항해학회 투고 논문

추사파중에서 자동조타로써 항행하는 선박의 추진에너지 손실량 평가에 관한 연구

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

이 경우* , 손 경호**

Gyoung-Woo Lee, Kyoung-Ho Sohn

* 부산대학교 공과대학 조선해양공학과 박사후과정
** 한국해양대학교 이공대학 조선공학과

1996. 4. 20

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 in the system 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 modelling the characteristics of an autopilot. The calculation method of imposing irregular disturbances to ship dynamics is proposed, where irregular disturbances implying irregular wave and the fluctuating component of wind.

For the evaluation of automatic steering system of ships in the open seas, an important term, "performance index", is introduced from the viewpoint of energy saving, which derived from the concept of energy loss on ship propulsion.

Finally, the present methods are applied to two typical types of ship ; an ore carrier and a fishing boat. The various effects of linear and/or non-linear control constants of autopilot on propulsive energy loss are investigated to validate and clarify the present simulation technique.

1. 서 언

선박의 조종성에 관한 연구중, 운항 경제성 향상에 관한 연구는 선박이 대양에서 미리 설정된 항로를 따라서 여하히 보침 제어함으로써 추진 에너지 손실을 최소화하고 최단 시간에 목적지에 도달할 수 있을까 하는 경제성 문제가 관심의 촛점이 되고 있다.

대양을 항해하는 거의 모든 선박은 오토파이럿을 이용하여 자동으로 침로를 유지하고 있고 오토파일럿은 당해 선박의 현재의 침로를 감지하여 목표 침로와의 편차가 최소화 되도록 조타 명령을 하는 제어 장치이다. 이러한 오토파일럿은 파워 유닛, 조타기, 선체운동 및 컴퍼스와 함께 폐루프(closed-loop) 제어 시스템을 이루고 있다. 이러한 자동조타 시스템에 있어서, 가장 중요한 사항은 불규칙 외란 특성과 자동조타 시스템의 비선형 요소라 생각된다.

본 연구에서는 선박의 자동조타 시스템을 구성하는 선형 및 비선형 요소의 수학모델화를 실시하고, 자동조타로써 항행하는 선박이 받게되는 불규칙 외란 계산결과[11]를 이용하여 오토파이럿의 선형 및 비선형 제어상수가 선박의 추진 에너지 손실량에 미치는 영향을 정량적으로 평가, 해석한다.

본 연구의 풍·파랑 조건으로서는 선미 사파, 사풍을 다루도록 하고, 상기 조건에서의 불규칙 외란 결과를 이용하여 소형 어선과 대형 광석운반선에 대해 수치 계산하고, 그 결과에 대해서 고찰한다

2. 자동조타 시스템의 수학모델

일반적으로 선박 자동조타 시스템은 Fig. 2.1과 같이 구성되어 있다. 그리고 각 요소의 동작 특성과 입출력 관계는 다음과 같이 수학 모델화된다.

2.1 선체운동

선체운동(ship dynamics)은, 자동조타의 경우 보침운동(course-keeping)을 다루기 때문에 타각에 대한 회두각속도의 선형 응답 모델로써 식(2.1)과 같이 나타낼 수 있다[1].

$$T_1 T_2 \ddot{r} + (T_1 + T_2)\dot{r} + r = K\delta + KT_3\dot{\delta} \tag{2.1}$$

여기서 r은 회두각속도, δ는 타각, T_1, T_2, T_3, K는 조종성 지수를 나타낸다.

2.2 컴퍼스

컴퍼스(compass)에 대해서는 식(2.2)와 같이 나타낸다.

$$\psi = \int_0^t r^* dt \qquad \text{단,} \quad r^* = r + r_d \tag{2.2}$$

여기서 ψ는 회두각, t는 시간, r_d는 풍·파랑에 의한 회두각속도로 환산한 불규칙 외란을 나타낸다.

2.3 오토파일럿

오토파일럿은 일반적으로 선형 요소와 비선형 요소로써 구성된다. 본 연구에서는 선형 요소로서는 PD 제어와 필터 특성을, 비선형 요소인 천후조정기구로서는 dead band를 생각하기로 한다[2]. 이들을 수학 모델화하면 식(2.3), (2.4)와 같다.

$$\dot{\delta} + T_{cr}\ddot{\delta} = -(\psi - \psi_I) - T_D r^* \tag{2.3}$$

$$\delta^{**} = \begin{cases} K_P(\dot{\delta} - b) & (\dot{\delta} > b) \\ K_P(\dot{\delta} + b) & (\dot{\delta} < -b) \\ 0 & (|\dot{\delta}| \leq b) \end{cases} \tag{2.4}$$

여기서 $\dot{\delta}$는 천후조정기구에의 입력, δ^{**}는 오토파일럿의 출력 즉, 명령 타각, ψ_I는 목표 침로각, b는 dead band의 폭을 나타낸다. 그리고 K_P은 타각 정수 즉, 비례제어 상수를, T_{cr}은 필터의 시정수를, T_D는 미분제어의 시정수를 나타낸다. 본 연구에서는 T_D를 T_{cr}의 함수로써 식(2.5)와 같이 표시한다.

$$T_D = K_{cr} T_{cr} \tag{2.5}$$

여기서 K_{cr}은 미분제어의 타각 정수를 나타낸다.

