

자동조타 시스템의 비선형 요소가 선박의 추진 에너지 손실량에 미치는 영향

이경우*, 손경호**, 윤순동*

The Influence of Nonlinear Elements on Propulsive Energy Loss Related to Automatic Steering of Ships

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

〈 목 차 〉

Abstract

1. 서 언

2. 자동조타 시스템의 수학 모델

3. 불규칙 외란의 추정

4. 자동조타 시스템의 평가

5. 수치계산 및 고찰

6. 결 언

참고문헌

요 약

본 연구에서는 선박 자동조타 시스템의 비선형 요소가 추진 에너지 손실량에 미치는 영향을 정량적으로 평가, 해석하였다. 대양을 자동조타로써 보침 항행중인 선박의 자동조타 시스템은 크게 선형 및 비선형 요소로 나눌 수 있는데, 각 요소들중, 특히 시스템 내부에 인위적으로 또는 불가피하게 설치되어 있는 비선형 요소들의 영향은 매우 크다. 본 연구에서는 오토파일럿의 비선형 제어 상수가 전체 시스템의 안정성 또는 추진 에너지 손실의 증감에 미치는 영향을 조사하였다.

본 연구의 수치계산에 이용한 선박은 소형 어선 1척과 대형 광석운반선 1척이며, 평균 풍속 10 m/sec의 대표적 해상상태의 풍·파랑 외란 조건하에서 추진 에너지 손실의 지표인 성능평가지수를 계산하였다. 그리고 수치계산 결과에 대해서도 논하였다.

Abstract

When an automatic course keeping is introduced, as is quite popular in modern navigation, the closed-loop control system consists of linear and non-linear elements.

In this paper, we provide a method of theoretical analysis on the propulsive energy loss

* 정회원, 목포해양대학교 해양 및 조선공학부

** 정회원, 한국해양대학교 조선해양공학부

related to automatic steering of ships in the open seas, taking account of the on-off (non-linear) characteristics of autopilot device. Next we make numerical calculation of the effects of autopilot non-linear elements on the propulsive energy loss for two kinds of ship, a fishing boat and an ore carrier. Realistic sea and wind disturbances are employed in the calculation.

1. 서 언

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

대양에서 항행하는 거의 모든 선박은 오토파일럿을 이용하여 자동으로 선박의 침로를 유지하고 있다. 오토파일럿은 당해 선박의 현재의 침로를 감지하여 목표 침로와의 편차가 최소화 되도록 조타 명령을 하는 제어 장치이다.

Nomoto[1]는, 대양에서 자동조타 항행 시에는 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.

자동조타 시스템에서 오토파일럿의 제어 상수는, 선박의 추진 에너지 손실량에 미치는 영향을 평가하여 결정되어야 하며, 이때 가장 중요한 사항은 임의의 해상 상태에서의 불규칙 외란 특성과 자동조타 시스템 내부의 비선형 요소라 생각된다.

본 연구에서는 선형 및 비선형 요소를 포함하는 자동조타 시스템의 구성과 동작 특성 및 이들의 수학 모델화를 다루었으며, 오토파일럿의 비선형 제어 상수가 추진 에너지 손실에 미치는 영향을 정량적으로 평가, 해석하는 방법을 논하였다. 그리고 특정 해상 상태에서의 불규칙 외란하에서 소형 어선과 대형 광석운반선에 대해 수치계산 하였으며 그 결과에 대해서 고찰하였다.

2. 자동조타 시스템의 수학 모델

일반적으로 선박 자동조타 시스템은 Fig. 2.1과 같이 폐루프 시스템으로 구성되어 있다. 그리고 각 요소의 동작 특성과 입출력 관계는 다음과 같다.

조타기의 작동에 의한 선체운동 r 과 불규칙 외란에 의한 선체운동 r_d 가 합성되어, 컴퍼스를 경유하여 회두각 ϕ 가 되고 목표 침로각인 ϕ_l 와의 편차가 최소화 되도록 오토파일럿에 피드백한다. 오토파일럿은 현재 침로 ϕ 와 목표침로 ϕ_l 의 편차가 최소화되도록 파워유닛에 조타명령(명령타각)을 입력하게 되고, 파워유닛은 전기신호인 δ^{**} 를 기계적인 변위인 δ^* 로 변환하여 조타기를 움직이게 된다. 이러한 자동조타 시스템을 라플라스 연자자로 표시하여 각 구성요소의 동작 특성과 입출력 관계를 나

타내면 Fig. 2.2와 같다.

