

자동조타로써 항행하는 선박의 추진 에너지 손실량 평가법에 관한 연구

손 경 호* · 이 경 우** · 황 승 욱*** · 배 정 철****

A Study on the Prediction Method of Propulsive Energy
Loss Related to Automatic Steering of Ships

*Kyoung-Ho Sohn** · *Gyoung-Woo Lee*** · *Seung-Wook Hwang**** · *Jeong-Cheul Bae*****

< 목 차 >

Abstract

1. 서 언

2. 자동조타 시스템의 구성 및 평가

2.1 자동조타 시스템의 구성 및 수학 모델

2.2 자동조타 시스템의 평가

3. 수치계산 및 고찰

3.1 공시 선박 및 계산 조건

4. 결 론

참고문헌

Abstract

When an automatic course keeping is introduced, as is quite popular in modern navigation, the closed-loop control system consists of autopilot device, power unit, steering gear, ship dynamics, and magnetic or gyro compass. We derive mathematical models of each element of the automatic steering system.

We provide a method of theoretical analysis on the propulsive energy loss related to automatic steering of ships in the open seas, taking account of the on-off(non-linear) characteristics of power unit. Also we paid attention to non-linear element installed in autopilot device, which is normally called weather adjuster. Next we make numerical calculation of the effects of autopilot control constants 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.

* 정회원, 한국해양대학교 이공대학

** 정회원, 한국해양대학교 대학원

*** 한국해양대학교 이공대학

**** 삼양무선공업주식회사

1. 서 언

선박의 조종성에 관한 연구는, ① 항만 또는 연안 등 선박의 통항이 빈번한 해역에서의 운항 안전성 향상을 위한 연구와 ② 대양에서의 운항 경제성 향상을 위한 연구로 크게 나누어서 생각할 수 있을 것이다. 상기 ①의 경우는, 개개의 선박 고유의 조종성능을 향상시키으로써 또는 적확(的確)한 조종성능 정보를 운항자에게 제공해 줌으로써 어느 정도 안전성 확보가 실현될 수 있다. 상기 ②의 경우는, 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. 그리고 오토파일럿은 파워 유닛, 조타기, 선체운동 및 컴퍼스와 함께 폐루프(closed-loop) 제어 시스템을 이루고 있다.

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. 그후 자동조타 시스템의 정량적 평가, 해석에 관한 연구가 Koyama[2], Bech[3], Hasegawa[4], Tsubokawa[5] 등에 의해서 수행되었다.

자동조타 시스템에서 오토파일럿의 제어 상수는, 선박의 추진 에너지 손실량에 미치는 영향을 평가하여 결정되어야 하며, 이때 가장 중요한 사항은 당해 해상 상태에서의 불규칙 외란 특성과 자동조타 시스템 내부의 비선형 요소라 생각된다. 그러나 Nomoto[1], Koyama[2], Bech[3], Hasegawa[4] 등의 연구에서는 자동조타 시스템 내부에 인위적으로 또는 불가피하게 삽입된 비선형 요소의 영향을 고려하지 아니하였으며, Tsubokawa[5]의 연구에

서는 이들 비선형 요소를 등가 선형화 시켜서 해석하였다.

저자들은 문헌[6]에서 자동조타 시스템에 작용하는 불규칙 외란 특성에 관해서 연구하였으며, 문헌[7]에서는 자동조타 시스템의 성능평가지수에 관해서 연구한 바 있다. 본 연구에서는 비선형 요소를 포함하는 자동조타 시스템의 구성과 동작 특성이 이들의 수학 모델화를 다루었으며, 오토파일럿의 선형 및 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 구성 및 평가

2.1 자동조타 시스템의 구성 및 수학 모델

일반적으로 선박 자동조타 시스템은 Fig. 1과 같이 구성되어 있다. 그리고 각 요소의 동작 특성과 입출력 관계는 다음과 같이 수학 모델화된다.

