

다방향파중에서의 선박 자동조타 시스템의 평가 기법에 관한 연구

이경우* · 손경호** · 윤순동*

A Study on the Estimation of Automatic Steering of Ships in Multi-directional Waves

Gyoung-Woo Lee · Kyoung-Ho Sohn** · Soon-Dong Yoon**

〈목 차〉	
Abstract	
1. 서 론	3.4 회두각속도 외란
2. 자동조타 시스템의 수학모델	4. 자동조타 시스템의 평가
3. 불규칙 외란의 추정	5. 수치 계산 및 고찰
3.1 불규칙 파도에 기인하는 외란 스펙트럼	5.1 공시선과 계산 조건
3.2 다방향파중의 외란 스펙트럼	5.2 외란 스펙트럼의 계산 결과
3.3 바람의 변동성분에 기인하는 외란 스펙트럼	5.3 자동조타 시스템의 평가 결과
	6. 결 론
	참고문헌

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. In order to estimate automatic steering system of ships in open seas, we need to know the characteristics of each component of the system and also to know the characteristics of disturbance to ship dynamics. Calculation methods of irregular disturbances are based on the linear superposition principle.

In this paper, For the purpose of evaluation of automatic steering of ships, the influences of linear control constants of autopilot on propulsive energy loss are investigated by a performance index is introduced from the viewpoint of energy saving. Numerical calculations are carried out for an ore carrier and for a fishing boat in muti-directional waves.

* 목포해양대학교 해양 및 조선공학부

** 한국해양대학교 조선해양공학부

1. 서론

선박의 조종성에 관한 연구 중, 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 초점이 되고 있다.

대양을 항해하는 거의 모든 선박은 오토파일럿을 이용하여 자동으로 침로를 유지하고 있고, 이러한 오토파일럿은 파워 유닛, 조타기, 선체운동 및 컴퍼스와 함께 폐루프(closed-loop) 제어 시스템을 이루고 있다. 이들 요소 중 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.

이러한 자동조타 시스템의 평가는 선박의 추진 에너지 손실량, 즉 연료 소비량으로써 평가되어진다. Nomoto[1]는, 대양에서 자동조타 항행시에는 끊임없는 선수동요를 피할 수 없고, 이로 인한 추진 에너지 손실은 평수중 직진 항행시 추진 에너지의 약 2~3%, 심지어는 20%까지 될 수 있으며, 특히 침로 불안정한 선박의 경우에는 추진 에너지 손실의 정도(程度)가 더욱 심각하다고 지적하였다. 본 연구에서는 선박 자동조타 시스템의 수학적 모델화를 실시하고, 다방향파중의 소형 어선과 대형 광석운반선의 오토파일럿 제어상수가 선박의 추진 에너지 손실량에 미치는 영향을 정량적으로 평가, 해석한다.

2. 자동조타 시스템의 수학적 모델

일반적으로 선박 자동조타 시스템은 Fig. 2.1과 같이 구성되어 있다. 그리고 각 요소의 동작 특성과 입출력 관계는 미분 방정식의 형태로 표시할 수

있다.

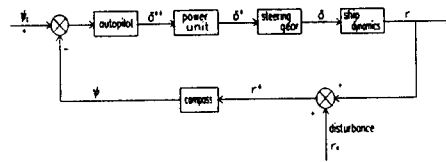


Fig. 2.1 Block diagram of automatic steering system

선박의 자동조타 시스템의 구성 요소 중의 하나인 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].

$$T_1 T_2 \ddot{r} + (T_1 + T_2) \dot{r} + r = K\delta + K T_3 \dot{\delta} \quad \dots (2.1)$$

여기서 r 은 회두각속도, δ 는 타각, T_1 , T_2 , T_3 , K 는 조종성 지수를 나타낸다.

컴퍼스(compass)에 대해서는 식(2.2)와 같이 나타낸다.

$$\psi = \int_0^t r^* dt, \quad \text{단, } r^* = r + r_d \quad \dots (2.2)$$

여기서 ψ 는 회두각, t 는 시간, r_d 는 풍·파랑에 의한 불규칙 외란(회두각속도로 환산한 값)을 나타낸다.

