

---

 論 文
 

---

大韓造船學會論文集  
 第 32 卷 第 4 號 1995 年 11 月  
 Transactions of the Society of  
 Naval Architects of Korea  
 Vol. 32, No. 4, November 1995

## 선박 자동조타 시스템의 성능평가지수에 관한 고찰

손경호\*, 이경우\*\*

### On a Performance Index of Automatic Steering System of Ships

by

Kyoung-Ho Sohn\* and Gyoung-Woo Lee\*\*

#### 요 약

본 연구에서는 대양을 항행하는 선박의 자동조타 시스템의 정량적 평가, 해석을 위해서 추진 에너지 손실의 관점에서 성능평가지수를 도출하였다. 그 결과 성능평가지수는 침로편차, 타각, 회 두각속도의 제곱평균치로써 구성됨을 밝혔고, 아울러 각 제곱평균치의 계수는 선박의 유체역학적 특성에 의해서 결정됨을 알 수 있었다. 또한 성능평가지수는 자동조타 시스템에 불규칙 외란이 입력으로 작용하였을 때, 주파수 응답법과 시뮬레이션 기법에 의해서 정도 높게 계산될 수 있음을 밝혔다. 대표적 해상 상태에서 광석운반선과 소형 어선에 대한 시계산 결과, 주파수 응답법은 작은 외란하에서 시스템이 선형인 경우에는 유용하지만, 비교적 큰 외란하에서 또는 시스템 내부에 비선형 요소가 있는 경우에는 시뮬레이션 기법이 보다 정확하고 유용함을 알 수 있었다.

#### Abstract

A performance index is very important and indispensable to the evaluation of automatic steering system of ships in open sea from the viewpoint of energy saving.

In this paper, we derive the performance index of automatic steering system from the concept of energy loss of propulsive power. The index is found to consist of three terms ; energy loss due to elongation of sailing distance, energy loss due to steering, and energy loss due to yawing motion. We also provide two kinds of calculation method on the performance index ; frequency response analysis and digital simulation. The numerical calculations are carried out for an ore carrier and a fishing boat by both methods. The frequency response analysis is found to be useful if the system is linear

---

발 표: 1995년도 대한조선학회 춘계연구발표회('95. 4. 21.)

접수일자: 1995. 5. 25. 재접수일자 : 1995. 9. 11

\* 정회원, 한국해양대학교

\*\* 정회원, 한국해양대학교 대학원

and the disturbance on ship is not large. If the system is nonlinear or the disturbance is excessive, the method of digital simulation has to be applied for the accurate evaluation of the performance index.

Further investigations into the effects of nonlinear elements such as weather adjuster, power unit etc. on the performance index, will be dealt with in another paper.

### 1. 서 언

선박 조종성 관련 연구는 운항 안전성과 운항 경제성 양 측면에서 수행되는 것이 바람직할 것이다. 항만 또는 연안 등 비교적 선박의 왕래가 빈번한 해역에서는 안전성 확보를 위해서 조종성능의 검토가 이루어져야 하며, 그 결과 IMO의 조종성 기준이 채택되기도 하였다[1]. 그리고 대양 항행중에는 경제성의 입장에서 조종성능의 검토가 이루어져야 할 것이다. 한편, 대양 항행중에는 대부분의 선박이 자동조타로써 항행을 하는데, 이때에는 오토파일럿, 조타기, 선체가 일체가 되어 페루프 제어 시스템을 이루고 있다. Nomoto[2]는 자동조타 항행시에는 선수동요를 피할 수 없고, 이로 인한 추진 에너지 손실은 평수중 직진시 추진 에너지의 약 2~3%, 심지어는 20%에 달한다고 지적하였다. 대양 항행시의 자동조타 시스템을 운항 경제성 관점에서 정량적으로 평가, 해석하기 위해서는 오토파일럿의 제어의 양부(良否)를 판단할 수 있는 성능평가지수가 필요하게 된다.

본 연구에서는 자동조타 시스템의 정량적 평가, 해석을 위해서 추진 에너지 손실의 관점에서 성능평가지수를 도출하였으며, 불규칙 외란하에서 자동조타로써 항행하는 선박의 성능평가지수의 계산법을 제시하였다. 그리고 광석운반선과 어선에 대한 시계산 결과에 대해서 고찰하였다.

### 2. 성능평가지수

#### 2.1 성능평가지수의 도출

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. 자동조타에 의한 추진 에너지 손실량 평가법에 관해서는 Nomoto[2], Koyama[3], Hasegawa[4] 등의 연구가 있다. Nomoto는 추진

에너지 손실을 조타 저항과 선회 원심력 저항에 의해 평가하였으며, Koyama는 항로 연장과 조타 저항에 의해 평가하였다. 한편, Hasegawa는 성능평가지수를 “자동조타로써 파랑중 항행시의 추진에 필요한 에너지의, 평수중 직진시의 추진 에너지로부터의 증가율”로 정의하고 이를 도출하였으며, 그 결과 항로 연장, 조타 저항, 선회 원심력 저항에 의해 성능평가지수를 표시하였다. 본 연구에서는 Hasegawa의 정의에 따라, 선박의 조종운동을 나타내는 전후동요 운동방정식으로부터 추진 에너지 손실량의 관점에서 성능평가지수를 도출한다.