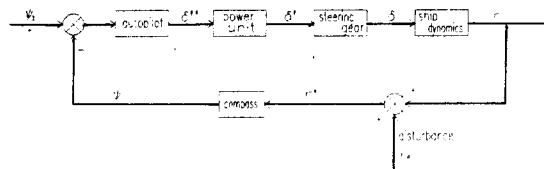


Fig. 1 Block diagram of automatic steering system

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

$$T_1 T_2 \ddot{r} + (T_1 + T_2) \dot{r} + r = K\delta + KT_3 \dot{\delta} \quad (1)$$

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

컴퍼스(compass)에 대해서는

$$\psi = \int_0^t r^* dt \quad \text{단,} \quad r^* = r + r_d \quad (2)$$

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

조타기(steering gear)의 수학 모델은 다음과 같이 표시된다[8].

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

$$\dot{\delta} = \text{sign}(\delta^* - \delta) |\dot{\delta}_{\max}| \quad (|\dot{\delta}| > |\dot{\delta}_{\max}|) \quad (3)$$

여기서 T_E 는 조타기의 시정수, $|\dot{\delta}_{\max}|$ 는 조타기의 최대 추종 각속도를 나타낸다. 식(3)의 제 1식은 전동 유압식 조타기의 가변 유량 펌프의 유량이 정격(定格) 이내인 경우이고, 제 2식은 펌프의 유량이 포화 상태인 경우이다. T_E 와 $|\dot{\delta}_{\max}|$ 의 수치는 각국 선급협회 규정에 의해서 결정되어지며, 선박의 크기나 속력에 관계없이 일정하다.

오토파일럿은 일반적으로 선형 요소와 비선형 요소로써 구성된다. 선형 요소는 PID(비례·적분·미분) 제어에 저역 필터(low pass filter) 특성을 추가한 형태로 표현된다[3]. 비선형 요소는 천후조정기구(weather adjuster)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[9]. 본 연구에서는 선형 요소로서는 PD 제어와 필터 특성을, 비선형 요소인 천후조정기구로서는 dead band를 생각하기로 한다[10]. 이들을 수학 모델화하면 다음과 같다.

$$\dot{\delta} + T_{cr} \dot{\delta} = -(\psi - \psi_i) - T_D r^* \quad (4)$$

$$\delta^{**} = \begin{cases} K_P(\delta' - b) & (\delta' > b) \\ K_P(\delta' + b) & (\delta' < -b) \\ 0 & (|\delta'| \leq b) \end{cases} \quad (5)$$

여기서 δ' 는 천후조정기구에의 입력, δ^{**} 는 오토파일럿의 출력 즉, 명령 타각, ψ_i 는 목표 침로각, b 는 dead band의 폭을 나타낸다(Fig. 3 참조). 그리고 K_P 은 타각 정수(rudder gain) 즉, 비례제어 상수를, T_{cr} 은 필터의 시정수를, T_D 는 미분제어의 시정수를 나타낸다. 본 연구에서는

$$T_D = K_{cr} T_{cr} \quad (6)$$

으로 간주하여, T_D 를 T_{cr} 의 함수로써 표시한다. 여기서 K_{cr} 은 미분제어의 타각 정수(counter rudder gain)를 나타낸다. 그리고 필터의 특성상 일반적으로 $T_D > T_{cr}$ 가 바람직하다.

다음으로 파워 유닛(power unit)에 대해서 언급한다. 파워 유닛은 오토파일럿(또는 수동 조타인 경우에는 조타륜)으로부터 전달되는 명령 타각 δ^{**} 에 상응하는 전기 신호를 기계적 변위로 변환하여 조타기의 가변 유량 펌프를 움직이기 위한 유압장치이다[5]. 파워 유닛의 작동원리를 Fig. 2에 보인다[5]. 여기서 vane 펌프는, 오토파일럿의 명령 타각 δ^{**} 와 조타기의 램(ram)의 위치(δ^* 상당)의 상대적인 크기에 의해서 솔레노이드 밸브(solenoid valve)가 자동 개폐됨으로써 유압 실린더에 기름을 흘러 보내서 램을 움직이는 일정 유량 펌프이다. 한편, 솔레노이드 밸브는 감도(感度)를 민감하게 하면 헌팅(hunting) 현상이 생기므로, 솔레노이드 밸브의 개폐 기구에는 어느 정도의 유격을 설정하지 않으면 안된다. 즉, 파워 유닛에는 불가피하게 비선형 요소를 설치하지 않으면 안된다. 파워 유닛의 동작 특성을 나타내는 블록 다이어그램은 Fig. 3에 보이고 있다. 솔레노이드 밸브 개폐 기구의 비선형 요소에 히스테리시스(hysteresis)를 동반하는 경우도 있는데, 유격의 폭 δ_b 에 비해서 작으므로 무시할 수 있다. 이상의 동작 특성을 고려하여 임의의 시각 t 에서 δ^* 에 대한 δ^{**} 의 응답을 다음과 같이 수학 모델화 한다.

