학교

dCollection



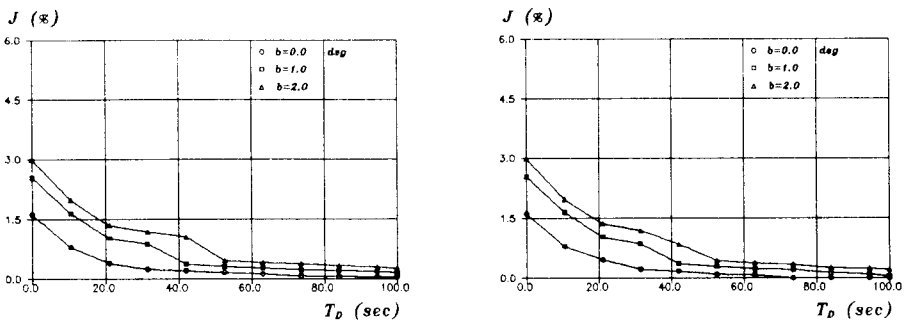
(a) $\chi = 135°$ (b) $\chi = 45°$

Fig. 5.52 The effect of filter time constant on propulsive energy loss in short crested waves(ore carrier, $K_P = 0.5$, $b = 1.0\,\mathrm{deg}$)



(a) $\chi = 135°$ (b) $\chi = 45°$

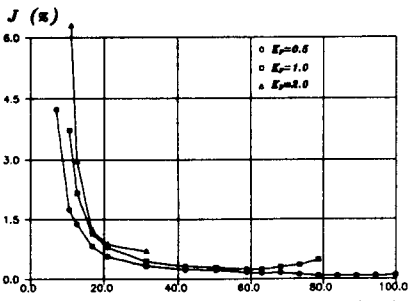
Fig. 5.54 The effect of weather adjuster on propulsive energy loss in short crested waves(fishing boat, $T_{cr} = 10.5\,\mathrm{sec}$, $K_P = 0.5$)



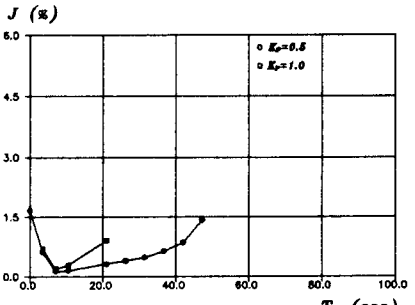
(a) $\chi = 135°$ (b) $\chi = 45°$

Fig. 5.56 The effect of weather adjuster on propulsive energy loss in short crested waves(ore carrier, $T_{cr} = 10.5\,\mathrm{sec}$, $K_P = 0.5$)

dCollection



(a) $\chi = 135°$



(b) $\chi = 45°$

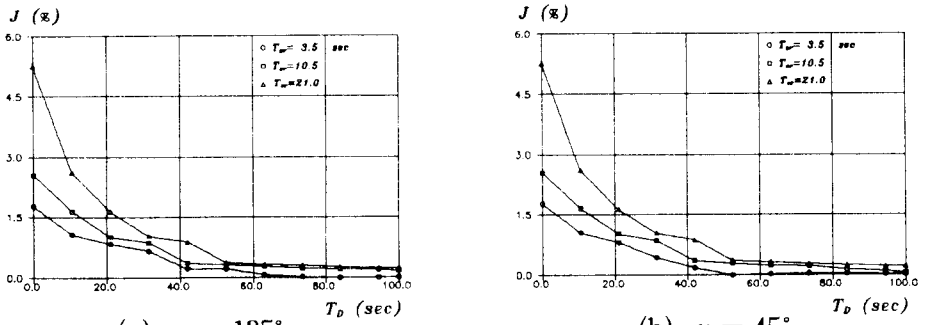
Fig. 5.58 The effect of rudder gain on propulsive energy loss in short crested waves(fishing boat, $T_{cr} = 21.0\,\text{sec}$, $b = 1.0\,\text{deg}$)

J (%)

J (%)