2.4 파워유닛

파워 유닛은 오토파일럿으로부터 전달되는 명령 타각 δ^{**}에 상당하는 전기 신호를 기계적 변위로 변환하여 조타기의 가변 유량 펌프를 움직이기 위한 유압장치이다[3]. 파워 유닛의 동작 특성을 다음과 같이 수학 모델화 한다[4].

$$\delta^* = \delta_0^* \qquad (|\delta^{**} - \delta^*| \leq 2\delta_b)$$
$$\delta^* = \delta_0^* + \text{sign}(\delta^{**} - \delta^*) \int_0^t \dot{\delta}^* \, dt \qquad (|\delta^{**} - \delta^*| > 2\delta_b) \tag{2.6}$$

여기서 δ^{**}는 명령 타각 상당의 전기신호, δ^*는 명령 타각상당의 기계적 변위, δ_0^*는 $t = 0$에서의 δ^* 값(초기치), $\dot{\delta}^*$는 vane 펌프(일정 유량 펌프)의 유량의 타각속도 환산치, $2\delta_b$는 솔레노이드 밸브 개폐 기구의 유격의 타각 환산치이다.

2.5 조타기

조타기(steering gear)의 수학 모델은 식(2.7), (2.8)과 같이 표시된다[5].

$$T_E \dot{\delta} + \delta = \delta^* \qquad (|\dot{\delta}| \leq |\dot{\delta}_{max}|) \tag{2.7}$$
$$\dot{\delta} = \text{sign}(\delta^* - \delta)|\dot{\delta}_{max}| \qquad (|\dot{\delta}| > |\dot{\delta}_{max}|) \tag{2.8}$$

여기서 T_E는 조타기의 시정수, $|\dot{\delta}_{max}|$는 최대 추종 각속도를 나타낸다.

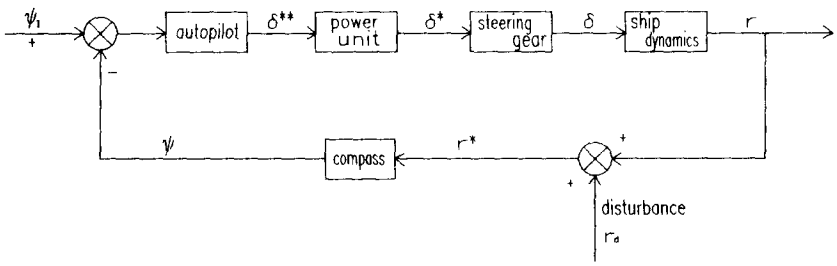
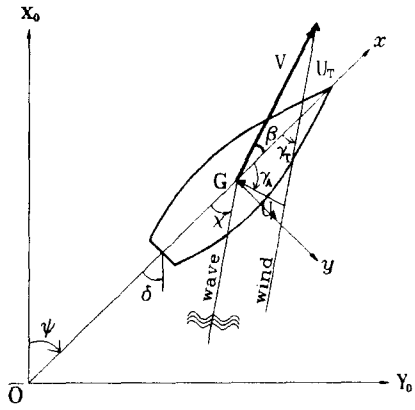


Fig. 2.1 Block diagram of automatic steering system

3. 불규칙 외란의 추정

자동조타 항행시에 선체에 작용하는 외란으로서, 불규칙 파도에 의해서 유기되는 외란과 바람의 변동 성분에 의해서 유기되는 외란을 생각한다. 균일한 유속의 조류나 정상풍(**定常風**)은 이에 상당하는 만큼의 침로 수정이 필요할 따름이므로 자동조타 시스템의 평가에서 제외하기로 한다. 본 연구에서는 상기 외란을 회두각속도로 환산하여 자동조타 시스템에 작용하는 것으로 간주한다. 계산에 필요한 좌표계를 Fig. 3.1과 같이 정의한다. Fig. 3.1에서 $\overline{O} - X_0Y_0$는 공간고정좌표계 $G - xy$는 선체고정좌표계이다. 선박의 조종운동은 $G - xy$좌표계에서 정의되며, 운동의 주요 파라메터로서 선박의 회두각속도를 r, 사항각을 β, 타각을 δ라 한다. 그리고 선체와 파도의 만남각을 χ, 선체와 바람의 만남각(진풍향)을 γ_T라 한다.



G : center of gravity
V : ship speed
U_T : true wind speed
U_A : apparent wind speed
β : drift angle
χ : encounter angle of wave
γ_T : angle of true wind
γ_A : angle of relative wind off bow

Fig. 3.1 Coordinate system and symbol definitions

3.1 불규칙 파도에 기인하는 외란 스펙트럼

파도가 선체에 유기하는 회두각속도 스펙트럼은 파도의 스펙트럼과 규칙파에 대한 선수동요 응답함수로부터 계산할 수 있다[11]. 한편, 선수동요 응답함수는 스트립이론을 이용하여 계산한다[6]. 계산에 사용된 파도의 스펙트럼은 ISSC 스펙트럼을 이용한다[7]. 만남파 스펙트럼 $S_w(\omega)$와 ISSC 스펙트럼 $S_w(\omega_0)$ 사이에는 식(3.1)의 관계가 성립된다.