$$\delta^* = \delta_0^* \quad (|\delta^{**} - \delta^*| \leq 2\delta_b)$$

$$\delta^* = \delta_0^* + \text{sign}(\delta^{**} - \delta^*) \int_0^t \dot{\delta}^* dt \quad (7)$$

$$(|\delta^{**} - \delta^*| > 2\delta_b)$$

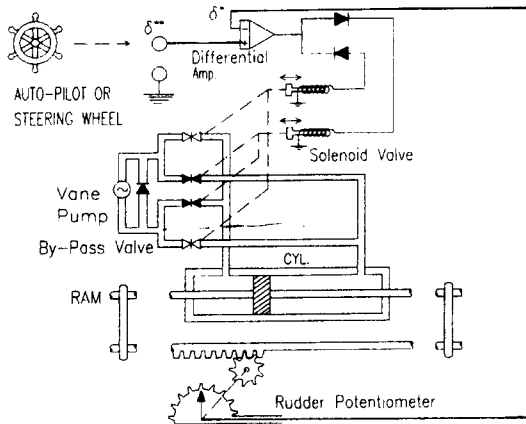


Fig. 2 Power unit

여기서 δ^{**} 는 명령 타각 상당의 전기신호, δ^* 는 명령 타각 상당의 기계적 변위, δ_0^* 는 $t = 0$ 에서의 δ^* 값(초기치), δ^* 는 vane 펌프(일정 유량 펌프)의 유량의 타각속도 환산치, $2\delta_0^*$ 는 솔레노이드 밸브 개폐 기구의 유격의 타각 환산치이다.

이상의 자동조타 시스템의 구성 및 수학 모델을 각 요소에의 전달 함수 형태로 나타내면 Fig. 3과 같다. 여기서 s 는 Laplace 연산자를 나타낸다.

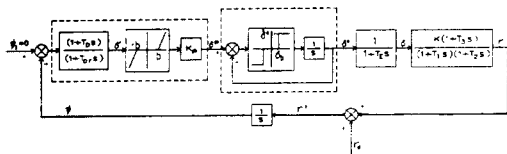


Fig. 3 Transfer functions of automatic steering system

2.2 자동조타 시스템의 평가

오토파일럿의 목적은 대양 항행시 선박이 일정 침로를 유지하도록 하는 데 있다. 따라서 오토파일럿의 성능은 운항 경제성의 관점에서 선박의 추진 에너지 손실량, 달리 표현하면 연료소비량으로써 평가하는 것이 타당할 것이다. 자동조타에 의한 추진 에너지 손실량을 평가하는 지표로서의 성능

평가지수에 관한 연구가 Nomoto[1], Koyama[2], Hasegawa[4], Sohn[7] 등에 의해서 수행되었다. Hasegawa[4], Sohn[7]의 연구에 의하면, 오토파일럿의 성능평가지수는 “자동조타로써 파랑중에서 선수동요를 하면서 항행할 때의 추진에 필요한 에너지의, 평수중 직진시의 추진 에너지로부터의 증가율”로 정의되며 다음 식으로 표시되었다[7].

$$J = \frac{1}{2} \overline{\phi^2} + \frac{a_{rr}}{a_{vv}} \overline{r^2} + \frac{a_{\delta\delta}}{a_{vv}} \overline{\delta^2} \quad (8)$$

여기서 J 는 성능평가지수, a_{vv} , a_{rr} , $a_{\delta\delta}$ 는 선박의 전후방향 운동방정식(선속의 응답방정식)의 유체력 계수, $\overline{\phi^2}$ 은 침로 편차(회두각)의 제곱평균치, $\overline{r^2}$ 은 무차원 회두각속도($r = r(L/V)$, 단, L : 수선간장, V : 선속)의 제곱평균치, $\overline{\delta^2}$ 는 타각의 제곱평균치를 나타낸다. 식(8) 및 유체력 계수의 정의 등에 관한 자세한 설명은 문헌[7]에서 다루고 있다.