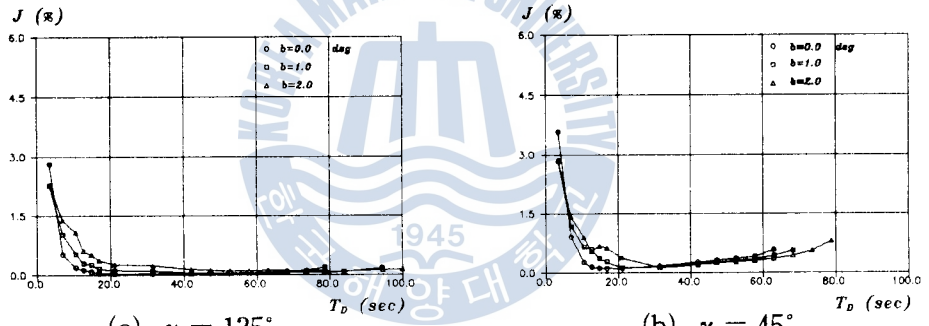
KOREA MARITIME UNIVERSITY 1945 한국해양대학교

dCollection



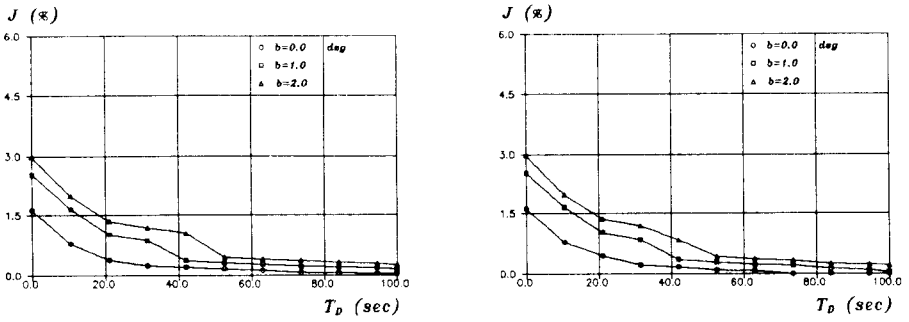
(a) $\chi = 135°$ (b) $\chi = 45°$

Fig. 5.52 The effect of filter time constant on propulsive energy loss in short crested waves(ore carrier, $K_P = 0.5$, $b = 1.0\,\mathrm{deg}$)



(a) $\chi = 135°$ (b) $\chi = 45°$

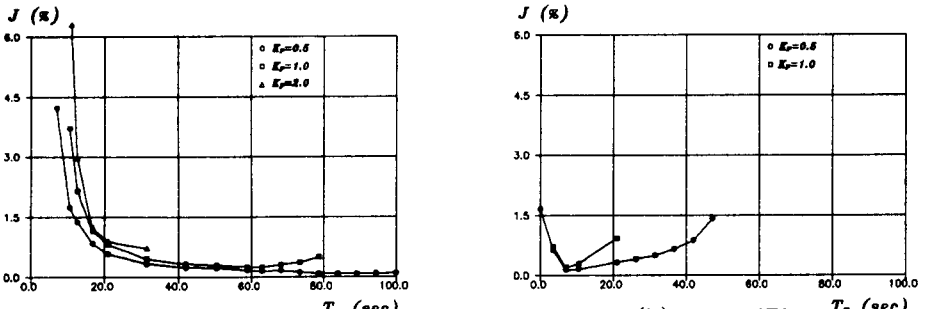
Fig. 5.54 The effect of weather adjuster on propulsive energy loss in short crested waves(fishing boat, $T_{cr} = 10.5\,\mathrm{sec}$, $K_P = 0.5$)



(a) $\chi = 135°$ (b) $\chi = 45°$

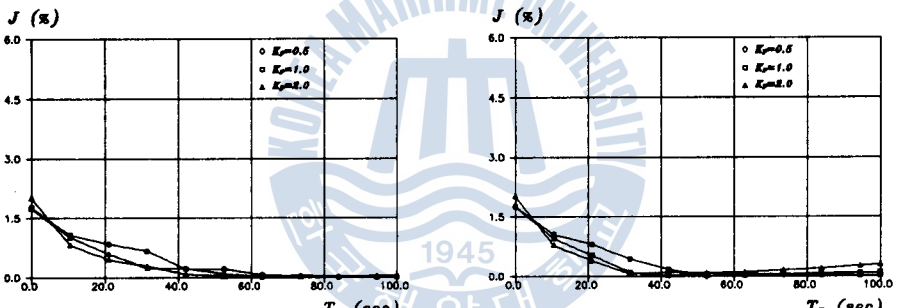
Fig. 5.56 The effect of weather adjuster on propulsive energy loss in short crested waves(ore carrier, $T_{cr} = 10.5\,\mathrm{sec}$, $K_P = 0.5$)

dCollection



(a) $\chi = 135°$ (b) $\chi = 45°$

Fig. 5.58 The effect of rudder gain on propulsive energy loss in short crested waves(fishing boat, $T_{cr} = 21.0\,\text{sec}$, $b = 1.0\,\text{deg}$)