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

2.1 선체 운동

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].

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

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

2.2 컴퍼스

컴퍼스(compass)에 대해서는 식(2.2)와 같이 나타낸다.

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

여기서 ψ 는 회두각, t 는 시간, r_d 는 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[2]. 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[3]. 본 연구에서는 선형 요소로서는 PD 제어와 필터 특성을, 비선형 요소인 천후조정기구로서는 dead band를 생각하기로 한다[4]. 이를 수학 모델화하면 식(2.3), (2.4)와 같다.

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

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

여기서 $\dot{\delta}$ 는 천후조정기구에의 입력, δ^{**} 는 오토파일럿의 출력 즉, 명령 타각, ψ_I 는 목표 침로각, b 는 dead band의 폭을 나타낸다(Fig. 2.2 참조). 그리고 K_P 는 타각 정수(rudder gain) 즉, 비례제어 상수를, T_{cr} 은 필터의 시정수(time constant)를, T_D 는 미분제어의 시정수를 나타낸다. 본 연구에서는 T_D 를 T_{cr} 의 함수로써 식(2.5)와 같이 표시한다.

$$T_D = K_{cr} T_{cr} \quad (2.5)$$

여기서 K_{cr} 은 미분제어의 타각 정수를 나타낸다.

2.4 파워유닛

파워 유닛은 오토파일럿(또는 수동 조타인 경우에는 조타륜)으로부터 전달되는 명령 타각 δ^{**} 에 해당하는 전기 신호를 기계적 변위로 변환하여 조타기의 가변 유량 펌프를 움직이기 위한 유압장치이다[5]. 파워 유닛의 작동원리를 Fig. 2.3에 보인다[5]. 또한, 파워 유닛의 동작 특성을 나타내는 블록 다이어그램은 Fig. 2.2에 보이고 있다. 파워유닛의 동작 특성을 고려하여 임의의 시각 t 에서 δ^* 에 대한 δ^{**} 의 응답을 식(2.6)과 같이 수학 모델화한다.

$$\begin{aligned} \delta^* &= \delta_0^* \\ (|\delta^{**} - \delta^*| \leq 2\delta_b) & \\ \delta^* &= \delta_0^* + \text{sign}(\delta^{**} - \delta^*) \int_0^t \dot{\delta}^* dt \\ (|\delta^{**} - \delta^*| > 2\delta_b) & \end{aligned} \quad (2.6)$$

여기서 δ^{**} 는 명령 타각 상당의 전기신호, δ^* 는 명령 타각 상당의 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[6].

$$\begin{aligned} T_E \dot{\delta} + \delta &= \delta^* \\ (|\dot{\delta}| \leq |\dot{\delta}_{\max}|) & \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} \dot{\delta} &= \text{sign}(\delta^* - \delta) |\dot{\delta}_{\max}| \\ (|\dot{\delta}| > |\dot{\delta}_{\max}|) & \end{aligned} \quad (2.8)$$

여기서 T_E 는 조타기의 시정수, $|\dot{\delta}_{\max}|$ 는 조타기의 최대 조타 각속도를 나타낸다. 식(2.7)은 전동 유압식 조타기의 가변 유량 펌프의 유량이 정격(定格) 이내인 경우이고, 식(2.8)은 펌프의 유량이 포화 상태인 경우이다. T_E 와 $|\dot{\delta}_{\max}|$ 의 수치는 각국 선급협회 규정을 만족하도록 결정되어지며, 선박의 크기나 속력에 관계없이 일정한 값을 취하는 경향이 있다. 이러한 조타기의 최대 조타 각속도는 자동조타 시스템의 비선형 요소중의 하나이다.