성능평가지수 J 는 오토파일럿의 제어의 양부(良否)를 평가하는 것이므로, 대양 항행시 유기되는 선체운동의 상태량(ϕ , r , δ) 중에서 오토파일럿에 의해서 제어 가능한 성분만을 고려 대상으로 하여야 할 것이다. 식(8)의 J 의 각 항의 의미는 다음과 같다. 우변 제 1항은 항로 증가에 따른 에너지 손실량을 나타낸다. 제 2항은 회두각속도에 의한 원심력의 선수미 방향 성분에 기인하는 에너지 손실량을 나타낸다. 여기서 회두각속도는 타의 작동에 의한 회두각속도 성분만을 고려 대상으로 하여야 하며, 풍·파랑 외란이 직접 선체에 유기하는 회두각속도 성분은 제외하여야 한다. 왜냐하면 풍·파랑 외란이 직접 선체에 유기하는 회두각속도는 오토파일럿의 조정 여하에 상관없이 작용하기 때문에 성능평가지수에 포함시켜서는 안되기 때문이다. 즉, 식(8)에서의 회두각속도 r 는 선박에서 측정된 회두각속도로부터 외란에 의한 회두각속도 성분을 뺀 것을 의미한다. 제 3항은 조타에 의한 타각압력의 선수미 방향 성분에 기인하는 에너지 손실량을 나타낸다.

J 의 수치계산법으로서는 시뮬레이션 기법과 주파수 응답법이 이용될 수 있는데, 본 연구에서 다

루고 있는 자동조타 시스템은 내부에 비선형 요소를 다수 포함하고 있기 때문에, 주파수 응답법은 이용될 수 없고 시뮬레이션 기법에 의해서 선체운동의 상태량을 구하고 이로부터 J 를 계산한다. J 의 계산법은 문헌[7]에서 상세히 설명되고 있다.

3. 수치계산 및 고찰

3.1 공시 선박 및 계산 조건

오토파일럿의 선형 및 비선형 제어 상수가 추진 에너지 손실에 미치는 영향을 정량적으로 평가, 해석하기 위해서, 수치계산에 이용한 선박은 소형 어선 1척과 대형 광석운반선 1척이다. 이들의 주요목을 Table 1에, 정면도와 선수미 측면 형상을 각각 Figs. 4, 5에 나타낸다. 그리고 양 선박의 유체력 계수, 조종성 지수($K' = K(L/V)$, $T_1, T_2, T_3 = T_1, T_2, T_3 \times (V/L)$) 및 조타기와 파워 유닛 특성 상수를 Table 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].

Table 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	0.9095
Rudder			
Height	H (m)	9.94	2.0
Area ratio	A_R/L_d	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

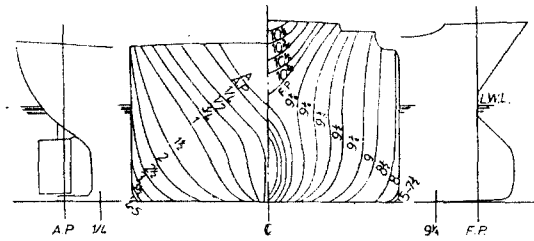


Fig. 4 Body plan and hull end profiles(ore carrier)

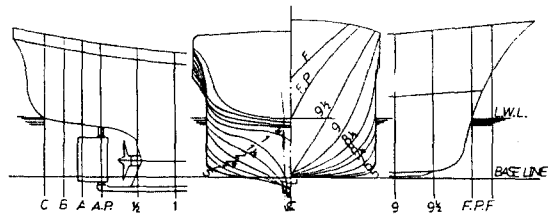


Fig. 5 Body plan and hull end profiles(fishing boat)