선박의 조종운동을 나타내는 좌표계와 운동 변수를 Fig. 1과 같이 정의할 때  $x$ 축 방향의 운동방정식은 다음과 같다[5].

$$m(\dot{u} - vr) = -m_x \dot{u} + (m_y + X_{vr})vr + X_{vv}v^2 + X_{rr}r^2 + X(u) + (1 - t)T - F_N \sin \delta \tag{1}$$

- 여기서  $m$ : 선체 질량
- $m_x, m_y$ :  $x, y$  축 방향 부가질량
- $X_{vv}, X_{rr}, X_{vr}$ : 유체력 미계수
- $X(u)$ : 선체 저항
- $t$ : 추력감소율
- $T$ : 프로펠러 추력
- $F_N$ : 타 직압력

오토파일럿의 조타명령에 따라서 보침중(course-keeping)인 선박의 운동을 생각하면 다음 근사식을 적용할 수 있다.

$$X_{vv} \approx 0, X_{rr} \approx 0, u \approx V, \dot{u} \approx \dot{V}$$

$$X(u) \approx X_{uu}u^2 \approx X_{VV}V^2, v = -l_p r \tag{2}$$

$$F_N \sin \delta \approx \frac{1}{2} \rho A_R f_a \left( \frac{V_R}{V} \right)^2 V^2 \delta^2 = X_{\delta\delta} V^2 \delta^2$$

여기서  $X_{VV}$ : 직진시 선체 저항계수  
 $l_p$ : 선체 무게중심과 피봇팅 포인트 사이의 수평 거리  
 $\rho$ : 유체의 밀도  
 $A_R$ : 타 측면적  
 $f_a$ : 타직압력 계수 기울기  
 $V_R$ : 타에의 유효 유입속도  
 $X_{\delta\delta} = \frac{1}{2} \rho A_R f_a \left( \frac{V_R}{V} \right)^2$

식(2)를 식(1)에 대입하면 보침중인 선박의 전후 방향 운동방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$(m + m_x) \dot{V} + X_{VV} V^2 + (m + c_m m_y) l_p r^2 + X_{\delta\delta} V^2 \delta^2 = (1 - t) T \quad (3)$$

여기서  $c_m = (m_y + X_{vr}) / m_y$

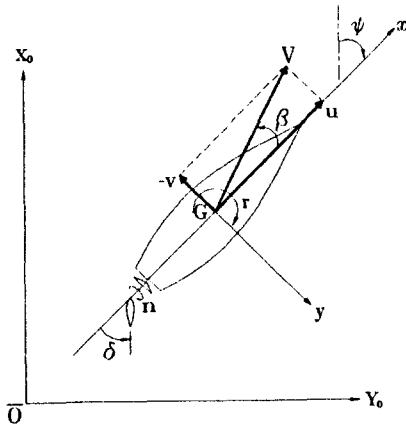


Fig. 1 Coordinate system

식(3)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{V} + a_{VV} V^2 + a_{rr} r^2 + a_{\delta\delta} V^2 \delta^2 = \frac{(1 - t) T}{m + m_x} \quad (4)$$

여기서  $a_{VV} = \frac{1}{L} \cdot \frac{X_{VV}}{(m + m_x)} = \frac{1}{L} \cdot a'_{VV}$

$$a_{rr} = L \cdot \frac{(m + c_m m_y) l_p}{(m + m_x)} = L \cdot a'_{rr}$$

$$a_{\delta\delta} = \frac{1}{L} \cdot \frac{X_{\delta\delta}}{(m + m_x)} \left( \frac{A_R}{Ld} \right) = \frac{1}{L} \cdot a'_{\delta\delta}$$

$$a'_{VV} = \frac{X_{VV}}{(m + m_x)}$$

$$X_{VV} = \left( \frac{S_A}{Ld} \right) C_T$$

$$a'_{rr} = \frac{(m + c_m m_y) l_p}{(m + m_x)}$$

$$a'_{\delta\delta} = \frac{X_{\delta\delta}}{(m + m_x)} \left( \frac{A_R}{Ld} \right)$$

$$X_{\delta\delta} = f_a \left( \frac{V_R}{V} \right)^2$$

단,  $S_A$ : 침수표면적,  $C_T$ : 전저항계수

$L$ : 수선간장,  $d$ : 평균 흘수

$$l_p = l_p / L$$

$$m', m'_x, m'_y = m, m_x, m_y / \frac{1}{2} \rho L^2 a$$

대양에서 선박이 자동조타로써 보침중일 때에는 풍·파랑에 의해서 끊임없이 외란을 받게 된다. 따라서 선박은 불규칙 선수동요를 일으키게 된다. 불규칙 선수동요는 수많은 규칙 성분의 합성으로 간주할 수 있으므로, 우선 선박이 임의의 원주파수로써 규칙적 선수동요를 하고 있다고 가정하여 성능평가지수를 도출한 후, 이를 기초로 불규칙 선수동요에 대한 성능평가지수를 구한다.