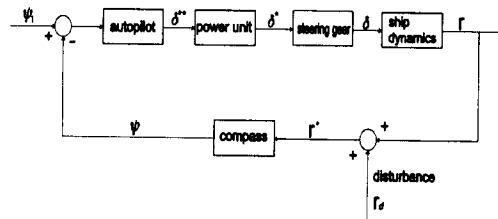


Fig. 2.1 Block diagram of automatic steering system

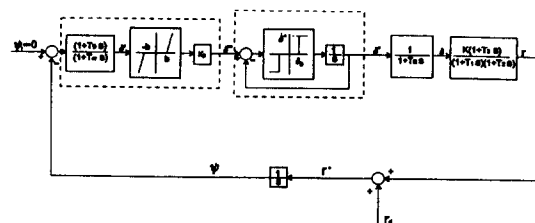


Fig. 2.2 Transfer functions of automatic steering system

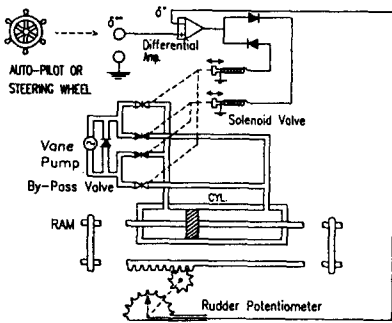


Fig. 2.3 Power unit

3. 불규칙 외란의 추정

본 연구에서는 자동조타 항행시에 선체에 작용하는 외란으로서, 불규칙 파도에 기인하는 외란과 바람의 변동풍에 기인하는 외란을 고려하고, 이들 외란을 선형중첩(linear superposition) 이론을 사용, 스펙트럼으로 계산, 외란의 시계열로 환산하여 시스템에 적용시킨다.

파도가 선체에 유기하는 회두각속도 스펙트럼은 파도의 스펙트럼과 규칙파에 대한 선수동요 응답함수로부터 계산할 수 있다[7]. 한편, 선수동요 응답함수는 스트립이론(NSM)을 이용하여 계산한다[8].

파도의 스펙트럼은 ISSC 스펙트럼[9]을 이용하고, 다시 파도의 스펙트럼을 만남파 스펙트럼으로 변환하여 불규칙 파도에 기인하는 외란 스펙트럼을 계산한다[7]. 또한, 파도의 스펙트럼은 실제 해상 상태와 가까운 다방향의 파랑 성분이 중첩된 다방향파(multi-directional waves, short crested wave)중에 항행하는 선박의 회두각속도 외란 스펙트럼을 구하기 위하여 다방향파 스펙트럼을 적용한다[10]. 추사파 영역에서

운동하는 선박의 응답 스펙트럼 계산은 주파수 범위에 따른 만남주파수의 변환을 이용하여 계산한다[11].

바람이 선체에 유기하는 회두각속도 스펙트럼은 타각으로 환산한 변동풍의 외란 스펙트럼과 선박의 전달 함수를 이용하여 같이 계산한다[12]. 이때 변동풍 외란 스펙트럼으로 Davenport 스펙트럼[13]을 이용한다. 선박의 전달 함수(타각에 대한 회두각속도의 전달함수)의 구체적인 계산은 문헌[7]에 따른다.

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(2.9)와 같이 표시된다[14].

$$J = \frac{1}{2} \overline{\psi^2} + \frac{a_{rr}}{a_{vv}} \overline{r'^2} + \frac{a_{\delta\delta}}{a_{vv}} \overline{\delta^2} \quad (2.9)$$

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[14].

5. 수치계산 및 고찰

5.1 공시선과 계산 조건

본 연구의 수치계산에 이용한 선박은 소형 어선 1척과 대형 광석운반선 1척이다. 이들의 주요목을 Table 5.1에, 그리고 양 선박의 유체력 계수, 조종성 지수 및 조타기와 파워 유닛 특성 상수를 Table 5.2에 나타낸다. 양 선박의 유체력 계수와 조종성 지수의 추정법에 관해서는 문헌[6]에 상세히 설명되어 있다. 그리고 조타기와 파워 유닛 특성상수는 일반적으로 실선에서 채택되고 있는 수치를 이용하였다[5].

외란의 계산 조건으로서는, 가장 대표적인 해상 상태인 평균 풍속 (\bar{U}_T) 10 m/sec, 파주기 5.74 sec, 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.

5.2 자동조타 시스템의 평가

불규칙 외란 특성을 이용하여 공시선의 성능평가지수를 수치계산한 결과를 Figs. 5.1~5.8에 나타낸다. 성능평가지수 J 의 값이 클수록 자동조타 항행시 추진 에너지 손실이 증대됨을 의미한다. 그리고 Figs. 5.1~5.8에서 해당되는 마크안에 까맣게 칠한 것은 시스템이 불안정하게 되는 한계 점을 나타낸다.