(a) $\chi = 135°$ (b) $\chi = 45°$

Fig. 5.60 The effect of rudder gain on propulsive energy loss in short crested waves(ore carrier, $T_{cr} = 3.5\,\text{sec}$, $b = 1.0\,\text{deg}$)

제 6 장 결 론

이상의 연구를 통하여 얻은 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 선박 자동조타 시스템의 외부 입력항인 불규칙 외란은 본 연구에서 제안한 계산법에 따르면 임의 해역에서 자동조타로써 항행하는 선박에 작용하는 외란을 구할 수 있고, 특히 불규칙 외란을 회두각속도로 환산하여 스펙트럼 또는 시계열의 형태로서 구할 수 있으므로 자동조타 시스템의 평가, 해석에 용이하게 이용될 수 있을 것이다.

(2) 추파중에서는 주파수 변환을 이용하여 회두각속도 외란 스펙트럼을 계산하므로써

dCollection

전 범위에서의 파 입사각에 대한 불규칙 응답 스펙트럼의 계산이 가능함을 보였다. 그리고, 임의의 해역에서 파도를 단방향파로 가정하여 도출한 불규칙 응답 스펙트럼 계산 결과와 다방향파 해석 결과는 차이를 보이는 것을 알 수 있었다. 그러므로 보다 정확한 선체 응답 특성을 구하기 위해서는 다방향파에 의한 해석이 필요하다.

(3) 자동조타 시스템의 성능평가지수를 침로 편차, 타각, 회두각속도의 제곱평균치로써 표시할 수 있으며, 각 항의 계수는 선박의 조종유체력 특성에 의해 결정됨을 밝혔다.

(4) 성능평가지수의 계산법에는 주파수 응답법과 시뮬레이션 기법이 적용될 수 있으며, 동일한 외란 조건과 동일한 제어상수하에서는 양 방법의 적용결과는 동일함을 밝혔다. 큰 외란이 작용하는 경우 주파수 응답법은 한계가 있음을 알 수 있었고, 시스템 내부에 비선형 요소를 적절히 고려할 수 있는 시뮬레이션 기법이 보다 정확하고 유용함을 알 수 있었다. 그리고, 오토파일럿의 선형 및 비선형 제어 상수가 추진 에너지 손실량에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 수 있었다.

(5) 비선형 요소가 없는 선박의 자동조타 시스템에서, 오토파일럿의 미분제어 시정수 T_D를 높일수록 조타에 기인하는 에너지 손실이 커지므로 성능평가지수가 증대되는 경향이 있다. 한편, 비선형 요소를 포함하고 있는 선박의 자동조타 시스템에서, 오토파일럿의 미분제어 시정수 T_D는 대체적으로 추진 에너지 손실량을 줄이는 효과가 있다.

(6) 평균 풍속 10 $m/\sec$의 선수 사풍(斜風), 선미 사풍 및 이에 대응하는 파랑 조건 하에서, 오토파일럿의 제어 상수가 추진 에너지 손실량에 미치는 영향은 소형 어선과 대형 광석운반선에서 거의 반대의 경향을 나타낸다.

이상의 연구 결과에 의하면, 개개의 선박의 최적 자동조타를 위한 오토파일럿의 제어 상수는, 본 연구에서 제시한 평가법에 의해 다각적으로 검토되어야 하며, 선박의 종류, 해상 상태에 따라서 오토파일럿의 운용 지침이 달라질 수 있으므로 주의를 요한다. 또한, 본 연구에서 제시한 평가법의 타당성 확인을 위하여, 자동조타로 항행중인 선박의 실선 계측시험이 필요할 것으로 생각되어지며, 차후 연구 과제로는 여러가지 해상 상태에 따른 오토파일럿 제어 상수의 민감도 조사와 침로 불안정 선박에 있어서 추진 에너지 손실량 평가 및 오토파일럿의 운용 지침에 관한 연구 등이 필요하다고 생각된다.

dCollection

참 고 문 헌

[1] IMO, "Interim Standards for Ship Manoeuvrability", *Resolution A.751(18)*, adopted on November 1993.

[2] Tsubokawa, T. et al., "Power Loss Related to Automatic Course-keeping - with Reference to Minimum Necessary Course-stability -", *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 151, 1982(in Japanese).

[3] Nomoto, K. et al., "Loss of Propulsive Power Caused by Yawing with Particular Reference to Automatic Steering", *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 120, 1966(in Japanese).