본 연구에서 오토파일럿은 비선형 요소인 천후조정기구(weather adjuster)의 영향을 무시하고, 선형 요소인 PD(비례·미분) 제어만을 고려하여 식(2.3)과 같이 나타낸다.

$$\delta^* = -K_P(\psi - \psi_I) + T_D \dot{\psi} \quad \dots (2.3)$$

여기서 ψ_I 는 목표 침로각, K_P 는 타각 정수(rudder gain) 즉, 비례제어 상수를 T_D 는 미분제어의 시정수를 나타낸다.

조타기(steering gear)는 식(2.4), (2.5)와 같이 표시된다[2].

$$T_E \dot{\delta} + \delta = \delta^* \quad (|\dot{\delta}| \leq |\dot{\delta}_{max}|) \quad \dots(2.4)$$

$$\dot{\delta} = \text{sign}(\delta^* - \delta) |\dot{\delta}_{max}| \quad (|\dot{\delta}| > |\dot{\delta}_{max}|) \quad (2.5)$$

여기서 T_E 는 조타기의 시정수, $|\dot{\delta}_{max}|$ 는 조타기의 최대 타각속도를 나타낸다. 식(2.4)는 전동 유압식 조타기의 가변 유량 펌프의 유량이 정격(定格) 이내인 경우이고, 식(2.5)은 펌프의 유량이 포화 상태인 경우이다. T_E 와 $|\dot{\delta}_{max}|$ 의 수치는 각국 선급협회 규정에 의해서 결정되어지며, 선박의 크기나 속력에 관계없이 일정하다.

3. 불규칙 외란의 추정

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

본 연구에서는 상기 외란을 회두각속도로 환산하여 자동조타 시스템에 작용하는 것으로 간주한다. 계산에 필요한 좌표계를 Fig. 3.1과 같이 정의한다. Fig. 3.1에서 $\bar{O}-X_0Y_0$ 는 공간고정좌표계, $G-xy$ 는 선체고정좌표계이다. 선박의 조종운동은 $G-xy$ 좌표계에서 정의되며, 운동의 주요 파라메타로서 선박의 회두각속도를 r , 사향각을 β , 타각을 δ 라 한다. 그리고 선체와 파도의 만남각을 χ , 선체와 바람의 만남각(진풍향)을 γ_T 라 한다.

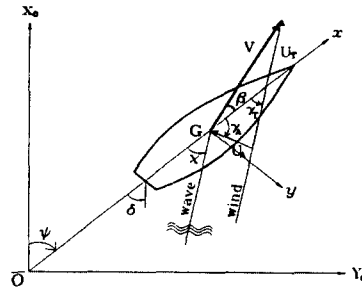
3.1 불규칙 파도에 기인하는 외란 스펙트럼

파도가 선체에 유기하는 회두각속도 스펙트럼은 파도의 스펙트럼과 규칙파에 대한 선수동요 응답함수로부터 계산할 수 있다[3]. 한편, 선수동요 응답함수는 스트립 이론(NSM)을 이용하여 계산한다[4].

파도의 스펙트럼은 ISSC 스펙트럼[5]을 이용하고, 다시 파도의 스펙트럼을 만남파 스펙트럼으로 변환하여 불규칙 파도에 기인하는 외란 스펙트럼

을 계산한다[3]. 이때 성분파는 파도의 입사각(χ)이 0° 일 때 선미파, 180° 일 때를 선수파로 정의한다.

추파 영역에서 운동하는 선박의 응답 스펙트럼 계산은 주파수 범위에 따른 만남주파수의 변환을 이용하여 계산한다[6].



- 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

3.2 다방향파중의 외란 스펙트럼

불규칙 파랑중 선박의 응답특성 계산에는 실제 해상의 파랑에 대한 정확한 정보가 필수적으로 요구된다. 최근까지 실제 해상을 단방향파(long crested wave)로 가정하여 선박의 운동 특성을 해석해 왔다. 그러나, Longuet-Higgins가 다방향파 측정기법에 대한 연구를 시작한 이래, 실제 해상 상태는 다방향의 파랑 성분이 중첩된 다방향파(multi-directional waves, short crested wave)임이 확인되었고[7], 이들 두가지 해석 방법을 이용한 선박의 응답특성은 상당한 오차를 포함하고 있는 것으로 알려져 있다.

그러므로 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(3.1)과 같이 표현할 수 있다[8].

$$S_w(\omega, \mu) = \left(\frac{2}{\pi}\right) S_w(\omega) \cos^2 \mu \dots\dots\dots (3.1)$$

여기서 $S_w(\omega, \mu)$ 는 다방향파 스펙트럼, μ 는 파도의 퍼짐각(wave spreading angle)이다.