$$S_w(\omega) = S_w(\omega_0) / (1 - \frac{2\omega_0 V}{g} \cos\chi) \tag{3.1}$$

여기서

V : 선속, g : 중력가속도, χ : 파도와 선체의 만남각

($\chi = 0°$: 선미파, $\chi = 180°$: 선수파)

그리고 만남 주파수와 파도의 원주파수 사이에는 식(3.2)의 관계가 성립된다.

$$\omega = \omega_0(1 - \frac{\omega_0}{g} V\cos\chi) \tag{3.2}$$

3.2 추사파중에서의 외란 스펙트럼 계산

파도의 입사각이 $\frac{\pi}{2} < \chi < \frac{3\pi}{2}$ 사이에서는 원주파수와 만남주파수는 1대 1 대응관계이므로, 선박의 응답 스펙트럼 계산은 별문제가 없다. 그러나 파도의 입사각이 $0 \leq \chi < \frac{\pi}{2}$, $\frac{3\pi}{2} < \chi \leq 2\pi$ 사이인 추사파중에서는 만남주파수가 음이 되는 부분이 생기므로 파도의 원주파수 ω_0와 만남주파수 ω의 관계를 다시 정의할

필요가 있다. 즉, 파도의 원주파수 ω_0가 $\frac{g}{V\cos\chi} < \omega_0 \leq \infty$의 영역에서는 식(3.2)를 다음과 같이 변환시켜야 한다.

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

식(3.3)과 같이 변환된 만남주파수를 그림으로 나타내면 Fig. 3.2와 같다. Fig. 3.2에서 c는 파속(wave celerity)을 나타낸다. Fig. 3.2에서와 같이 추사파중에서는 동일한 만남주파수에 3가지의 원주파수 존재하게 된다. 그러므로, 추사파중에서 항행하는 선박의 회두각속도 외란 스펙트럼을 식(3.4)와 같이 주파수 범위에 따라 3부분으로 나누어 계산할 수 있다[8].

$$\begin{aligned}
&\text{영역 I} && S_{rw}(\omega)_{\mathrm{I}} = \omega^2 \cdot S_w(\omega)_{\mathrm{I}} \cdot \left[\frac{\phi_a}{\zeta_a}(\omega)\right]^2_{\mathrm{I}} \\
&\text{영역 II} && S_{rw}(\omega)_{\mathrm{II}} = \omega^2 \cdot S_w(\omega)_{\mathrm{II}} \cdot \left[\frac{\phi_a}{\zeta_a}(\omega)\right]^2_{\mathrm{II}} \\
&\text{영역 III} && S_{rw}(\omega)_{\mathrm{III}} = \omega^2 \cdot S_w(\omega)_{\mathrm{III}} \cdot \left[\frac{\phi_a}{\zeta_a}(\omega)\right]^2_{\mathrm{III}}
\end{aligned} \tag{3.4}$$

여기서, 첨자 I, II, III는 Fig. 3의 해당 영역을 나타낸다. 식(3.6)의 각 영역에서의 파도의 만남 스펙트럼은 식(3.5)와 같다.

$$\begin{aligned}
&\text{영역 I} && S_w(\omega)_{\mathrm{I}} = \frac{S_w(\omega_0)}{1 - \frac{2\omega V}{g}\cos\chi} \\
&\text{영역 II} && S_w(\omega)_{\mathrm{II}} = \frac{S_w(\omega_0)}{1 - \frac{2\omega V}{g}\cos\chi} \\
&\text{영역 III} && S_w(\omega)_{\mathrm{III}} = \frac{S_w(\omega_0)}{-1 + \frac{2\omega V}{g}\cos\chi}
\end{aligned} \tag{3.5}$$

그러므로 추파중에서의 최종적인 선박의 회두각속도 외란 스펙트럼은 식(3.6)과 같다.

$$S_{rw}(\omega) = S_{rw}(\omega)_{\mathrm{I}} + S_{rw}(\omega)_{\mathrm{II}} + S_{rw}(\omega)_{\mathrm{III}} \tag{3.6}$$

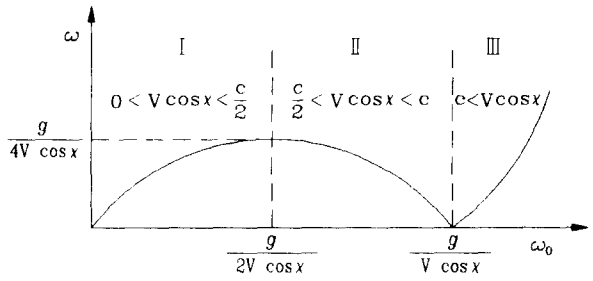


Fig. 3.2 Variation of encounter circular frequency ω with circular frequency of wave ω_0

3.3 다방향파중에서의 외란 스펙트럼의 계산

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

파도의 스펙트럼이 파의 평균 진행방향에 대해서 $-\frac{\pi}{2} \sim \frac{\pi}{2}$ 범위에 있어서 $\cos^2\mu$의 분포를 하고 있다고 가정하면, 파도의 스펙트럼은 식(3.7)과 같이 표현할 수 있다[9].

$$S_w(\omega, \mu) = (\frac{2}{\pi}) S_w(\omega) \cos^2\mu \qquad ; \quad -\frac{\pi}{2} \le \mu \le \frac{\pi}{2} \tag{3.7}$$

