

주파수 응답해석을 이용한 파랑조건에 따른 어선 자동 조타시스템의 성능평가지수에 관한 연구

이경우*†, 손경호**

*목포해양대학교 해양시스템공학부, **한국해양대학교 해양시스템공학부

A Study on the Performance Index of Automatic Steering System of Fishing Boat Using Frequency Response Analysis

Gyoung-Woo LEE*† and Kyoung-Ho SHON**

* Mokpo National Maritime Univ., Division of Ocean System Engineering

** Korea Maritime Univ., Division of Ocean System Engineering

Abstract

When a ship is course-keeping in the open seas, autopilot system is adapted. The design of autopilot system is very important for improvement of ship's element research. Automatic steering system consists of autopilot device, power unit, steering gear, magnetic or gyro compass and ship dynamics.

In order to evaluate 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.

In this paper, I provide evaluation method of autopilot navigation system of the fishing ship. Prediction method based on the principle of linear superposition is introduced for irregular disturbance.

For the evaluation of automatic steering system of a ship, "performance index" is introduced from the viewpoint of energy saving and calculation method is frequency response analysis. Finally, I carried out calculation of sensitivity of control constants of autopilot with various conditions of ocean environments.

서 언

선박 오토파일럿 시스템은 선박의 침로를 자동으로 유지하는 장치로서 제어대상인 선박의 동특성과 제어 목적을 충분히 반영하여 설계되어야 한다. 또한 선박의 오토파일럿 시스템은 주로 대양을 항해할 때 운용되기 때문에 운항경제성 측면에서 설계되는 것이 타당하다고 생각된다¹⁾.

선박의 자동조타 시스템에 관련된 국내 연구는 현대 제어이론의 눈부신 발전에도 불구하고 외국과 비교하여 아직 큰 진척을 이루고 있지 못하고 있는 실정이다. 이러한 오토파일럿은 파워 유닛, 조타기, 선체운동 및 컴퍼스과 함께 폐루프(closed-loop) 제어 시스템을 이루고 있다. 이들 요소중 선체운동은 조타기에 의한 타의 작동에 기인해서도 유발되지만, 바람, 파도 등의 끊임없는 외란에 기인해서도 선체운동이

† Corresponding author : gwlee@cds.caltech.edu

*연구당시 Caltech 방문교수(Visiting Faculty of Caltech(California Insitute of Technology))

동시에 유발된다. 이 두 가지 성분을 합성한 선체운동 즉, 회두각속도가 컴퍼스를 경유해서 다시 오토파이럿으로 피드백 되어 새로운 타각을 명령하게 된다.

본 연구에서는 자동조타 시스템의 구성과 동작특성 및 불규칙 외란의 특성 등을 이용하여 오토파일럿 제어상수가 선박의 추진에너지 손실량 관점에서 유도된 성능평가지수에 미치는 영향을 파랑조건에 따라 수치 계산하였다. 계산 선형으로는 어선을 선택하였고 파랑조건은 불규칙 사파 영역의 3가지 입사각 영역을 선택하였다.

수학 모델과 불규칙 외란의 추정

일반적으로 선박 자동조타 시스템은 Fig. 1과 같은 페루프 시스템으로 이루어져 있고, 이들 각각의 요소에 대한 수학적 모델링을 실시하였다²⁾. 이러한 자동조타 시스템을 라플라스 연산자로 표시하여 각 구성요소의 동작특성과 입출력관계를 나타내면 Fig. 2와 같다.

자동조타 항행시에 선체에 작용하는 외란으로서, 불규칙 파도에 의해서 유기되는 외란과 바람의 변동 성분 에 의해서 유기되는 외란을 생각한다. 계산은 통계적 등가 선형 기법을 이용, 회두각속도 스펙트럼으로 환산하여 계산한다³⁾. 파도가 선체에 유기하는 회두각속도 스펙트럼 계산에 필요한 선수동요 응답함수의 계산은 크게 고전적인 스트립 이론인 OSM(Ordinary Strip Method)와 NSM(New Strip Method), 그리고 선체 특이점 분포에 의한 계산법 등등으로 크게 나눌 수 있는데, 본 연구에서는 선체운동 응답함수 계산에 널리 사용되고 그 실용성이 입증되어 있는 NSM(New Strip Method)의 계산⁴⁾을 사용하였다. 또한 계산에 사용된 파도의 스펙트럼은 식(1)과 같은 ISSC 스펙트럼을 이용한다⁵⁾.