따라서 선박이 다방향파중을 항행할 때, 파도가 선체에 유기하는 불규칙 회두 각속도 스펙트럼은 식(3.2)와 같이 나타낼 수가 있다.

$$S_{rw}(\omega, \chi) = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \omega^2 \cdot S_w(\omega, \mu) \cdot \left[\frac{\psi_a}{\xi_a}(\omega, \chi - \mu) \right]^2 d\mu \dots\dots\dots (3.2)$$

여기서, $S_{rw}(\omega, \chi)$ 는 다방향파중의 선체의 회두 각속도 스펙트럼, $S_w(\omega, \chi)$ 는 다방향파의 스펙트럼이다.

3.3 바람의 변동성분에 기인하는 외란 스펙트럼

바람이 선체에 유기하는 회두각속도 스펙트럼은 타각으로 환산한 변동풍의 외란 스펙트럼과 선박의 전달 함수(주파수 응답함수의 형태로 표현)를 이용하여 식(3.3)과 같이 계산할 수 있다[9].

$$S_{rw}(\omega) = S_\delta(\omega) \cdot |G(j\omega)|^2 \dots\dots\dots (3.3)$$

여기서 $S_{rw}(\omega)$ 는 바람의 변동 성분에 기인하는 선체의 회두각속도 스펙트럼, $S_\delta(\omega)$ 는 타각으로 환산한 변동풍 외란 스펙트럼으로 Davenport 스펙트럼[10]을 이용한다. $G(j\omega)$ 는 선박의 전달 함수(타각에 대한 회두각속도의 전달함수)이다. 구체적인 계산은 문헌[3]에 따른다.

3.4 회두각속도 외란

회두각속도로 환산한 외란 스펙트럼이 구해지면 회두각속도 외란의 시계열은 식(3.4)와 같다.

$$r_d(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \sqrt{2S_r(\omega_i) \delta\omega} \cdot \sin(\omega_i t + \varepsilon_i) \dots\dots (3.4)$$

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

4. 자동조타 시스템의 평가

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 표시된다[11].

$$J = \frac{1}{2} \overline{\psi^2} + \frac{a_{rr}}{a_{vv}} \overline{r^2} + \frac{a_{\delta\delta}}{a_{vv}} \overline{\delta^2} \dots\dots\dots (4.1)$$

여기서 $\overline{\psi^2}$, $\overline{r^2}$, $\overline{\delta^2}$ 는 각각 ψ , r , δ 의 제곱평균치이다. a_{rr} , a_{vv} , $a_{\delta\delta}$ 의 값은 선박의 유체력 계수로부터 구할 수 있다[11].

식(2.1), (2.2), (2.3), (2.4), (2.5)로 표시되는 자동조타 시스템의 제어계를 Laplace 연산자(s)를 사용해서 전달함수의 형태로 나타내면 Fig. 4.1과 같다.

자동조타 시스템의 성능평가지수 J 를 수치계산하는 방법은 다음과 같다. 그 첫번째 방법은, 식(2.1), (2.2), (2.3), (2.4), (2.5)를 시뮬레이션 기법을 이용하여 직접 ψ , r , δ 의 시계열을 구하여 이들의 제곱평균치를 구하는 것이다. 이때에는 외란의 시계열을 미리 알고 있어야 한다. 시뮬레이션 기법을 이용하면 시스템의 각 요소가 비선형항을 포함

하고 있어도 계산이 가능하다. 시뮬레이션 기법에 의해서 성능평가지수를 계산할 때 $\overline{\psi^2}$, $\overline{r^2}$, $\overline{\delta^2}$ 는 식(4.2)와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \overline{\psi^2} &= \frac{1}{T_H} \int_0^{T_H} \psi^2 dt \\ \overline{r^2} &= \frac{1}{T_H} \int_0^{T_H} \left(\frac{L}{V}\right)^2 r^2 dt \dots\dots\dots(4.2) \\ \overline{\delta^2} &= \frac{1}{T_H} \int_0^{T_H} \delta^2 dt \end{aligned}$$