풍·파랑중 자동조타로써 항행시의 선수동요 주기를  $t_c$ , 한 주기 동안 항해한 직선 거리를  $\overline{AB}$ , 평수중 직진 항행시  $\overline{AB}$ 를 항해하는데 걸린 시간을  $t_0$ 라 하면

$$\begin{aligned} \overline{AB} &= \int_0^{t_c} V \cos \psi dt = \int_0^{t_0} V_0 dt \\ &= V_0 t_0 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $V$ 는 풍·파랑중 선수동요시의 평균 선

속으로서 일정하다고 가정한다. 그리고  $\psi$ 는 회두각(침로 편차),  $V_o$ 는 평수중 직진시의 선속이다. 그리고  $\overline{AB}$ 를 향해하는 데 소요되는 추진마력(thrust horse power)의 시간적분 즉, 추진 에너지는

$$E = \int_0^{t_c} \frac{T V_a}{75} dt$$

$$E_o = \int_0^{t_c} \frac{T_o V_o}{75} dt \tag{6}$$

여기서  $E$ 는 풍·파랑중 선수동요시의 추진 에너지,  $E_o$ 는 평수중 직진시의 추진 에너지이다. 그리고  $V_a = (1 - w_p) V_o$ ,  $V_a = (1 - w_p) V$  이다. 단,  $w_p$ 는 유효반류계수로서 선속이나 보침운동에 의해 변하지 아니한다고 가정한다.

Hasegawa의 정의에 따라 규칙적 선수동요시 성능평가지수  $J_o$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다[4].

$$J_o = \frac{E - E_o}{E_o} = \frac{\int_0^{t_c} T V dt}{\int_0^{t_c} T_o V_o dt} - 1 \tag{7}$$

직진시 및 선수동요시의 추력 감소율이 같다고 가정하고, 프로펠러 추력  $T_o$ ,  $T$ 를 식(4)로써 표현하면 식(7)은 다음과 같다.

$$J_o = \frac{\int_0^{t_c} (a_{VV} V^2 + a_{rr} r^2 + a_{\delta\delta} V^2 \delta^2) V dt}{\int_0^{t_c} a_{VV} V_o^3 dt} - 1 \tag{8}$$

선수동요의 원주파수를  $\omega$ 라 하면

$$\psi = \psi_o \sin \omega t$$

$$r = r_o \sin(\omega t + \epsilon_1)$$

$$\delta = \delta_o \sin(\omega t + \epsilon_2) \tag{9}$$

여기서  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$ 는 위상차를 나타낸다. 그리고  $\cos \psi$ 를  $\psi_o$ 의 미소 범위에서 Taylor 전개하여 한 주기 동안 적분하면

$$\cos \psi = \cos(\psi_o \sin \omega t) = 1 - \frac{1}{2} \psi_o^2 \sin^2 \omega t + \int_0^{t_c} \cos(\psi_o \sin \omega t) dt$$

$$\approx \int_0^{t_c} \left\{ 1 - \frac{1}{4} \psi_o^2 (1 - \cos 2\omega t) \right\} dt$$

$$= (1 - \frac{1}{4} \psi_o^2) t_c$$

따라서  $J_o$ 는 다음과 같이 전개된다.

$$J_o = \left[ \left\{ a_{VV} V^3 t_c + a_{rr} V \int_0^{t_c} r_o^2 \sin^2(\omega t + \epsilon_1) dt + a_{\delta\delta} V^3 \int_0^{t_c} \delta_o^2 \sin^2(\omega t + \epsilon_2) dt \right\} / \left\{ a_{VV} V_o^2 \int_0^{t_c} V \cos \psi dt \right\} \right] - 1$$

$$= \frac{a_{VV} V^2 + \frac{1}{2} a_{rr} r_o^2 + \frac{1}{2} a_{\delta\delta} V^2 \delta_o^2}{a_{VV} V_o^2 (1 - \frac{1}{4} \psi_o^2)} - 1$$

$$\approx \frac{a_{VV} V^2 + \frac{1}{2} a_{rr} r_o^2 + \frac{1}{2} a_{\delta\delta} V^2 \delta_o^2}{a_{VV} V_o^2} (1 + \frac{1}{4} \psi_o^2) - 1$$

$$= \left(\frac{V}{V_o}\right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{a_{rr}}{a_{VV}}\right) \left(\frac{r_o}{V_o}\right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{a_{\delta\delta}}{a_{VV}}\right) \left(\frac{V}{V_o}\right)^2 \delta_o^2 - 1 + \frac{1}{4} \psi_o^2 \left\{ \frac{a_{VV} V^2 + \frac{1}{2} a_{rr} r_o^2 + \frac{1}{2} a_{\delta\delta} V^2 \delta_o^2}{a_{VV} V_o^2} \right\}$$