$$S_u(\omega_0) = 0.11 H_w^2 \omega_1^{-1} \left(\frac{\omega_0}{\omega_1}\right)^{-5} \exp\left[-0.44 \left(\frac{\omega_0}{\omega_1}\right)^{-4}\right] \dots \dots \dots (1)$$

식(1)에서 ω_0 는 파도의 원주파수, $\omega_1 = 2\pi/T_1$, T_1 은 평균 파주기, H_w 는 유의 파고를 나타낸다. 파도의 스펙트럼을 이용한 응답스펙트럼의 계산은 파도의 설정이 1차원(장파정, long crested waves), 2차원(단파정, short crested waves) 이냐에 따라 계산방법이 상이하다. 본 연구에서는 해상 상태를 장파정파(long crested wave)와 단파정파(short crested wave)로 나누어 계산을 실시, 파도의 초기설정에 따

른 변화도 아울러 알아보았다. 단파정파는 파도의 스펙트럼이 파의 평균 진행방향에 대해서 $-\frac{\pi}{2} \sim \frac{\pi}{2}$ 범위에 있어서 $\cos^2\mu$ 의 분포를 하고 있다고 가정하여 계산을 수행하고, 파도의 퍼짐각은 15도로 설정하여 계산하였다⁵⁾.

바람이 선체에 유기하는 회두각속도 스펙트럼은 타각으로 환산한 변동풍의 외란 스펙트럼과 선박의 전달 함수를 이용하여 계산할 수 있다⁶⁾. 바람의 변동성분 스펙트럼은 식(2)와 같은 Davenport 스펙트럼⁷⁾을 이용하고, 풍압력 계산은 Isherwood의 회귀식⁸⁾을 이용하여 계산한다.

$$S_u(\omega) = 4.0 k \cdot \frac{(\bar{U}_T)^2}{\omega} \cdot \frac{x^2}{(1+x^2)^{4/3}} \dots \dots \dots (2)$$

식(2)에서 k 는 표면의 마찰 계수(해면의 경우 0.003), $x = 600\omega/(\pi\bar{U}_T)$, $S_u(\omega)$ 는 평균 풍속 \bar{U}_T 는 변동 성분 스펙트럼을 나타낸다. 그리고, 계산에 필요한 유체력 미계수와 조종성 지수는 참고 문헌 [3]에 의해 구한다. 외란 스펙트럼이 구해지면 회두각속도 외란은 시계열로 환산하여 계산에 적용시킨다.

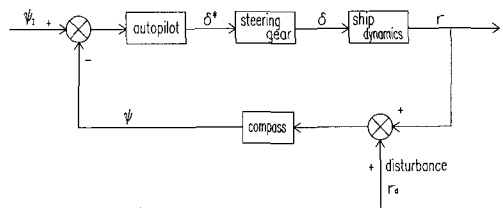


Fig. 1. Block diagram of automatic steering system without nonlinear elements.

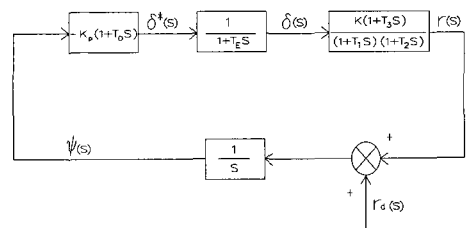


Fig. 2. Transfer functions of automatic steering system.

수치계산 및 고찰

일반적으로 비선형 요소를 제외한 선박 자동조타 시스템은 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다. 본 연구에서 사용한 자동조타 시스템의 제어방식은 간단히 PD(비례·미분) 제어 특성만을 생각하기로 하면 식(3)과 같이 나타낸다⁹⁾.

$$\delta^* = -K_p\{(\psi - \psi_i) + T_D\dot{\psi}\} \dots\dots\dots (3)$$

여기서 δ^* 는 명령타각, ψ_i 는 목표 침로각, ψ 는 선박의 침로각, K_p 는 비례게인으로 타각정수, T_D 는 미분시간을 나타내는 미분제어 시정수를 나타낸다.