여기서 T_H 는 측정 시간을 의미하며, 본 연구에서는 T_H 를 1시간으로 취하였다. 두번째 방법은 Fig. 4.1과 같이 시스템의 각 요소의 전달함수를 이용하여 주파수 응답법에 의해 ψ , r , δ 의 스펙트럼을 구하고 각각의 스펙트럼의 면적을 전 주파수 영역에서 적분하여 제곱평균치를 구하는 것이다 [9]. 이때에는 외란의 스펙트럼을 미리 알고 있어야 한다. 주파수 응답법은 시스템의 각 요소가 비선형 항을 포함하고 있으면 계산이 불가능하다. 주파수 응답법에 의해서 성능평가지수를 계산할 때 $\overline{\psi^2}$, $\overline{r^2}$, $\overline{\delta^2}$ 는 식(4.3)과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \overline{\psi^2} &= \int_0^\infty S_\psi(\omega) d\omega \\ \overline{r^2} &= \left(\frac{L}{V}\right)^2 \int_0^\infty S_r(\omega) d\omega \dots\dots\dots(4.3) \\ \overline{\delta^2} &= \int_0^\infty S_\delta(\omega) d\omega \end{aligned}$$

여기서 $S_\psi(\omega)$, $S_r(\omega)$, $S_\delta(\omega)$ 는 각각 회두각, 회두각속도, 타각의 스펙트럼을 의미하며, 이들은 주파수 응답법에 의해 식(4.4)와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} S_\psi(\omega) &= |G_\psi(j\omega)|^2 S_{rd}(\omega) \\ S_\delta(\omega) &= \left| \frac{-K_F(1+T_Dj\omega)}{(1+T_Ej\omega)} \right|^2 S_\psi(\omega) \quad (4.4) \\ S_r(\omega) &= \left| \frac{K(1+T_3j\omega)}{(1+T_1j\omega)(1+T_2j\omega)} \right|^2 S_\delta(\omega) \end{aligned}$$

여기서 $j = \sqrt{-1}$, ω 는 원주파수, $S_{rd}(\omega)$ 는 외란 스펙트럼이다. 그리고 $G_\psi(j\omega)$ 는 외란 $r_d(s)$ 에 대한 회두각 $\psi(s)$ 의 전달함수 $G_\psi(s)$ 에 s 대신 $j\omega$ 를 대입한 것이다. $G_\psi(s)$ 는 Fig. 4.1로부터 식(4.5)와 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} G_\psi(s) &= \{ (1+T_Es)(1+T_1s)(1+T_2s) \} \\ &/ \{ s(1+T_Es)(1+T_1s)(1+T_2s) \dots\dots\dots(4.5) \\ &+ K_F K(1+T_Ds)(1+T_3s) \} \end{aligned}$$

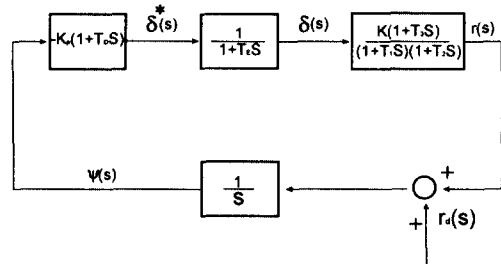


Fig. 4.1 Transfer functions of automatic steering system

5. 수치계산 및 고찰

5.1 공시선과 계산 조건

본 연구의 수치계산에 이용한 선박은 소형 어선 1척과 대형 광석운반선 1척이다. 이들의 주요목을 <Table 5.1>에, 그리고 양 선박의 유체력 계수, 조종성 지수 및 조타기와 파워 유닛 특성 상수를 <Table 5.2>에 나타낸다.

외란의 계산 조건으로서는, 가장 대표적인 해상 상태인 평균 풍속 ($\overline{U_T}$) 10 m/sec, 파주기 5.74 초, 유의파고 2.2 m이다. 그리고 진풍향(γ_T)과 파도의 진행방향(χ)은 동일한 것으로 가정하였고, 바람과 파도는 $\chi = \gamma_T = 135^\circ$ 방향과 $\chi = \gamma_T = 45^\circ$ 방향이다. 그리고 광석운반선과 어선의 항행속도는 각각 Froude 수 0.15, 0.25이다.