여기서

$S_w(\omega, \mu)$: 다방향파의 스펙트럼, μ : 파도의 퍼짐각

따라서 선박이 다방향파중에서 항행할 때, 파도가 선체에 유기하는 불규칙 회두각속도 스펙트럼은 식(3.8)과 같이 나타낼 수가 있다.

$$S_{rw}(\omega, \chi) = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \omega^2 \cdot S_w(\omega, \mu) \cdot \left[\frac{\phi_a}{\zeta_a} (\omega, \chi - \mu) \right]^2 d\mu \tag{3.8}$$

여기서

$S_{rw}(\omega, \chi)$: 다방향파중의 선체의 회두각속도 스펙트럼

3.4 바람의 변동성분에 기인하는 외란 스펙트럼

바람이 선체에 유기하는 회두각속도 스펙트럼은 타각으로 환산한 변동풍의 외란 스펙트럼과 선박의 전달 함수를 이용하여 계산할 수 있다[10]. 구체적인 계산은 참고 문헌[11]에 의한다.

한편, 풍속의 변동 성분 스펙트럼으로서는 Davenport 스펙트럼[12]을 이용한다. 그리고, 계산에 필요한 유체력 미계수와 조종성 지수는 참고 문헌[11]에 의해 구한다.

3.5 회두각속도 외란

회두각속도로 환산한 외란 스펙트럼이 구해지면 회두각속도 외란의 시계열은 식(3.9)와 같다.

$$r_d(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \sqrt{2\, S_r(\omega_i)\, \delta\omega} \cdot \sin(\omega_i t + \varepsilon_i) \tag{3.9}$$

여기서 $S_r(\omega)$는 외란 스펙트럼 밀도함수이다. 그리고 ε_i는 랜덤 위상각으로서 0에서 2π까지의 값을 가지는 난수를 취하도록 한다.

4. 자동조타시스템의 평가

4.1 성능평가지수

오토파일럿의 목적은 대양 항행시 선박이 일정 침로를 유지하도록 하는 데 있다. 따라서 오토파일럿 성능은 운항 경제성의 관점에서 선박의 추진 에너지 손실량, 달리 표현하면 연료소비량으로써 평가하는 것이 타당할 것이다. 본 연구에서는 Hasegawa의 정의에 따라, 선박의 조종운동을 나타내는 전후동요 운동방정식으로부터 추진 에너지 손실량의 관점에서 성능평가지수를 도출, 식(4.1)과 같이 정의한다[13].

$$J = \frac{1}{2}\overline{\psi^2} + \frac{a_{rr}}{a_{VV}}\overline{r'^2} + \frac{a_{\delta\delta}}{a_{VV}}\overline{\delta^2} \tag{4.1}$$

여기서 $\overline{\psi^2}$, $\overline{r'^2}$, $\overline{\delta^2}$는 각각 ψ, r', δ의 제곱평균치이다. 여기서, a_{rr}, a_{VV}, $a_{\delta\delta}$의 값은 선박의 유체력 계수로부터 구할 수 있다[13].

5. 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. 이들의 주요목을 Table 5.1에, 정면도와 선수미 측면 형상을 각각 Fig. 5.1, 5.2에 나타낸다. 그리고 양 선박의 유체력 계수, 조종성 지수 및 조타기와 파워 유닛 특성 상수를 Table 5.2에 나타낸다. 그리고 조타기와 파워 유닛 특성상수는 일반적으로 실선에서 채택되고 있는 수치를 이용하였다[3].

외란의 계산 조건으로서는, 가장 대표적인 해상 상태인 평균 풍속($\overline{U}_T$) 10 $m/\sec$를 상정하였으며, 이 평균 풍속에 대응하는 파랑 특성은, WMO code 1100[11]에 의하면 평균 파주기 5.74 초 유의파고 2.2 m이다. 그리고 진풍향(γ_T)과 파도의 진행방향(χ)은 동일한 것으로 가정하였고, 바람과 파도는

$\chi = \gamma_T = 45°$ (추사풍, 추사파)방향이다. 그리고 광석운반선과 어선의 항행속도는 각각 Froude 수 0.15, 0.25 이다.

Table 5.1 Principal particulars of ship

items		ore carrier	fishing boat
HULL			
Length B. P.	L (m)	247.0	27.90
Breadth	B (m)	40.6	6.30
Mean draft	d (m)	16.0	2.25
Trim	τ (m)	0.0	0.0
Block coefficient	C_B	0.8243	0.6868
Midship section coefficient	C_M	0.9975	0.9695
Rudder			
Height	H (m)	9.94	2.0
Area ratio	A_R/Ld	1/60	1/26.5
Aspect ratio	λ	1.5	1.7
Propeller			
Diameter	D (m)	6.5	1.9
Pitch ratio	P/D	0.65	1.0

Table 5.2 Coefficients of characteristics of ship dynamics, steering gear and power unit

items	ore carrier	fishing boat
a'_{VV}	0.0282	0.0453
a'_{rr}	0.8290	0.6166
$a'_{\delta\delta}$	0.1316	0.3008
T'_1	6.86	2.45
T'_2	0.35	0.29
T'_3	0.78	0.72
K'	2.48	2.05
T_E	2.5 sec	2.5 sec
$\lvert \dot{\delta}_{max} \rvert$	3.0 deg/sec	3.0 deg/sec
$2\delta_b$	1 deg	1 deg
$\dot{\delta}^*$	2 deg/sec	2 deg/sec