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

의란의 계산 조건으로서는, 가장 대표적인 해상

상태인 평균 풍속 (\bar{U}_T) 10 m/sec를 상정하였으며, 이 평균 풍속에 대응하는 파랑 특성은, WMO code 1100에 의하면 평균 파주기 5.74 초 유의파고 2.2 m이다. 그리고 진풍향(γ_T)과 파도의 진행방향(χ)은 동일한 것으로 가정하였고, 바람과 파도는 선미로부터 135° 방향 즉, 선수 사풍, 선수 사파를 택하였다. 즉, $\chi = \gamma_T = 135^\circ$ 이다. 이 상태에서 불규칙 파도와 바람의 변동 성분에 기인하는 외란을 추정하여 회전자속도로 표시하였다. 불규칙 외란 추정법에 관해서는 문헌[6]에 상세히 설명되어 있으며, 추정된 외란의 시계열 결과만을 Figs. 6, 7에 나타낸다.

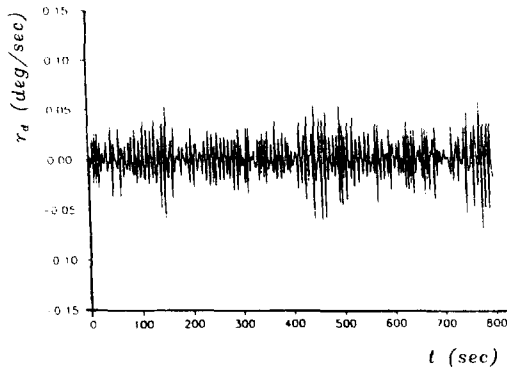


Fig. 6 Time history of disturbance in terms of yaw angular velocity due to wave & wind(ore carrier)

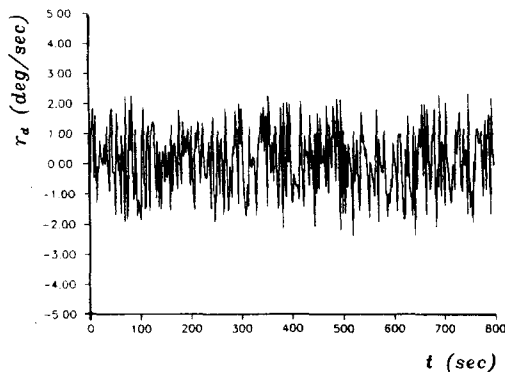


Fig. 7 Time history of disturbance in terms of yaw angular velocity due to wave & wind(fishing boat)

상기 외란 특성을 이용하여, 공시 선박의 자동조타 항행시의 성능평가지수를 수치계산한 결과를 Figs. 8~13에 나타낸다. 성능평가지수 J 의 값이 클수록 자동조타 항행시 추진 에너지 손실이 증대됨을 의미한다. 그리고 Figs. 8~13에서 해당되는 마크안에 가깝게 칠한 것은 시스템이 불안정하게 되는 한계점을 나타낸다. Figs. 8, 9는 타각정수 K_p 와 천후조정기구의 dead band 폭 b 를 일정하게 유지하고, 미분제어 시정수 T_D 가 0에서 100 초까지 변화할 때, 필터 시정수 T_{cr} 의 영향을 조사한 결과이다. 필터의 특성($T_D > T_{cr}$)을 고려할 때, Fig. 8로부터 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. 9로부터 T_{cr} 이 작을수록 추진 에너지 손실이 작다는 것을 알 수 있다. Figs. 10, 11은 K_p 와 T_{cr} 을 일정하게 유지하였을 때 천후조정기구의 dead band 폭 b 의 영향을 조사한 결과이다. Fig. 10에서 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. 11은 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. Figs. 12, 13은 T_{cr} 과 b 를 일정하게 유지하였을 때 타각정수 K_p 의 영향을 조사한 결과이다. Fig. 12에서 어선의 경우에는 K_p 가 작을수록 시스템도 안정하고 추진 에너지 손실이 작다는 것을 알 수 있다. Fig. 13은 광석운반선의 계산 결과로서 시스템은 전반적으로 안정하며, K_p 의 크기에 별 영향을 받지 않지만 $K_p = 2$ 일 때가 추진 에너지 손실이 작다는 것을 알 수 있다.

이상의 계산 결과에서 알 수 있듯이, 동일한 해상 조건하에서 소형선과 대형선의 경우 오토파일럿의 제어 상수의 영향은 거의 반대 경향을 보이고 있다.