<Table 5.1> Principal particulars of ships

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
$ \delta_{max} $	3.0 deg/sec	3.0 deg/sec
$2\delta_s$	1 deg	1 deg
δ^*	2 deg/sec	2 deg/sec

5.2 외란 스펙트럼의 계산 결과

상기 두 공시 선박에 대해서 외란 스펙트럼을 수치 계산한 결과는 다음과 같다. 다방향파에 대한 선수동요 응답함수의 계산 결과는 Fig. 5.3, 5.4와 같다. Fig. 5.5, 5.6은 외란 스펙트럼 계산에 사용한 ISSC 파도 스펙트럼과 Davenport 변동풍 스펙트

럼을 나타낸다.

식(3.1)의 방향 분포함수(directional spreading function)를 적용하여 다방향파의 스펙트럼을 추정하고, Fig. 5.7에 생성된 다방향파 스펙트럼을 표시한다. Fig. 5.7에서 주방향(dominant direction)을 0° 로 표시하고 다방향 스펙트럼의 퍼짐각(spreading angle)은 22.5° 이다. 그리고 방향파의 갯수는 7개로 한다. 다방향파중에 파도가 선체에 유기하는 불규칙 회두 각속도 스펙트럼 계산 결과와 단방향파중의 계산 결과를 Figs. 5.8 ~5.11에 동시에 나타낸다. 또한, 바람의 변동 성분에 기인하는 외란 스펙트럼 계산 결과를 Figs. 5.12 ~5.15에 나타낸다.

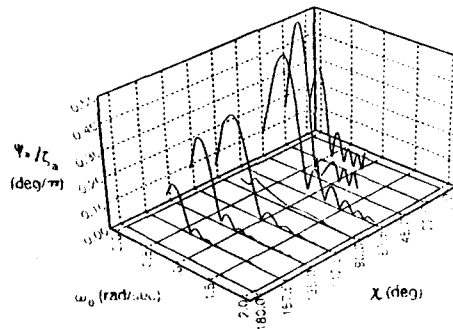


Fig. 5.3 Response amplitude operator of yaw in directional waves(ore carrier)

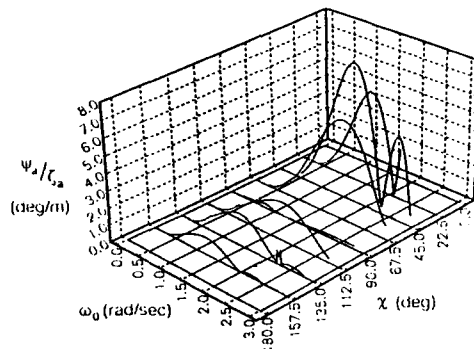


Fig. 5.4 Response amplitude operator of yaw in directional waves(fishing boat)

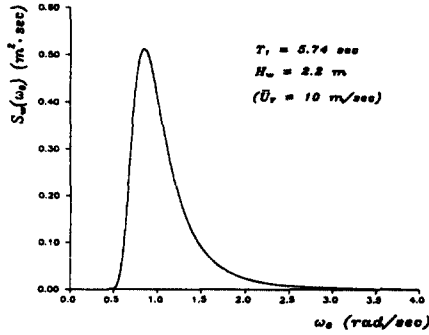


Fig. 5.5 ISSC wave spectrum

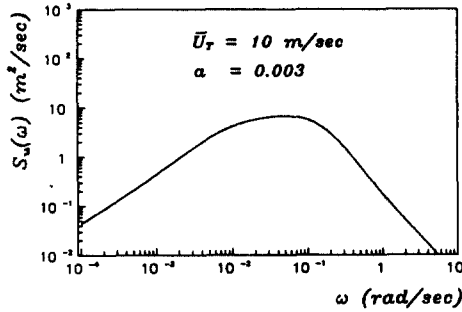


Fig. 5.6 Davenport wind spectrum

Fig. 5.8, 5.9에서 광석운반선의 경우 $\chi = 135^\circ$ 일 때, 다방향파에서의 불규칙 회두각속도 스펙트럼 계산 결과가 단방향파에서의 계산 결과보다 크게 나타났고, $\chi = 45^\circ$ 의 경우 다방향파에서의 계산 결과가 단방향파에서의 계산 결과보다 스펙트럼 밀도함수의 최고치는 약간 낮게 계산되었다. 한편, 어선의 경우, Fig. 5.10, 5.11에서와 같이 공통적으로 단방향파에서의 해석 결과가 다방향파에서의 결과보다 과대 평가됨을 알 수 있다.