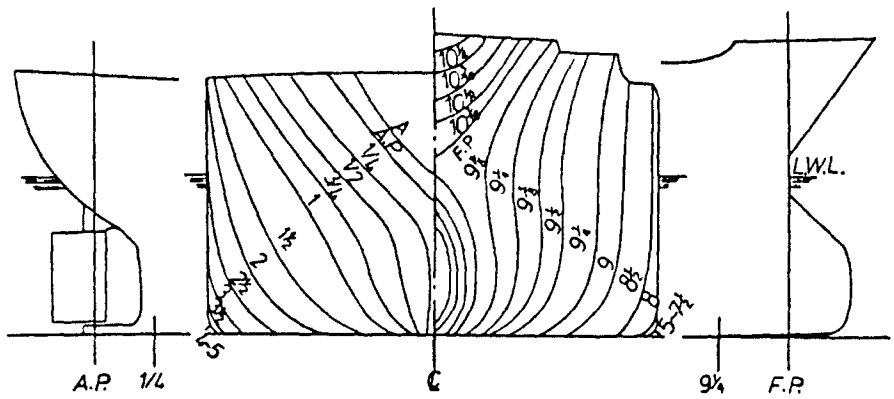


Fig. 5.1 Body plan and hull end profiles(ore carrier)

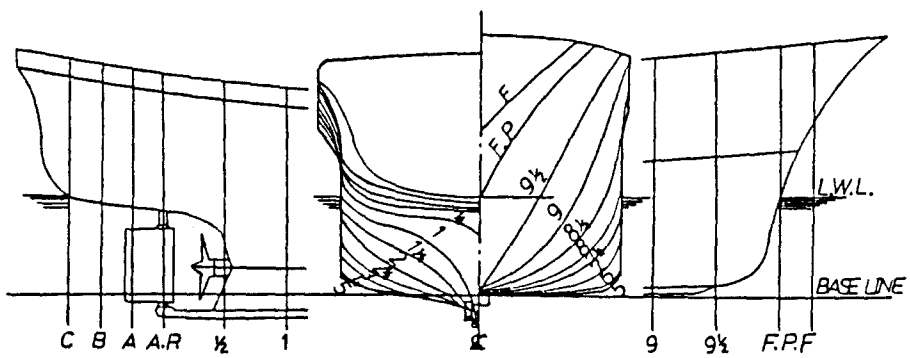


Fig. 5.2 Body plan and hull end profiles(fishing boat)

5.2 외란 스펙트럼의 계산 결과

상기 두 공시 선박에 대해서 수치 계산한 결과는 다음과 같다. Fig. 5.3, 5.4는 외란 스펙트럼 계산에 사용한 ISSC 파도 스펙트럼과 Davenport 변동풍 스펙트럼을 나타낸다. Fig. 5.5는 식(3.7)의 방향 분포함수를 적용하여 다방향파의 스펙트럼을 추정, 생성된 방향파 스펙트럼을 표시한다. Fig. 5.5에서 주방향을 0° 로 표시하고 퍼짐각은 22.5° 이다. 그리고 방향파의 갯수는 7개로 한다. 성분파의 회두각속도 응답은 Fig. 5.6, 5.7과 같다. 다방향파의 스펙트럼과 성분파의 회두각속도 응답을 이용하여 식(3.8)에 의해 다방향파중에 파도가 선체에 유기하는 불규칙 회두각속도 스펙트럼을 구한다. 그리고 이들 계산 결과와 단방향파중의 계산 결과를 Fig. 5.8에 동시에 나타낸다. 바람의 변동성분에 기인하는 외란 스펙트럼은 Fig. 5.9에 나타낸다.