우변 마지막 항  $\frac{1}{4} \psi_o^2 \{ \dots \}$  부분은  $\frac{1}{4} \left(\frac{V}{V_o}\right)^2 \psi_o^2$  을 제외하면 고차의 미소항으로 취급되므로  $J_o$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$J_o = \frac{1}{4} \left(\frac{V}{V_o}\right)^2 \psi_o^2 + \left(\frac{V}{V_o}\right)^2 \left\{ \frac{1}{2} \frac{a_{rr}}{a_{VV}} r_o^2 + \frac{1}{2} \frac{a_{\delta\delta}}{a_{VV}} \delta_o^2 \right\} + \left(\frac{V}{V_o}\right)^2 - 1 \tag{10}$$

여기서  $r_o = r_o \cdot \left(\frac{L}{V}\right)$

식(10)에서  $V \approx V_o$ 라 가정하면  $J_o$ 는 다음과 같다.

$$J_o = \frac{1}{4} \psi_o^2 + \frac{a_{rr}}{a_{VV}} \left( \frac{1}{2} r_o^2 \right) + \frac{a_{\delta\delta}}{a_{VV}} \left( \frac{1}{2} \delta_o^2 \right) \quad (11)$$

식(11)은 선수동요가 규칙적이라는 가정하에 도출된 성능평가지수이지만, 선수동요가 불규칙적인 경우에는  $\psi_o^2$  대신에 모든 원주파수에 대한  $\psi$ 의 진폭의 제곱을 합성한 값 즉,  $\sum_{n=1}^{\infty} \psi_{o_n}^2$  으로 표시할 수 있다. 한편,  $\sum_{n=1}^{\infty} \psi_{o_n}^2$  은  $\psi$ 의 제곱평균치( $\overline{\psi^2}$ )로 표시할 수 있다 ( $\overline{\psi^2} = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \psi_{o_n}^2$ ).  $r$ ,  $\delta$ 의 경우에도 마찬가지이다. 따라서 불규칙적 선수동요시의 성능평가지수  $J$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$J = \frac{1}{2} \overline{\psi^2} + \frac{a_{rr}}{a_{VV}} \overline{r^2} + \frac{a_{\delta\delta}}{a_{VV}} \overline{\delta^2} \quad (12)$$

여기서  $\overline{\psi^2}$ ,  $\overline{r^2}$ ,  $\overline{\delta^2}$ 는 각각  $\psi$ ,  $r$ ,  $\delta$ 의 제곱평균치이다. 식(12)는 Hasegawa가 도출한 성능평가지수와 동일한 항목으로 구성되어 있다.  $a_{rr}$ ,  $a_{VV}$ ,  $a_{\delta\delta}$ 의 값은 선박의 유체력 계수로부터 구할 수 있으며, 선형(船型)에 따라서 이 값은 약간의 차이가 난다. 제 3장에서 시계산에 이용된 두 선박의 경우  $J$ 의 각 계수를 구한 결과는 다음과 같다.

Ore carrier :

$$J = 0.5 \overline{\psi^2} + 29.35 \overline{r^2} + 4.66 \overline{\delta^2}$$

Fishing boat :

$$J = 0.5 \overline{\psi^2} + 13.61 \overline{r^2} + 6.64 \overline{\delta^2}$$

상기 두 선박에서  $J$ 의 계수에 차이가 나는 이유는, 소형 어선의 경우 광석운반선에 비해 상대적으로 고속이고 타면적이 크기 때문이다. 한편, Koyama[3]는  $J$ 를 식(12) 우변 제 1항과 제 3항으로 표시하였으며, 선형에 관계없이 제 3항의 계수는 제 1항의 계수의 8배를 취하였다. 그리고 Hasegawa[4]는 화물선 선형 1척과 탱커 선형 2척의 모형시험 결과로부터  $J$ 를 구하였는데, 그 결과는 상기 결과와 유사하다.

식(12)의  $J$ 의 각 항의 의미는 다음과 같다. 우변 제 1항은 항로 증가에 따른 에너지 손실량을 나타낸

다. 제 2항은 회두각속도에 의한 원심력의 선수미 방향 성분에 기인하는 에너지 손실량을 나타낸다. 여기서 회두각속도는 타의 작동에 의한 회두각속도 성분만을 의미하며, 풍·파랑 외란이 직접 선체에 유기하는 회두각속도 성분은 제외하여야 한다. 왜냐하면 풍·파랑 외란이 직접 선체에 유기하는 회두각속도는 오토파일럿의 조정 여하에 상관없이 작용하기 때문에 자동조타 시스템의 성능평가에 포함시켜서는 안 되기 때문이다. 즉, 식(12)에서의 회두각속도  $r$ 는 선박에서 측정된 회두각속도로부터 외란에 의한 회두각속도 성분을 뺀 것을 의미한다. 제 3항은 조타에 의한 타적압력의 선수미 방향 성분에 기인하는 에너지 손실량을 나타낸다.