Fig. 5.8, 5.9에서 광석운반선의 경우, 스펙트럼 밀도함수의 형태 뿐만 아니라 운동 주파수 영역도 많은 차이를 보이는데, 이러한 원인은 Fig. 5.3에 나타난 광석운반선의 성분과 회두각속도 응답에 의해서 나타낸다. Fig. 5.8, 5.9에서 볼 수 있듯이, 두가지 해석 방법에는 상당한 오차를 보이고 있다.

그러므로 보다 정확한 불규칙 외란 스펙트럼의 계산을 위해서는 실제 해상에 가까운 다방향 스펙트럼의 적용이 타당하다고 생각한다.

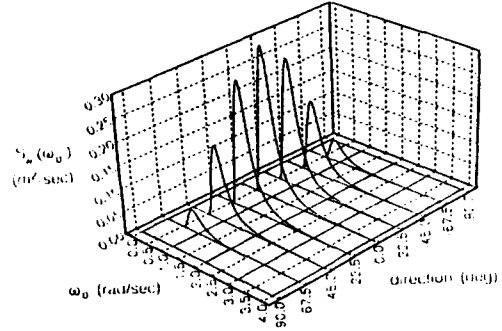


Fig. 5.7 Directional wave spectrum

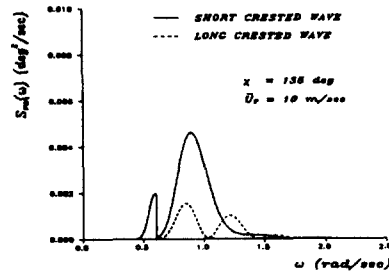


Fig. 5.8 Comparison of disturbance spectrum due to wave(ore carrier, $\chi = 135$ deg)

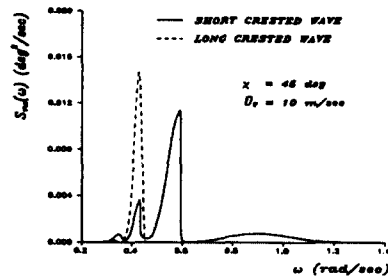


Fig. 5.9 Comparison of disturbance spectrum due to wave(ore carrier, $\chi = 45$ deg)

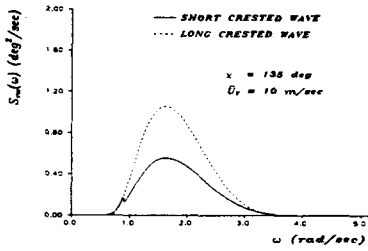


Fig. 5.10 Comparison of disturbance spectrum due to wave(fishing boat, $\chi=135$ deg)

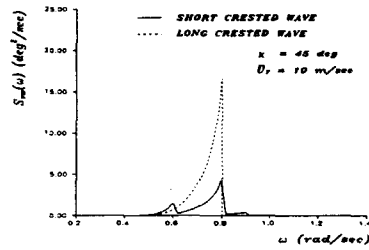


Fig. 5.11 Comparison of disturbance spectrum due to wave(fishing boat, $\chi=45$ deg)

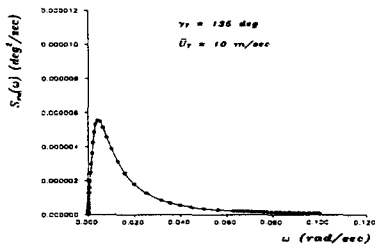


Fig. 5.12 Disturbance spectrum due to wind (ore carrier, $\chi = 135$ deg)

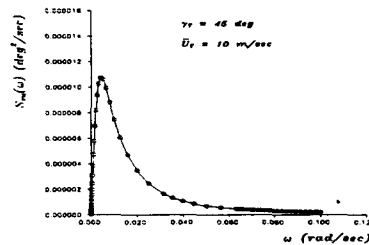


Fig. 5.13 Disturbance spectrum due to wind (ore carrier, $\chi = 45$ deg)

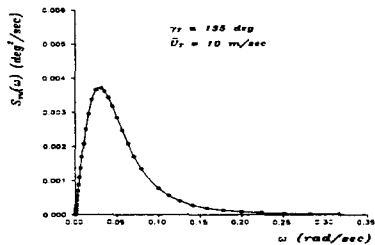


Fig. 5.14 Disturbance spectrum due to wind (fishing boat, $\chi = 135$ deg)