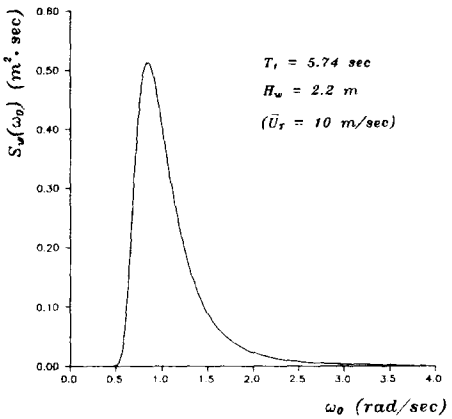


Fig. 5.3 ISSC wave spectrum

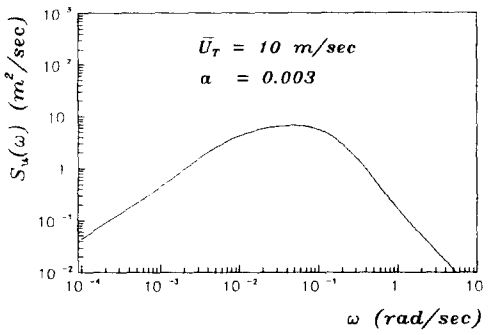


Fig. 5.4 Davenport wind spectrum

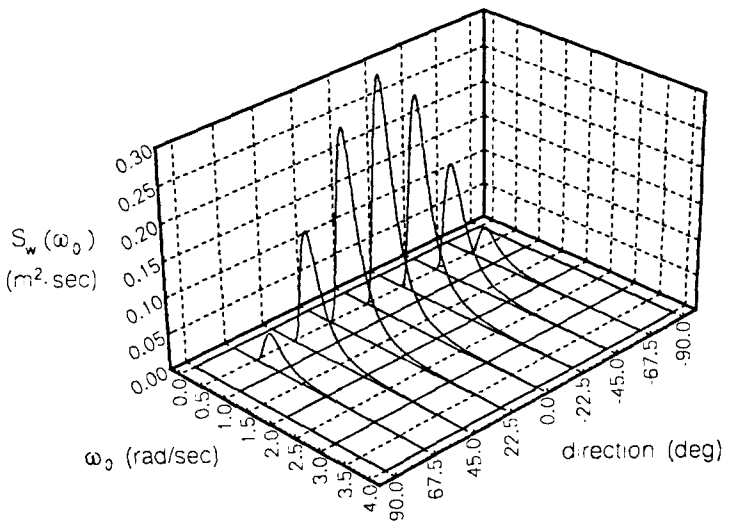


Fig. 5.5 Directional wave spectrum

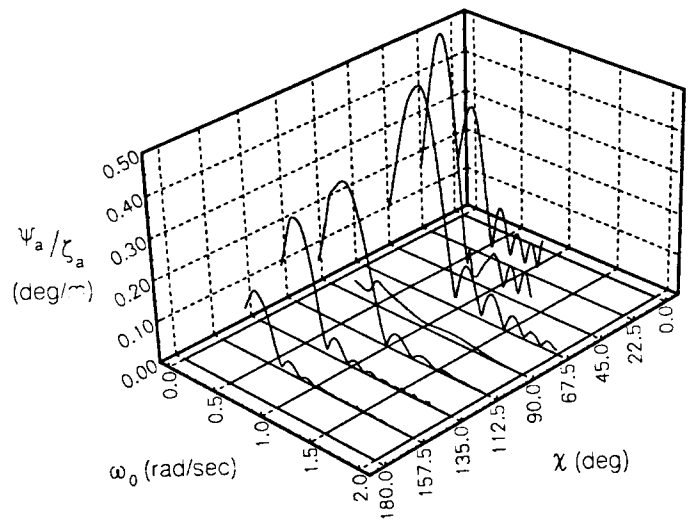


Fig. 5.6 Response amplitude operator of yaw according to heading angle (ore carrier)

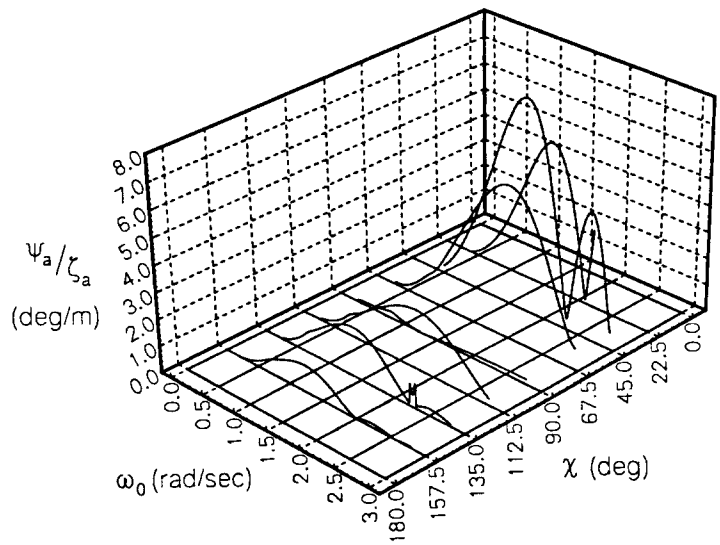
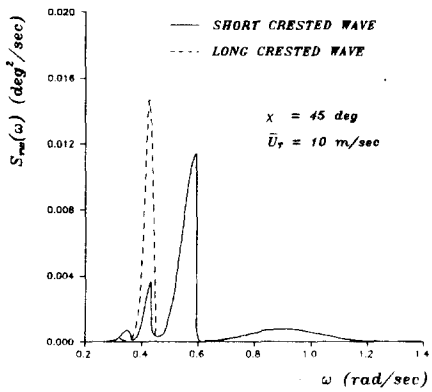
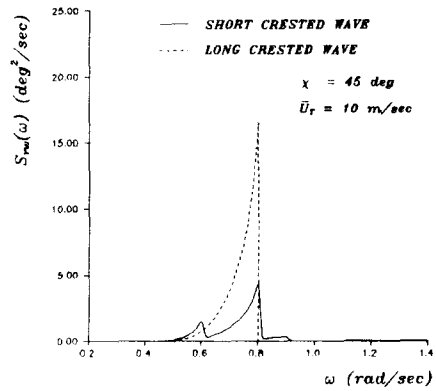


Fig. 5.7 Response amplitude operator of yaw according to heading angle (fishing boat)