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
$2\delta_b$	1deg	1deg
δ^*	2deg/sec	2deg/sec

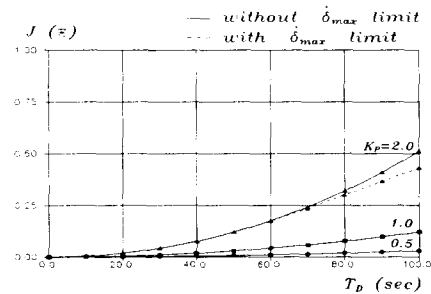
Figs. 5.1~5.4는 최대 조타 각속도 $\dot{\delta}_{max}$ 의 영향을 나타낸 것이다. 광석운반선의 경우에는 $\dot{\delta}_{max}$ 의 유무에 따라 J 의 계산 결과에 큰 차이를 보이지 않지만, 소형 어선의 경우에는 상당한 차이를 보이고 있다. 소형 어선의 경우에는 큰 외란의 작용하에서 조타기의 1차 지연요소에 의해 시스템이 불안정하게 되는데, 비선형 요소인 타각 속도 제한을 가함으로써 시스템이 안정화됨을 나타낸다.

특히, Fig. 5.2, 5.4는 다방향파중의 외란 특성을 이용한 계산으로, 단방향파 해석에 의한 결과와 비교해서 정량적인 값의 차이는 보이지만, 대체로 비슷한 경향을 보인다.

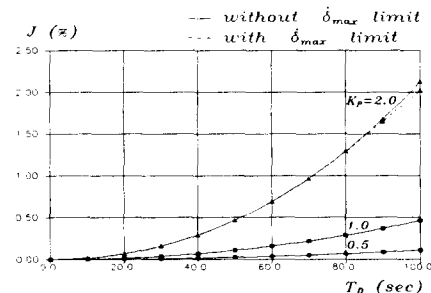
Figs. 5.5~5.8은 K_p 와 T_{cr} 을 일정하게 유지하였을 때 천후조정기구의 dead band 폭 b 의 영향을 조사한 결과이다. Fig. 5.5에서 어선의 경우에는 b 가 작아지면 큰 값의 T_D 영역에서 시스템이 불안정해지며, $b = 2$ 도일 때가 시스템이 안정하고 추진 에너지 손실도 작다는 것을 알 수 있다. Fig. 5.7은 광석운반선의 계산 결과로서 시스템은 전반적으로 안정하며, $b = 0$ 도일 때가 추진 에너지 손실이 가장 작다는 것을 나타내고 있다. 따라서 동일한 해상 조건하에서 소형선의 경우는 대형선보다 외란이 상대적으로 크게 작용하고 있으므로 b 를 높혀 주어야 한다는 것을 시사하고 있다.

Fig. 5.6, 5.8은 다방향파중의 외란 특성을 이용한 계산결과로, 단방향파 해석 결과와 거의 동일한 경향을 보이고 있지만, 외란 특성의 변화에 의해서 시스템의 불안정한 한계를 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 검토되어야 하며, 선박의 종류, 해상 상태에 따라서 오토파일럿의 운항 지침이 달라질 수 있다.

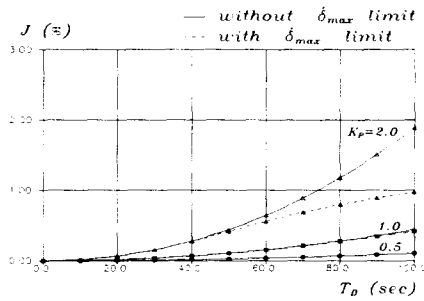


(a) $\chi = 135^\circ$

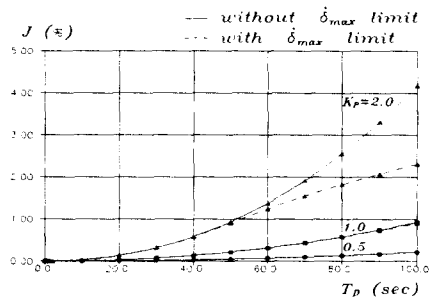


(b) $\chi = 45^\circ$

Fig. 5.1 Performance index curves(ore carrier)

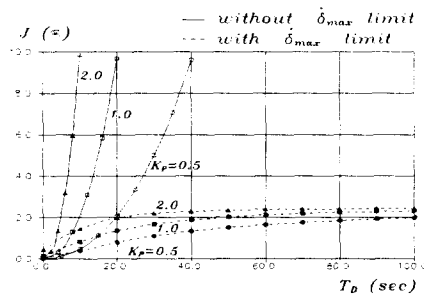


(a) $\chi = 135^\circ$

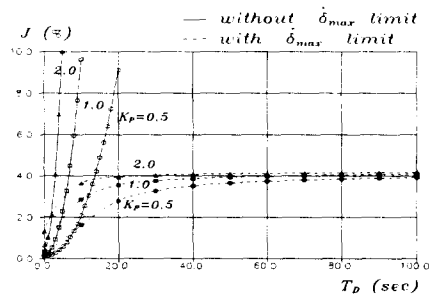


(b) $\chi = 45^\circ$

Fig. 5.2 Performance index curves in directional waves(ore carrier)