### 2.2 성능평가지수의 계산법

일반적으로 선박 자동조타 시스템은 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다. 각 요소의 입출력 관계는 미분방정식의 형태로 표시할 수 있다.

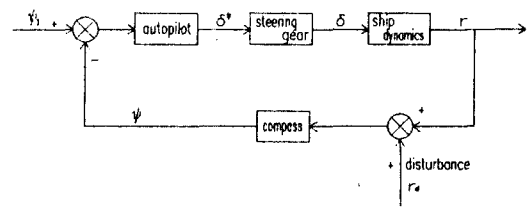


Fig. 2 Block diagram of automatic steering system

조타에 대한 선체의 운동응답은, 자동조타의 경우 보침운동을 다루기 때문에 다음과 같이  $r$ 에 관한 선형 운동방정식으로 나타낼 수 있다[2].

$$T_1 T_2 \ddot{r} + (T_1 + T_2) \dot{r} + r = K\delta + KT_3 \dot{\delta} \quad (13)$$

여기서  $K$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ 는 조종성 지수를 나타낸다.

컴퍼스(compass)에 대해서는

$$\psi = \int_0^t (r + r_d) dt \quad (14)$$

여기서  $r_a$ 는 풍·파랑에 의한 불규칙 외란을 의미한다.

조타기(steering gear)에 대해서는

$$T_E \dot{\delta} + \delta = \delta^* \quad (|\dot{\delta}| \leq |\dot{\delta}_{\max}|) \quad (15)$$

$$\dot{\delta} = \text{sign}(\delta^* - \delta) |\dot{\delta}_{\max}| (|\dot{\delta}| > |\dot{\delta}_{\max}|) \quad (16)$$

여기서  $T_E$ 는 조타기의 시정수,  $|\dot{\delta}_{\max}|$ 는 최대 타각속도를 나타낸다. 식(15)은 전동 유압식 조타기의 가변 유량 펌프의 유량이 정격(定格) 내인 경우이고 식(16)는 펌프의 유량이 포화상태인 경우이다.

$T_E$ 와  $|\dot{\delta}_{\max}|$ 의 수치는 각국 선급협회 규정에 의해서 결정된다.

오토파일럿에 대해서는 비선형 요소인 천후조정기구(weather adjuster)의 영향을 무시하면 PID(비례·적분·미분) 제어에 필터(filter) 특성을 추가한 선형 요소로써 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 간단히 PD(비례·미분) 제어 특성만을 생각하기로 하면

$$\delta^* = -K_P \{ (\psi - \phi) + T_D \dot{\psi} \} \quad (17)$$

여기서  $\phi$ 는 목표 침몰각,  $K_P$ ,  $T_D$ 는 각각 타각정수, 미분제어 시정수를 나타낸다.

식(13), (14), (15), (17)로 표시되는 자동조타 시스템의 제어계를 Laplace 연산자(s)를 써서 전달함수의 형태로 나타내면 Fig. 3과 같다.

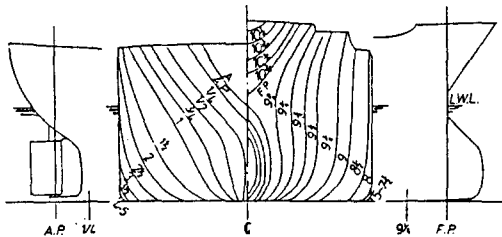


Fig. 3 Transfer functions of automatic steering system

자동조타 시스템의 성능평가지수  $J$ 를 수치계산하는 방법은 다음과 같다. 그 첫번째 방법은, 식(13), (14), (15), (16), (17)를 시뮬레이션 기법을 이용하여 직접  $\phi$ ,  $r$ ,  $\delta$ 의 시계열을 구하여 이들의 제곱평균치를 구하는 것이다. 이때에는 외란의 시계열을 미

리 알고 있어야 한다. 시뮬레이션 기법을 이용하면 시스템의 각 요소가 비선형항을 포함하고 있어도 계산이 가능하다. 시뮬레이션 기법에 의해서 성능평가지수를 계산할 때  $\overline{\phi^2}$ ,  $\overline{r^2}$ ,  $\overline{\delta^2}$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \overline{\phi^2} &= \frac{1}{T_H} \int_0^{T_H} \phi^2 dt \\ \overline{r^2} &= \frac{1}{T_H} \int_0^{T_H} \left(\frac{L}{V}\right)^2 r^2 dt \\ \overline{\delta^2} &= \frac{1}{T_H} \int_0^{T_H} \delta^2 dt \end{aligned} \quad (18)$$