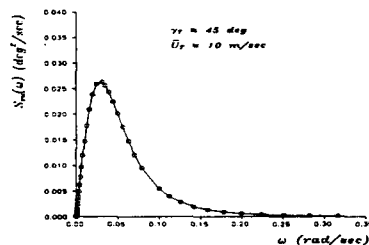


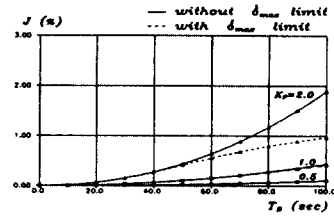
Fig. 5.15 Disturbance spectrum due to wind (fishing boat, $\chi = 45$ deg)

5.3 자동조타 시스템의 평가

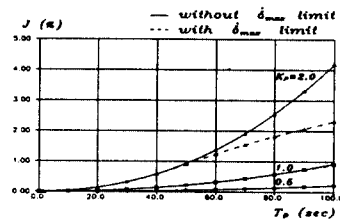
5.2절의 외란 특성을 이용하여 공시선박의 성능 평가지수를 수치 계산한 결과를 Figs. 5.16~5.21에 보인다. Figs. 5.16~5.21에 의하면 주파수 응답법에 의한 계산 결과와, 동일한 조건하에서의 시뮬레이션 기법에 의한 계산 결과가 잘 일치하고 있음을

알 수 있다. 그리고 양 선박에 공통된 사항으로서 T_D 를 증가시키면 J 의 값이 커진다. 이러한 경향은 동일한 해상 조건에서 상대적으로 외란이 크게 작용하는 소형 어선의 경우 더욱 심하다. 그리고 J 에 미치는 K_P 의 영향은 특히 T_D 값이

큰 영역에서의 과대한 K_p 는 J 를 커지게 한다는 것을 알 수 있다. 한편, 시뮬레이션 기법에 의한 J 의 계산 결과중 조타기의 최대 타각속도 δ_{max} 의 영향을 나타낸 것이 Fig. 5.17과 Fig. 5.20이다. 광석운반선의 경우에는 δ_{max} 의 유무에 따라 J 의 계산 결과에 유의한 차이를 보이지 않지만, 소형어선의 경우에는 상당한 차이를 보이고 있다. 소형어선의 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.

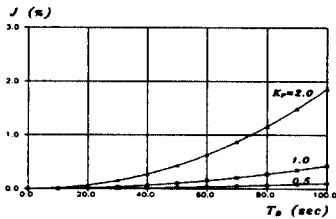


(a) $\chi = 135^\circ$

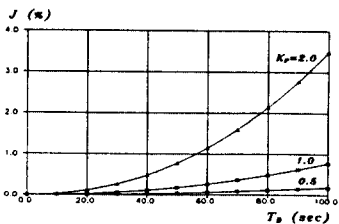


(b) $\chi = 45^\circ$

Fig. 5.17 Performance index curves in directional waves(ore carrier, digital simulation)

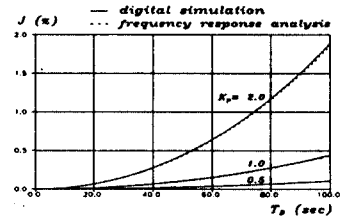


(a) $\chi = 135^\circ$

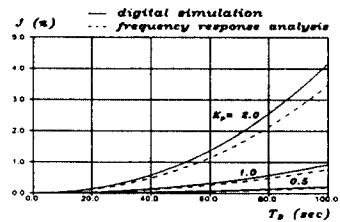


(b) $\chi = 45^\circ$

Fig. 5.16 Performance index curves in directional waves(ore carrier, frequency response analysis)

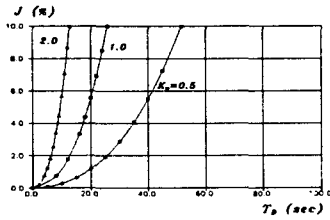


(a) $\chi = 135^\circ$

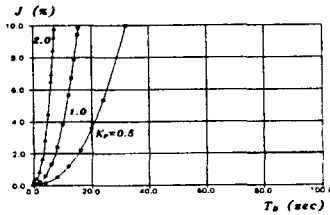


(b) $\chi = 45^\circ$

Fig. 5.18 Performance index curves in directional waves(ore carrier)