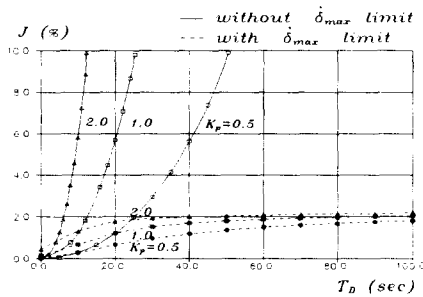


(a) $\chi = 135^\circ$

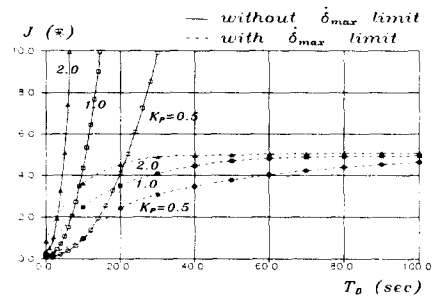


(b) $\chi = 45^\circ$

Fig. 5.3 Performance index curves(fishing boat)

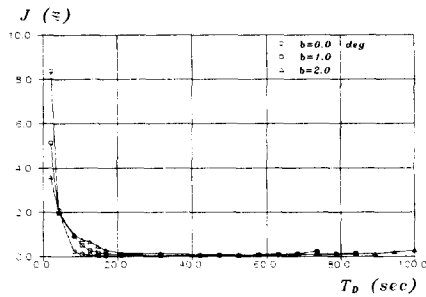


(a) $\chi = 135^\circ$

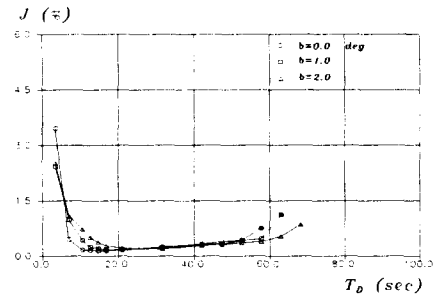


(b) $\chi = 45^\circ$

Fig. 5.4 Performance index curves in directional waves(fishing boat)

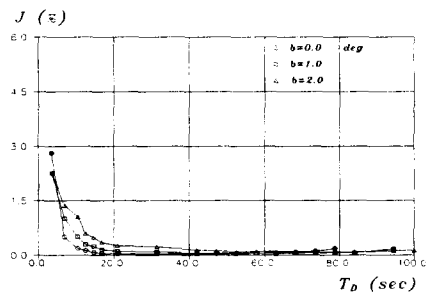


(a) $\chi = 135^\circ$

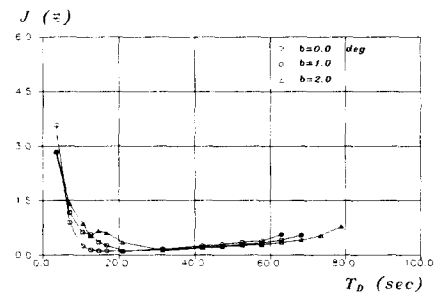


(b) $\chi = 45^\circ$

Fig. 5.5 The effect of weather adjuster on propulsive energy loss (fishing boat, $T_{cr} = 10.5\text{sec}$, $K_P = 0.5$)

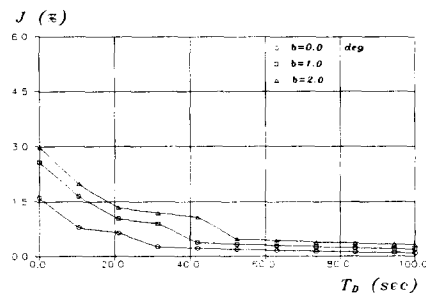


(a) $\chi = 135^\circ$

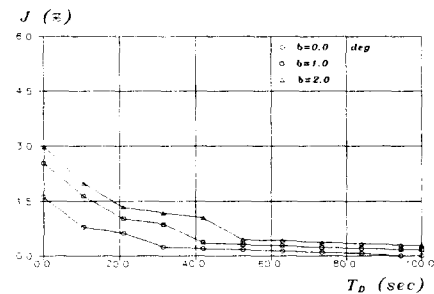


(b) $\chi = 45^\circ$

Fig. 5.6 The effect of weather adjuster on propulsive energy loss in directional waves (fishing boat, $T_{cr} = 10.5\text{sec}$, $K_P = 0.5$)