여기서  $T_H$ 는 측정 시간을 의미하며, 본 연구에서는  $T_H$ 를 1시간으로 취하였다. 두번째 방법은 Fig. 3과 같이 시스템의 각 요소의 전달함수를 이용하여 주파수 응답법에 의해  $\phi$ ,  $r$ ,  $\delta$ 의 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  $\overline{\phi^2}$ ,  $\overline{r^2}$ ,  $\overline{\delta^2}$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \overline{\phi^2} &= \int_0^\infty S_\phi(\omega) d\omega \\ \overline{r^2} &= \left(\frac{L}{V}\right)^2 \int_0^\infty S_r(\omega) d\omega \\ \overline{\delta^2} &= \int_0^\infty S_\delta(\omega) d\omega \end{aligned} \quad (19)$$

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

$$\begin{aligned} S_\phi(\omega) &= |G_\phi(j\omega)|^2 S_{ra}(\omega) \\ S_\delta(\omega) &= \left| \frac{-K_P(1 + T_D j\omega)}{1 + T_E j\omega} \right|^2 S_\psi(\omega) \\ S_r(\omega) &= \left| \frac{K(1 + T_3 j\omega)}{(1 + T_1 j\omega)(1 + T_2 j\omega)} \right|^2 S_\delta(\omega) \end{aligned} \quad (20)$$

여기서  $j = \sqrt{-1}$   $\omega$ 는 원주파수,  $S_{ra}(\omega)$ 는 외

란 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. 3으로부터 다음과 같이 구해진다.

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

### 3. 계산에 및 고찰

자동조타 시스템의 성능평가지수의 시계산에 이용된 선박은 대형 광석운반선 1척과 소형 어선 1척이다. 이들의 주요목을 Table 1에, 정면도와 선수미 형상을 Fig. 4, 5에 나타낸다. 그리고 양 선박의 유체력 계수, 조종성 지수 및 조타기 특성 상수를 Table 2에 나타낸다. 이들의 추정법에 관해서는 문헌[7]에 상세히 설명되어 있다.

Table 1 Principal particulars of ships

Items		Ore carrier	Fishing boat
<b>HULL</b>			
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	$\tau$ (m)	0.0	0.0
Block coefficient	$C_B$	0.8243	0.6868
Midship section coefficient	$C_M$	0.9975	0.9695
<b>RUDDER</b>			
Height	H (m)	9.94	2.0
Area ratio	$A_R/Ld$	1/60	1/26
Aspect ratio	$\lambda$	1.5	1.7
<b>PROPELLER</b>			
Diameter	D (m)	6.5	1.9
Pitch ratio	P/D	0.65	1.0

Table 2 Coefficients of manoeuvring characteristics of ships

Items	Ore carrier	Fishing boat
$a_{1v}$	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

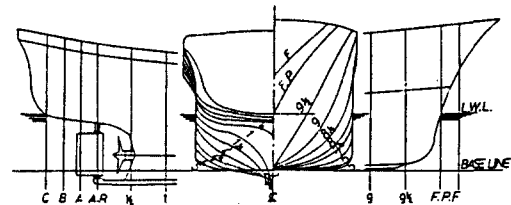


Fig. 4 Body plan and hull end profiles (ore carrier)

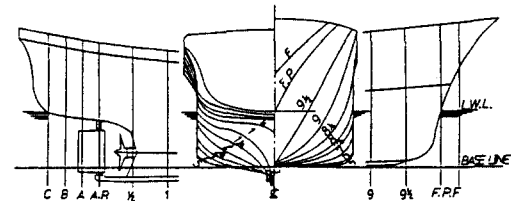


Fig. 5 Body plan and hull end profiles (fishing boat)

외란의 계산 조건으로서는, 가장 대표적인 해상 상태인 평균풍속 ( $\bar{U}_T$ ) 10 m/sec를 상정하였으며, 이 평균풍속에 대응하는 파랑 특성은, WMO code 1100에 의하면 평균파주기 5.74초, 유의파고 2.2 m이다[7]. 그리고 진풍향( $\gamma_T$ )과 파도의 진행방

향( $\lambda$ )은 동일한 것으로 가정하였고, 바람과 파도는 선미로부터  $135^\circ$  방향 즉, 선수 사풍·사파를 택하였다. 이 상태에서 바람의 변동성분에 기인하는 스펙트럼은 Davenport 추정식으로부터, 불규칙 파도에 기인하는 스펙트럼은 ISSC 추정식으로부터 구하였다[7]. 그리고 정상풍(定常風)이 선체 운동에 미치는 영향은 이에 상당하는 만큼의 침로수정(즉, 일정 타각)이 필요할 따름이고, 오토파일럿에 의해 제어할 수 없는 성분이므로 외란 산정에서 제외시키기로 한다[4]. 즉, 정상풍이 성능평가지수에 미치는 영향은 일정치를 추가하는 역할만 할 따름이다. 불규칙 외란 추정법에 관해서는 문헌[7]에 상세히 설명되어 있으며, 그 결과를 Figs. 6~9에 나타낸다. Fig. 6, 7은 외란 스펙트럼으로서 파도에 기인하는 것을  $S_{rw}(\omega)$ , 바람의 변동성분에 기인하는 것을  $S_{ru}(\omega)$ 로 표시하였다. Fig. 8, 9는 외란 스펙트럼을 시계열 해석한 결과이다.