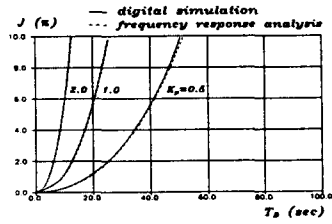


(a) $\chi = 135^\circ$

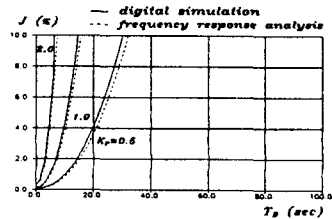


(b) $\chi = 45^\circ$

Fig. 5.19 Performance index curves in directional waves (fishing boat, frequency response analysis)



(a) $\chi = 135^\circ$



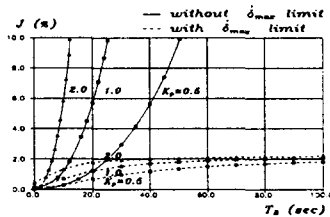
(b) $\chi = 45^\circ$

Fig. 5.21 Performance index curves in directional waves (fishing boat)

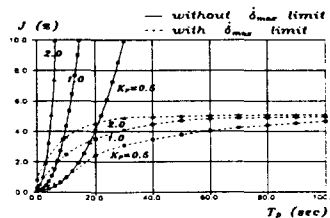
6. 결론

본 연구에서는 다방향파중을 자동조타로써 항행 중인 선박의 운항 경제성 관점에서의 추진 에너지 손실을 정량적으로 평가하는 방법을 논하였다. 이상의 연구를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 임의의 해역에서 파도를 단방향파로 가정하여 도출한 불규칙 응답 스펙트럼 계산 결과와 다방향파에 의한 해석이 상당한 차이를 보이는 것을 알 수 있었다. 그러므로 보다 정확한 선체 응답 특성을 구하기 위해서는 다방향파에 의한 해석이 필요하다.
- (2) 성능평가지수의 계산법에는 주파수 응답법과 시뮬레이션 기법이 적용될 수 있으며, 동일한 외란 조건과 동일한 제어상수하에서는 양 방법의 적용결과는 동일함을 밝혔다.



(a) $\chi = 135^\circ$



(b) $\chi = 45^\circ$

Fig. 5.20 Performance index curves in directional waves (fishing boat, digital simulation)

- (3) 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.
- (4) 침로안정한 선박의 경우, 오토파일럿의 미분 제어 시정수 T_D 는 전반적으로 추진 에너지 손실량을 줄이는 효과가 있다.

따라서 개개의 선박의 최적 자동조타를 위한 오토파일럿의 제어 상수는, 본 논문에서 제시한 평가법에 의해 다각적으로 검토되어야 하며, 선박의 종류, 해상 상태에 따라서 오토파일럿의 운항 지침이 달라질 수 있으므로 주의를 요한다.

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] 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).
- [3] 손경호, 이경우, 김진형, "자동조타로써 항행하는 선박에 작용하는 불규칙 외란 추정법에 관한 고찰", 한국항해학회지, 제 19권, 제 2호, 1995.
- [4] 손경호, 이경우, 김진형, "규칙파에 대한 조종운동의 응답함수에 관한 고찰", 한국항해학회지, 제 18권 4호, 1994.
- [5] 元良誠三, "船舶と海洋構造物の運動學", 成山堂書店, 1982.
- [6] 이경우, 손경호, "추사파중에서 자동조타로써 항행하는 선박의 추진 에너지손실량 평가에 관한 연구", 1996년 한국항해학회 춘계학술발표회 논문집, 1996.
- [7] 日根野元裕, 山内保文, "海洋波のスペクトル", 海洋工學特輯-海洋構造物と海象-, 日本造船學會誌, 第609號, 1980.
- [8] Takezawa, S. et al., "耐航性に関する實船計算と實驗-實船試驗結果と豫測値の對應-", 第2會耐航性に関するシンポジウム, 日本造船學會, 1977.
- [9] 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).
- [10] Davenport, A. G., "The Spectrum of Horizontal Gustiness Near the Ground in High Winds", Quarterly Journal of Royal Meteorological Society, Vol. 87, 1957
- [11] 손경호, 이경우, "선박 자동조타 시스템의 성능평가지수에 관한 고찰", 대한조선학회논문집, 제 32권 4호, 1995.