자동조타시스템의 평가는 운항경제성 관점 즉, 추진에너지 손실량의 관점에서 유도된 성능평가지수⁹⁾를 이용한다. 본 계산에 사용한 성능 평가 지수는 식(4)와 같고, 식(4)의 각 항의 계수는 선박의 특성을 이용하여 유도, 결정하였다⁹⁾.

$$J = 0.5 \overline{\psi^2} + 13.61 \overline{r'^2} + 6.64 \overline{\delta^2} \dots\dots\dots (4)$$

식(4)에서 ψ 는 회두각, r' 은 회두각속도의 무차원 값, δ 는 타각을 나타낸다. 자동조타 시스템의 평가함수가 되는 식(4)의 각항의 의미는 다음과 같다. 제 1항은 항로 증가에 따른 에너지 손실량을 나타내고, 제 2항은 회두 각속도에 의한 원심력의 선수미 방향 성분에 기인하는 에너지 손실, 제 3항은 조타에 의한 타 직압력의 선수미 방향성분에 기인하는 에너지 손실량을 나타낸다. 실제 대양을 항해하는 선박의 추진 에너지는 손실은 횡요과 같은 선체 운동과 갑판침수 등에 의한 부가저항 등으로도 발생하지만, 이들 요소들은 자동조타 시스템의 제어 대상이 아니므로 평가함수에서 제외한다.

주파수 응답법을 이용한 자동조타 시스템의 성능평가지수 J 를 수치 계산하는 방법은 Fig. 2와 같이 시스템의 각 요소의 전달함수를 이용하여 ψ , r , δ 의 스펙트럼을 구하고, 각각의 스펙트럼의 면적을 전 주파수 영역에서 적분하여 제곱평균치를 구하는 것이다⁹⁾. 이 때에는 외란의 스펙트럼을 미리 알고 있어야 한다. 주파수응답법은 시스템의 각 요소가 비선형항을 포함하고 있으면 계산이 불가능하다. 주파수 응답법에 의해서 성능평가지수를 계산할 때 $\overline{\psi^2}$, $\overline{r'^2}$, $\overline{\delta^2}$ 는 식(5)와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \overline{\psi^2} &= \int_0^\infty S_\psi(\omega) d\omega \\ \overline{r'^2} &= \left(\frac{L}{V}\right)^2 \int_0^\infty S_r(\omega) d\omega \\ \overline{\delta^2} &= \int_0^\infty S_\delta(\omega) d\omega \end{aligned} \quad (5)$$

식(5)에서 $S_\psi(\omega)$, $S_r(\omega)$, $S_\delta(\omega)$ 는 각각 회두각, 회두각속도, 타각의 스펙트럼을 L 은 선박의 길이, V 는 선속을 의미하며, 이들은 주파수 응답법에 의해 식(6)과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} S_\psi(\omega) &= |G_\psi(j\omega)|^2 S_{rd}(\omega) \\ S_\delta(\omega) &= \left| \frac{-K_p(1 + T_D j\omega)}{(1 + T_E j\omega)} \right|^2 S_\psi(\omega) \\ S_r(\omega) &= \left| \frac{K(1 + T_3 j\omega)}{(1 + T_1 j\omega)(1 + T_2 j\omega)} \right|^2 S_\delta(\omega) \end{aligned} \quad (6)$$

식(6)에서 $j = \sqrt{-1}$, 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. 2로부터 구해진다⁹⁾.

$$G_\psi(s) = \frac{(1 + T_E s)(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)}{s(1 + T_E s)(1 + T_1 s)(1 + T_2 s) + K_p K(1 + T_D s)(1 + T_3 s)} \dots\dots\dots (7)$$

Fig. 1은 비선형 요소를 제외한 선박자동 조타시스템의 블록다이어그램을, Fig. 2는 자동조타 시스템의 전달 함수를 나타낸다. 계산에 사용된 선박은 길이 27.9m, 폭 6.3m, 흘수 2.25m인 어선으로 선박의 상부구조물의 형상은 Fig. 3과 같고, 계산에 필요한 기본 좌표계는 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서 U_T 는 진풍속, U_A 는 상대풍속, β 는 횡류각, χ 는 파도와 선체의 만남각, γ_T 는 진풍향, γ_A 는 상대풍향을 나타낸다. Fig. 5와 Fig. 6은 계산에 이용된 파도와 바람의 스펙트럼을 나타낸다. 외란의 계산 조건으로서는, 가장 대표적인 해상 상태인 평균 풍속 10 m/sec, 평균 파주기 5.74초, 유의파고 2.2m이다. 그리고 진풍향(γ_T)과 파도의 진행방향(χ)은 동일한 것으로 가정하였고, 바람과 파도는 120°, 135°, 150° 3방향이고, 어선의 항행속도는 각각 Froude수 0.25이다. 파도의 입사조건에서 180도를 맞파도 즉 head sea 영역으로 기준을 정하였으므로 120도가 상대적으로 횡파영역에 가까운 조건이 된다. 또한 Fig. 7은 회두각속도로 계산된 불규칙 외란의 시계열 계산 결과를 보이고 있다.