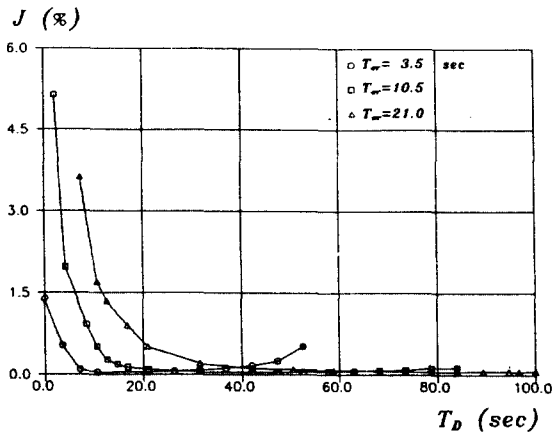


Fig. 8 The effect of filter time constant on propulsive energy loss (fishing boat, $K_P = 0.5$, $b = 1.0$ deg)

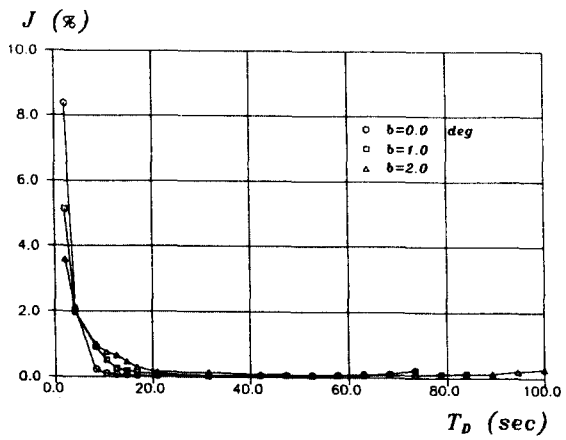


Fig. 10 The effect of weather adjuster on propulsive energy loss (fishing boat, $T_{cr} = 10.5$ sec, $K_P = 0.5$)

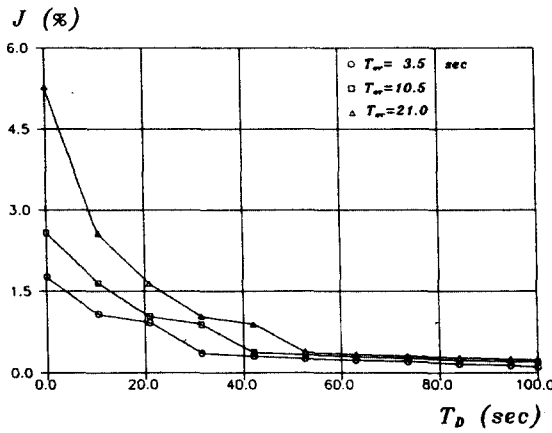


Fig. 9 The effect of filter time constant on propulsive energy loss (ore carrier, $K_P = 0.5$, $b = 1.0$ deg)

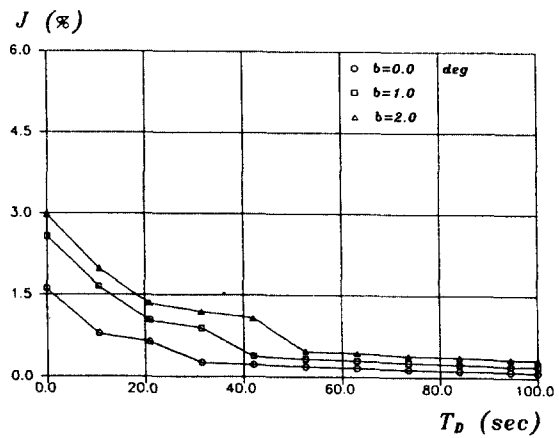


Fig. 11 The effect of weather adjuster on propulsive energy loss (ore carrier, $T_{cr} = 10.5$ sec, $K_P = 0.5$)

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. 그리고 Figs. 8 ~ 13에 공통된 사항으로서, T_D 를 증가시키면 전반적으로 추진 에너지 손실이 감소됨을 알

수 있다. 이러한 경향은 문헌[7] 및 Hasegawa[4]의 연구 결과와 약간 상이하다. 한편, 문헌[7] 및 Hasegawa[4]의 연구에서는 자동조타 시스템 내부에 삽입된 비선형 요소와 필터 특성을 전혀 고려하지 아니하였으므로 본 연구 결과와 직접 비교는 곤란하다.