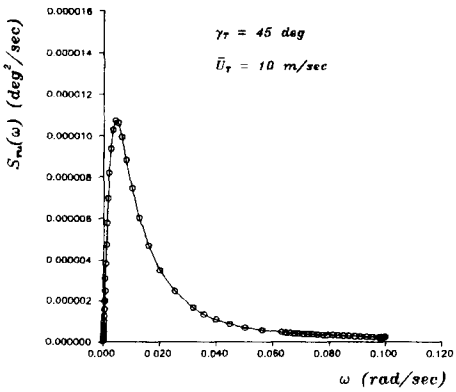


(a) ore carrier

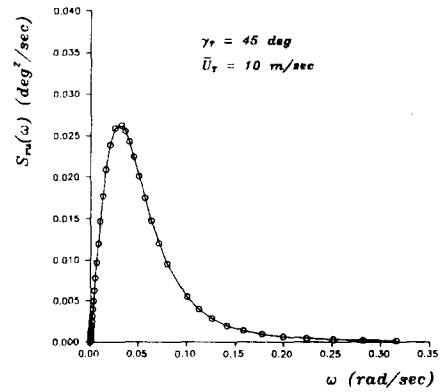


(b) fishing boat

Fig. 5.8 Comparison of disturbance spectrum due to wave($\chi = 45$deg)



(a) ore carrier

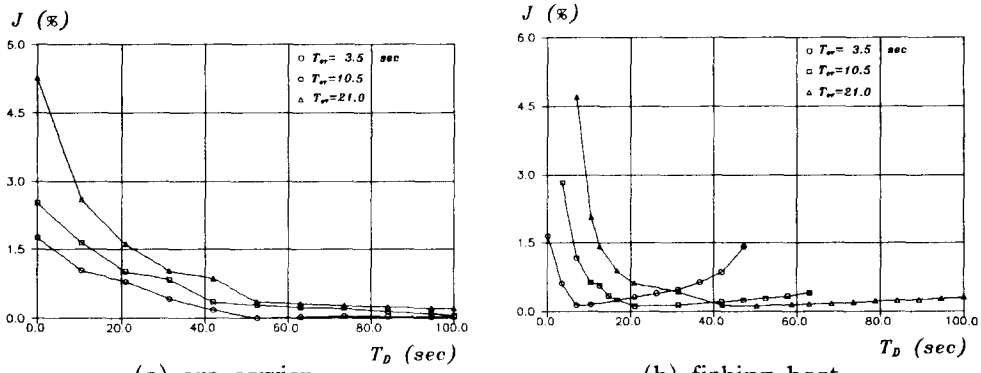


(b) fishing boat

Fig. 5.9 Disturbance spectrum due to wind(ore carrier, $\chi = 45$deg)

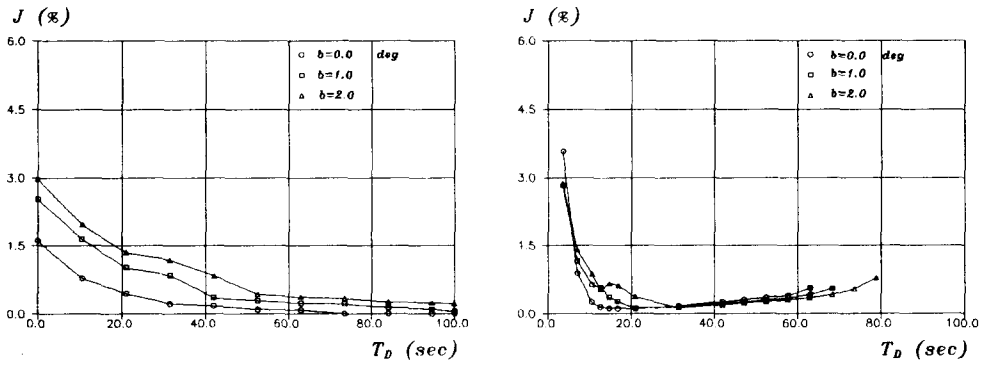
5.3 자동조타 시스템의 평가

5.2절의 외란 특성을 이용하여, 비선형 요소와 필터 특성을 포함하는 자동조타 시스템의 성능평가지수를 수치 계산한 결과를 Figs. 5.10 ~5.12에 나타낸다. 성능평가지수 J의 값이 클수록 자동조타 항행시 추진 에너지 손실이 증대됨을 의미한다. 그리고 Figs. 5.10 ~5.12에서 해당되는 마크안에 까맣게 칠한 것은 시스템이 불안정하게 되는 한계점을 나타낸다. Fig. 5.10은 타각정수 K_P와 천후조정기구의 dead band 폭 b를 일정하게 유지하고, 미분제어 시정수 T_D가 0에서 100초까지 변화할 때, 필터 시정수 T_{cr}의 영향을 소사한 결과이다. Fig. 5.11은 K_P와 T_{cr}을 일정하게 유지하였을 때 천후조정기구의 dead band 폭 b의 영향을 조사한 결과이다. Fig. 5.12는 T_{cr}과 b를 일정하게 유지하였을 때 타각정수 K_P의 영향을 조사한 결과이다.