[4] Koyama, T., "On the Optimum Automatic Steering System of Ships at Sea", *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 122, 1967(in Japanese).

[5] Bech, M. I., "Some Aspects of the Stability of Automatic Course Control of Ships", *The Journal of Mechanical Engineering Science*, Supplementary Issue, 1972.

[6] Hasegawa, K. et al., "On the Instability Criterion of the Autopilot Steering of Ships(1st Report) - Frequency Response Analysis and Basic Considerations", *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 148, 1980(in Japanese).

[7] Hasegawa, K., "On a Performance Criterion of Autopilot Navigation", *Journal of Kansai Society of Naval Architects*, Japan, No. 178, 1980.

[8] **西谷芳雄**, "Compassと**自動操舵**", *成山堂書店*, 1988.

[9] C. Plath Co., "Operator's Manual for Automatic Steering, NAVIPILOT II-EL", 1984.

[10] Nomoto, K. et al., "A New Procedure of Analysing Zig-zag Test", *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 134, 1973(in Japanese).

[11] **元良誠三**, "**船舶と海洋構造物の運動學**", *成山堂書店*, 1982.

[12] Korvin-Kroukovsky, B.V. & Jacobs, W.R., "Pitching and Heaving Motions of a Ship in Regular Waves", *SNAME Trans.*, Vol. 65, 1957.

[13] **渡邊惠弘**, "**船の上下動及び縦搖の理論について**", *九州大學工學集報*, 31卷 1號,

dCollection

1958.

[14] 田才福造, 高木又男, "規則波中應答理論及び計算法", *日本造船學會 耐航性* Symposium, 1969.

[15] Salvesen, N., Tuck, E.O. & Faltinsein, O., "Ship Motions and Sea Loads", *SNAME Trans*. Vol. 78, 1970.

[16] 藤野正隆, "Sway-Yaw運動を記述するための座標系に關する一考察", *日本造船學會論文集*, 第141號, 1977.

[17] 藤野正隆, "斜波中航走時のSway-Roll-Yaw連成運動方程式に 關する一考察", 日本*水槽試驗研究會(JTTC), 第2部會公表資料* No. 1981-Ⅱ-06, 1981.

[18] Hamamoto, M. et al., "波浪中の操縱運動を記述する新しい座標系とその運動方程式", *日本造船學會論文集*, 第173號, 1993

[19] 高木幹雄, 田才福造, "横運動方程式の流體力について", *西部造船會會報*, 第46號, 1973.

[20] Tasai, F., "Hydrodynamic Force and Moment Produced by Swaying and Rolling Oscillation of Cylinders on the Free Surface", *Reports of Research Institute for Applied Mechanics*, Vol. IX, No. 35, 1961.

[21] 孫 景浩, 野本謙作, "高速Container船の操縱運動と横搖れとの連成拳動について", *日本造船學會論文集*, 第150號, 1981.

[22] Newman, J. N., "Marine Hydrodynamics", *MIT Press,* 1978.

[23] Takahasi, T., "Mechanism of Rolling and Application,", *Report of Mitsubishi Heavy Industy Nagasaki Technical Institute*, No. 2842, 1969(in Japanese).

[24] Isherwood, R. M., "Wind Resistance of Merchant Ships", *Transaction of The Royal Institution of Naval Architects*, Vol. 115, 1973.

[25] Davenport, A. G., "The Spectrum of Horizontal Gustiness Near the Ground in High Winds", *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, Vol. 87, 1957.

[26] Price, W. G., Bishop, R.E.D., "Probabilistic Theory of Ship Dynamics", *JHON WILEY & SONS* 1974

dCollection

應-", 第2會耐航性に關するシンポジウム, *日本造船學會*, 1977.

[29] Inoue, S. et al., "Hydrodynamic Derivatives on Ship Manoeuvring", *International Shipbuilding Progress*, Vol. 28, No. 320, 1981.

[30] 小瀨邦治, "操縱性能推定に用いる數學モデルと模型試驗", *日本造船學會*, 第668號, 1983.

[31] 芳村康男, "增減速を伴う操縱運動の取扱について", *日本造船學會論文集*, 第144號, 1978.

[32] 日本關西造船協會, "造船設計便覽", 第4版, 海文堂, 1983.

KOREA MARITIME UNIVERSITY 1945 한국해양대학교

dCollection

1958.

[14] 田才福造, 高木又男, "規則波中應答理論及び計算法", *日本造船學會 耐航性* Symposium, 1969.

[15] Salvesen, N., Tuck, E.O. & Faltinsein, O., "Ship Motions and Sea Loads", *SNAME Trans.* Vol. 78, 1970.