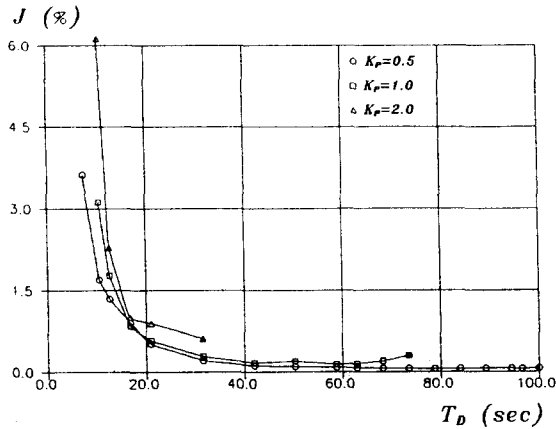


Fig. 12 The effect of rudder gain on propulsive energy loss (fishing boat, $T_{cr} = 21.0 \text{ sec}$, $b = 1.0 \text{ deg}$)

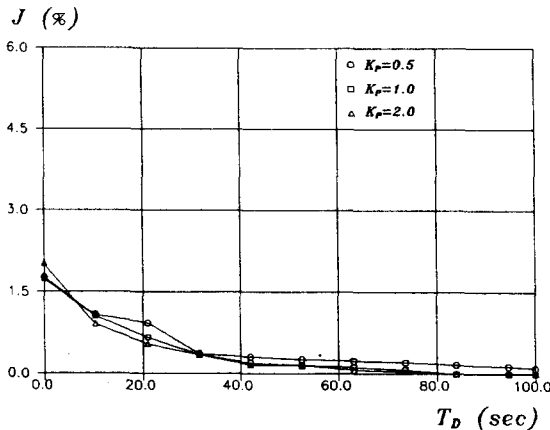


Fig. 13 The effect of rudder gain on propulsive energy loss (ore carrier, $T_{cr} = 3.5 \text{ sec}$, $b = 1.0 \text{ deg}$)

4. 결 론

본 연구에서는, 비선형 요소와 필터 특성을 포함하는 자동조타 시스템의 구성과 수학 모델, 그리고 오토파일럿의 제어의 양부(良否)를 판단하기 위한 추진 에너지 손실량 평가법에 관해서 논하였으

며, 동일한 해상 조건하에서 소형 어선과 대형 광석운반선에 대한 수치계산 결과에 대해서 고찰하였다. 이상의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 오토파일럿의 선형 및 비선형 제어 상수가 추진 에너지 손실량에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 수 있었다.
- (2) 오토파일럿의 미분제어 시정수 T_D 는 전반적으로 추진 에너지 손실량을 줄이는 효과가 있다.
- (3) 평균 풍속 10 m/sec 의 선수 사풍(斜風) 및 이에 대응하는 파랑 조건하에서, 오토파일럿의 제어 상수가 추진 에너지 손실량에 미치는 영향은 소형어선과 대형 광석운반선에서 거의 반대의 경향을 나타낸다.
- (4) 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.

본 연구는 산학협동재단 1994년도 matching fund 연구과제(참여기업 : 삼양무선공업주식회사)의 일부 연구결과임을 밝히며, 상기 기관에 깊은 감사를 드립니다.

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

- [4] 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).
- [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] 손경호, 이경우, 김진형, "자동조타로써 항행하는 선박에 작용하는 불규칙 외란 추정법에 관한 고찰", 한국항해학회지, 제 19권 제 2호, 1995.
- [7] 손경호, 이경우, 김진형, "선박 자동조타 시스템의 성능평가지수에 관한 고찰", 1995년도 춘계연구발표회 논문집, 대한조선학회, 1995.
- [8] 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).
- [9] 西谷芳雄, "Compassと自動操舵", 成山堂書店, 1988.
- [10] C. Plath Co., "Operator's Manual for Automatic Steering, NAVIPILOT II-EL", 1984.