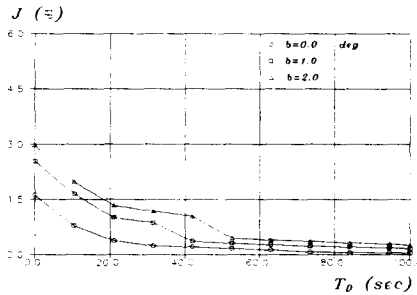


(a) $\chi = 135^\circ$

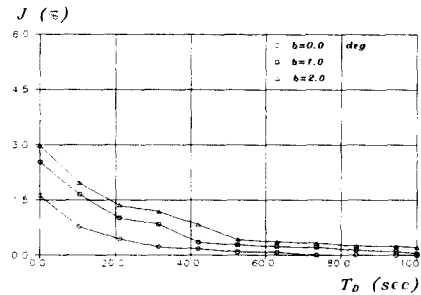


(b) $\chi = 45^\circ$

Fig. 5.7 The effect of weather adjuster on propulsive energy loss (ore carrier, $T_{cr} = 10.5\text{sec}$, $K_P = 0.5$)



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



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

Fig. 5.8 The effect of weather adjuster on propulsive energy loss in directional waves(ore carrier, $T_{cr} = 10.5 \text{ sec}$, $K_P = 0.5$)

6. 결 언

본 연구에서는, 자동조타 시스템의 비선형 요소가 추진 에너지 손실량에 미치는 영향을 알아 보았다. 이상의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 광석운반선의 경우, 최대 조타 각속도 δ_{max} 의 유무에 따라 J 의 계산 결과에 큰 차이를 보이지 않지만, 소형 어선의 경우에는 상당한 차이를 보인다.
- (2) 어선의 경우에는 천후조정기구의 dead band 폭 b 가 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.

- (3) 다방향파중의 외란특성을 이용한 계산 결과는, 단방향파 해석 결과와 거의 동일한 경향을 보이고 있지만, 외란 특성의 변화에 의해서 시스템의 불안정한 한계를 나타내는 한계점의 이동을 볼 수 있다.

이상의 연구 결과에 의하면, 동일한 해상 조건하에서 소형선과 대형선의 경우 오토파일럿의 제어 상수의 영향은 거의 반대 경향을 보이고 있다. 따라서 특정 선박의 최적 조타를 위한 제어 상수는, 선박의 종류, 해상 상태에 따라서 달라질 수 있으므로 주의를 요한다. 또한, 본 연구에서 제시한 방법에 따라 여러 가지 해상 상태에서 오토파일럿 제어 상수의 민감도 조사가 필요하다고 생각된다.

참고문헌

- [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] Bech, M. I., “Some Aspects of the Stability of Automatic Course Control of Ships”, The Journal of Mechanical Engineering Science, Supplementary Issue, 1972.
- [3] 西谷芳雄, “Compassと自動操舵”, 成山堂書店, 1988.
- [4] C. Plath Co., “Operator’s Manual for Automatic Steering, NAVI-PILOT II-EL”, 1984.
- [5] 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).
- [6] 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).
- [7] 손경호, 이경우, 김진형, “자동조타로써 항행하는 선박에 작용하는 불규칙 외란 추정법에 관한 고찰”, 한국항해학회지, 제 19권 제 2호, 1995.
- [8] 손경호, 이경우, 김진형, “규칙파에 대한 조종운동의 응답함수에 관한 고찰”, 한국항해학회지, 제18권 4호, 1994.
- [9] 元良誠三, “船舶と海洋構造物の運動學”, 成山堂書店, 1982.
- [10] 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.
- [11] 이경우, 손경호, “추사파중에서 자동조타로써 항행하는 선박의 추진 에너지 손실량 평가에 관한 연구”, 1996년 한국항해학회 춘계학술발표회 논문집, 1996.
- [12] 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).
- [13] Davenport, A. G., “The Spectrum of Horizontal Gustiness Near the Ground in High Winds”, Quarterly Journal of Royal Meteorological Society, Vol. 87, 1957
- [14] 손경호, 이경우, “선박 자동조타 시스템의 성능평가지수에 관한 고찰”, 대한조선학회논문집, 제32권 4호, 1995.