[16] 藤野正隆, "Sway-Yaw運動を記述するための座標系に關する一考察", *日本造船學會論文集*, 第141號, 1977.

[17] 藤野正隆, "斜波中航走時のSway-Roll-Yaw連成運動方程式に 關する一考察", 日本*水槽試驗研究會(JTTC), 第2部會公表資料* No. 1981-II-06, 1981.

[18] Hamamoto, M. et al., "波浪中の操縱運動を記述する新しい座標系とその運動方程式", *日本造船學會論文集*, 第173號, 1993

[19] 高木幹雄, 田才福造, "横運動方程式の流體力について", *西部造船會會報*, 第46號, 1973.

[20] Tasai, F., "Hydrodynamic Force and Moment Produced by Swaying and Rolling Oscillation of Cylinders on the Free Surface", *Reports of Research Institute for Applied Mechanics*, Vol. IX, No. 35, 1961.

[21] 孫 景浩, 野本謙作, "高速Container船の操縱運動と横搖れとの連成挙動について", *日本造船學會論文集*, 第150號, 1981.

[22] Newman, J. N., "Marine Hydrodynamics", *MIT Press,* 1978.

[23] Takahasi, T., "Mechanism of Rolling and Application,", *Report of Mitsubishi Heavy Industy Nagasaki Technical Institute*, No. 2842, 1969(in Japanese).

[24] Isherwood, R. M., "Wind Resistance of Merchant Ships", *Transaction of The Royal Institution of Naval Architects*, Vol. 115, 1973.

[25] Davenport, A. G., "The Spectrum of Horizontal Gustiness Near the Ground in High Winds", *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, Vol. 87, 1957.

[26] Price, W. G., Bishop, R.E.D., "Probabilistic Theory of Ship Dynamics", *JHON WILEY & SONS*, 1974.

[27] 日根野元裕, 山内保文, "海洋波のスペクトル", 海洋工學特集-海洋構造物と海象-, *日本造船學會誌*, 第609號, 1980.

[28] Takezawa, S. et al., "耐航性に關する實船計算と實驗-實船試驗結果と豫測値の對

dCollection

應-", 第2會耐航性に關するシンポジウム, *日本造船學會*, 1977.

[29] Inoue, S. et al., "Hydrodynamic Derivatives on Ship Manoeuvring", *International Shipbuilding Progress*, Vol. 28, No. 320, 1981.

[30] 小瀨邦治, "操縱性能推定に用いる數學モデルと模型試驗", *日本造船學會*, 第668號, 1983.

[31] 芳村康男, "增減速を伴う操縱運動の取扱について", *日本造船學會論文集*, 第144號, 1978.

[32] 日本關西造船協會, "造船設計便覽", 第4版, *海文堂*, 1983.

[33] 손 경호, "선박의 조종성능 평가를 위한 수학 모델에 관한 연구, CSDP(I) 사업", *한국해양대학 부설 선박연구소 연구보고서*, 1989.

[34] Ogawa, A. et al., "MMG Report(V) - On the Experimental Verification and Improvement of Mathematical Modelling for Manoeuvring Motions -", *Bulletin of S.N.A. of Japan*, No. 616, 1980(in Japanese).

[35] 日野幹雄, "Spectral 解析", *朝倉書店*, 1986.

[35] Abkowitz, M. A., "Lectures on Ship Hydrodynamics - Steering and Manoeuvrability - *Hydro-og Aerodynamik Laboratorium, Report* No. Hy-5, 1964.

[36] 서 상현, 송 용규, "Auto-pilot 시스템에 적용되는 제어 알고리즘에 대하여", *대한조선학회 논문집, 제31권, 제2호*, 1994. 5.

[37] 곽 문규, 서 상현, 공 인영, "신경망을 이용한 선박용 자동조타장치의 제어 시스템 설계 연구", *1995년도 대한조선학회 추계연구발표회*, 1995. 11.

[38] 元良誠三, "船體運動に對する附加質量及び附加慣性モーメントについて,(1)(2)(3)", *日本造船協會論文集*, 第105號, 第106號, 1959.

[39] Clarke, A. et al., "The Application of Manoeuvring Criteria in Hull Design Using Linear Theory", *The Naval Architect*, March, 1983.

[40] 小瀨邦治, 湯室彰規, 芳村康南, "操縱運動數學Modelの具體化 - 船體・Propeller・舵の相互干涉とその表現 -", 第3回操縱性 Symposium text, 日本造船學會, 1981.

dCollection