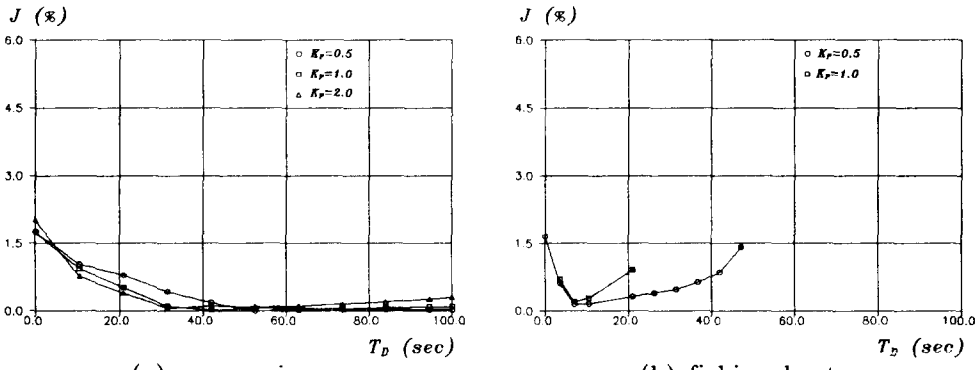
(a) ore carrier (b) fishing boat

Fig. 5.10 The effect of filter time constant on propulsive energy loss in short crested waves(fishing boat, $K_P = 0.5$deg, $b = 1.0$deg)



(a) ore carrier (b) fishing boat

Fig. 5.11 The effect of weather adjustment on propulsive energy loss in short crested waves(fishing boat, $T_{cr} = 10.5$sec, $K_P = 0.5$)



(a) ore carrier (b) fishing boat

Fig. 5.12 The effect of rudder gain on propulsive energy loss in short crested waves(fishing boat, $T_{cr} = 21.0$sec, $b = 1.0$deg)

6. 결 론

본 연구에서는 파랑중 자동조타로써 보침 항행중인 선박의 제어 양부(良否)를 평가하기 위해서, 운항 경제성 관점에서의 추진 에너지 손실을 정량적으로 평가하는 방법을 논하였다. 그리고, 오토파일럿 선형 및 비선형 제어 상수가 전체 시스템의 안정성 또는 추진 에너지 손실의 증감에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 평균 풍속 10 m/sec의 선미 사풍(斜風) 및 이에 대응하는 파랑 조건하에서, 자동조타로써 항행하는 소형 어선과 대형 광석운반선에 대한 수치 계산을 실시하였다.

이상의 연구를 통하여 얻은 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 비선형 요소를 포함하고 있는 선박의 자동조타 시스템에서, 오토파일럿의 미분제어 시정수 T_D는 대체적으로 추진 에너지 손실량을 줄이는 효과가 있다.

(2) 어선의 경우에는 T_{cr}이 클수록 시스템이 안정되고, 아울러 큰 값의 T_D 영역에서 추진 에너지 손실이 감소된다. 한편, 광석운반선의 경우에는 T_{cr}이 작을수록 추진 에너지 손실이 작다는 것을 알 수 있다.

(3) 천후조정기구의 dead band 폭 b의 영향은 어선의 경우에는 b가 작아지면 큰 값의 T_D 영역에서 시스템이 불안정해지며, $b = 2$도일 때가 시스템이 안정하고 추진 에너지 손실도 작다. 광석운반선의 경우, 시스템은 전반적으로 안정하며, $b = 0$도일 때가 추진 에너지 손실이 가장 작다. 동일한 해상 조건하에서 소형선의 경우는 대형선보다 외란이 상대적으로 크게 작용하고 있으므로 b를 높혀 주어야 한다는 것을 알 수 있다.

(4) 어선의 경우에는 K_P가 작을수록 시스템도 안정하고 추진 에너지 손실이 작다. 광석운반선의 경우, K_P의 크기에 별 영향을 받지 않지만 $K_P = 2$일 때가 추진 에너지 손실이 가장 작다.

(5) 평균 풍속 10 m/sec의 선수 사풍, 선미 사풍 및 이에 대응하는 파랑 조건하에서, 오토파일럿의 제어 상수가 추진 에너지 손실량에 미치는 영향은 소형 어선과 대형 광석운반선에서 거의 반대의 경향을 나타낸다.

참 고 문 헌

[1] 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).

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

[3] 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).
[4] 손경호, 이경우, 황승욱, 배정철, "자동조타로써 항행하는 선박의 추진 에너지 손실량 평가법에 관한 연구", *한국항해학회지*, 제19권 3호, 1995.
[5] 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).
[6] 손경호, 이경우, 김진형, "규칙파에 대한 조종운동의 응답함수에 관한 고찰", *한국항해학회지*, 제18권 4호, 1994.
[7] 元良誠三, "**船舶と海洋構造物の運動學**", *成山堂書店*, 1982.
[8] Price, W. G., Bishop, R.E.D., "Probabilistic Theory of Ship Dynamics", *JHON WILEY & SONS*, 1974.
[9] 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應-**", **第2會耐航性に關するシンポジウム**, *日本造船學會*, 1977.
[10] 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).
[11] 손경호, 이경우, 김진형, "자동조타로써 항행하는 선박에 작용하는 불규칙 외란 추정법에 관한 고찰", *한국항해학회지*, 제19권 2호, 1995.
[12] Davenport, A. G., "The Spectrum of Horizontal Gustiness Near the Ground in High Winds", Quarterly *Journal of Royal Meteorological Society*, Vol. 87, 1957
[13] 손경호, 이경우, "선박 자동조타 시스템의 성능평가지수에 관한 고찰", *대한조선학회지*, 제32권 4호, 1995.