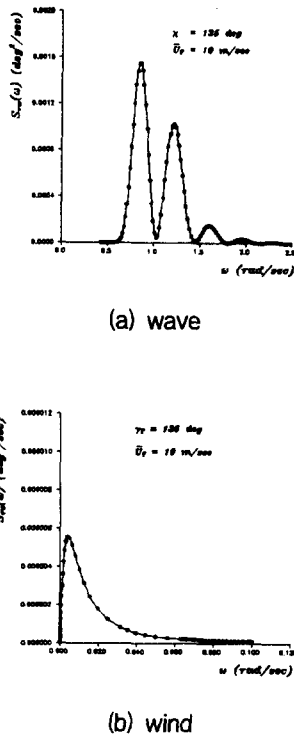


Fig. 6 Disturbance spectrum due to wave & wind(ore carrier)

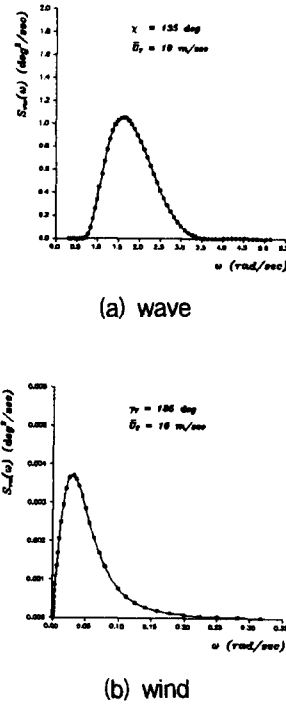
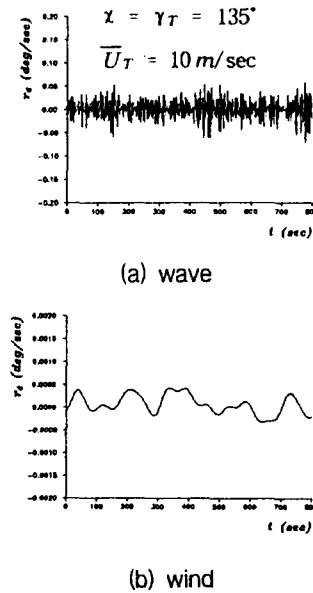
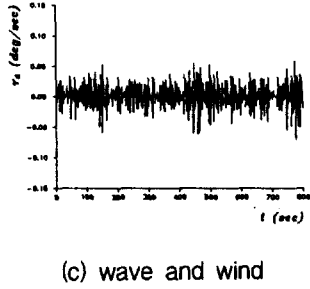


Fig.7 Disturbance spectrum due to wave & wind(fishing boat)

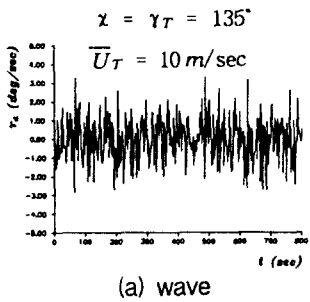




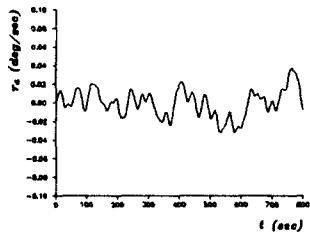


(c) wave and wind

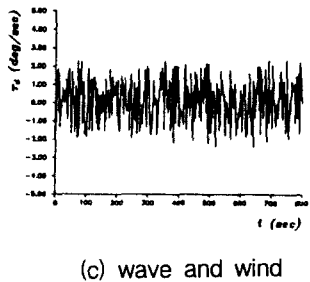
Fig. 8 Time history of disturbance in terms of yaw angular velocity due to wave & wind(ore carrier)



(a) wave



(b) wind



(c) wave and wind

Fig. 9 Time history of disturbance in terms of yaw angular velocity due to wave & wind(fishing boat)

상기 외란 특성을 이용하여 공시선박의 성능평가지수를 수치 계산한 결과를 Figs. 10~15에 보인다. Figs. 10~15에 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 커지는데, 이것은 다음과 같은 이유로서 설명될 수 있을 것이다. 파도의 고주파수 성분의 영향으로, 회두각속도의 변동이 심한 상태에서  $T_D$ 를 증가시키면 타의 움직임이 오히려 빈번해지고 타각이 커진다. 따라서 조타에 기인하는 에너지 손실이 증대되어 결국  $J$ 가 커진다. 이러한 경향은 동일한 해상 조건에서 상대적으로 외란이 크게 작용하는 소형 어선의 경우 더욱 심하다. 그리고 양 선박 모두 침로안정한 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  $T_D$ 의 필요성이 대두될 수도 있다. 왜냐하면 미분제어는 일반적으로 시스템의 안정화에 기여하기 때문이다. 그리고  $J$ 에 미치는  $K_F$ 의 영향은 특히  $T_D$  값이 큰 영역에서의 과도한  $K_F$ 는  $J$ 를 커지게 한다는 것을 알 수 있다. 한편, 시뮬레이션 기법에 의한  $J$ 의 계산 결과중 조타기의 최대 타각속도  $\delta_{max}$ 의 영향을 나타낸 것이 Fig. 11, 14이다. 광석운반선의 경우에는  $\delta_{max}$ 의 유무에 따라  $J$ 의 계산 결과에 유의한 차이를 보이지 않지만, 소형 어선의 경우에는 상당한 차이를 보이고 있다. 소형 어선의 경우에는 큰 외란의 작용하에서 조타기의 1차 지연 요소에 의해 시스템이 불안정하게 되는데, 비선형 요소인 타각속도 제한을 가함으로써 시스템이 안정화됨을 나타낸다. 따라서 주파수 응답법은 작은 외란 하에서 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.

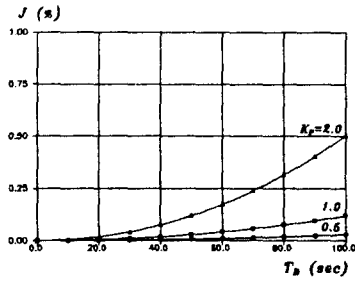


Fig. 10 Performance index curves (ore carrier, frequency response analysis)

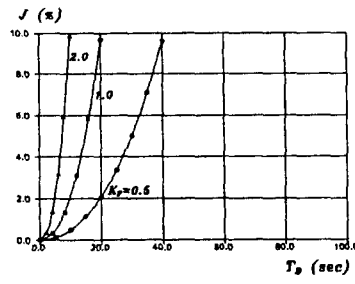


Fig. 13 Performance index curves (fishing boat, frequency response analysis)

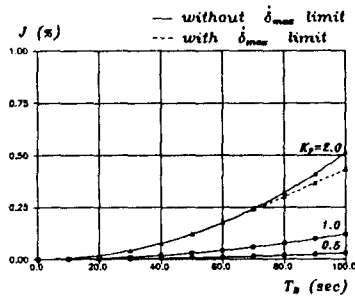


Fig. 11 Performance index curves (ore carrier, digital simulation)

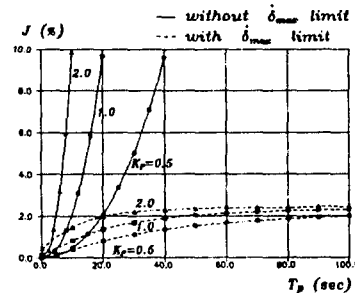


Fig. 14 Performance index curves (fishing boat, digital simulation)

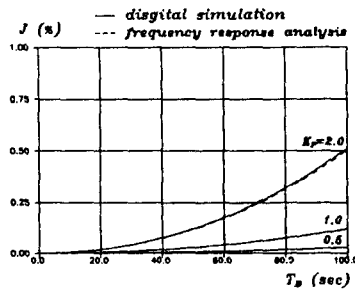


Fig. 12 Performance index curves (ore carrier)

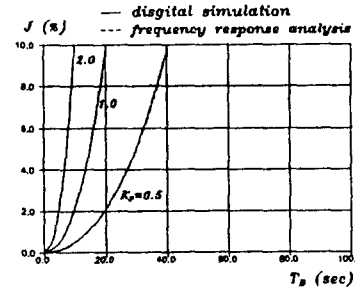


Fig. 15 Performance index curves (fishing boat)

#### 4. 결론

본 연구에서는 선박 자동조타 시스템의 제어의 양부를 판단할 수 있는 성능평가지수의 계산법과 계산례에 관해서 고찰하였다. 이상의 고찰 결과를 요약하면 다음과 같다.

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

(2) 성능평가지수의 계산법에는 주파수 응답법과 시뮬레이션 기법이 적용될 수 있으며, 동일한 외란 조건과 동일한 제어상수하에서는 양 방법의 적용결과는 동일함을 밝혔다.

(3) 침로안정한 선박의 경우, 오토파일럿의 미분제어 시정수  $T_D$ 를 높일수록 조타에 기인하는 에너지 손실이 커지므로 성능평가지수가 증대되는 경향이 있다.

(4) 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.

#### 후 기

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

#### 참 고 문 헌

- [1] IMO, "Interim Standards for Ship Manoeuvrability", Resolution A.751(18), adopted on November 1993.
- [2] 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).
- [3] 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).
- [4] Hasegawa, K., "On a Performance Criterion of Autopilot Navigation", *Journal of Kansai Society of Naval Architects, Japan*, No.178, 1980.
- [5] 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).
- [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] 손경호, 이경우, 김진형, "자동조타로써 항행하는 선박에 작용하는 불규칙 외란 추정법에 관한 고찰", *한국항해학회지*, 제19권 2호, 1995.