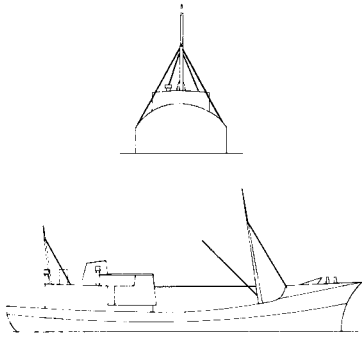


Fig. 3. Projected plan of fishing boat.

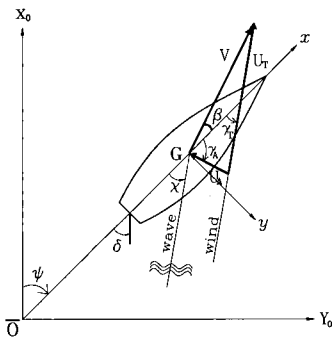


Fig. 4. Coordinate system.

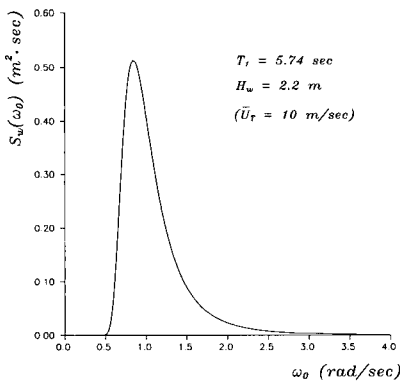


Fig. 5. ISSC wave spectrum.

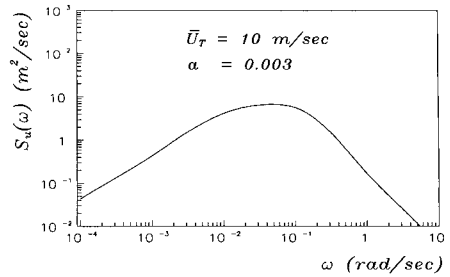


Fig. 6. Davenport wind spectrum.

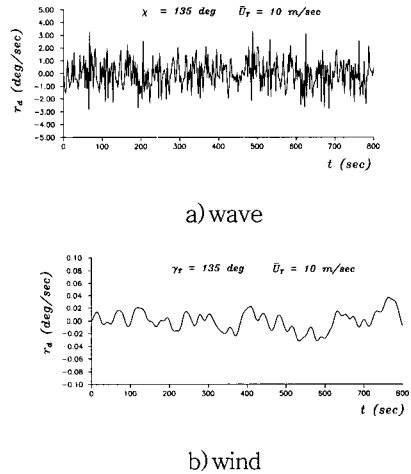


Fig. 7. Time history of disturbance due to wave and wind.

외란 특성을 이용하여 선박의 성능평가지수를 수치 계산한 결과를 Fig. 8~10에 보인다. Fig. 8~10은 K_p 를 0.5, 1.0, 2.0으로 고정했을 때 입사각에 따른 추진 에너지 손실량의 변화를 보인다. 그림에서 기호 ●, ○, △는 각각 120, 135, 150도 방향에서 파도와 바람이 입사할 때 계산 결과를 나타낸다. 또한, Fig. 8은 장파정 파도에 있어 불규칙 외란을 이용한 결과이다. Fig. 9는 단파정 파도에 있어 계산 결과이다. Fig. 10은 단파정에 있어 불규칙 외란을 이용한 계산 결과로 입사각을 고정하고 K_p 의 변화에 따라 추진 에너지의 변화를 계산한 결과이다. 그림에서는 ●, ○, △는 각각 0.5, 1.0, 2.0의 결과를 나타낸다.

계산 결과에 의하면 주파수 응답법에 의한 계산 결과는 T_D 를 증가시키면 J 의 값이 커지는데, 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 커지는 것을 알 수 있다.

K_p 의 값과 단파정, 장파정 파에 관계없이 120도에 서 추진에너지 손실량이 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 상대적으로 회두 운동이 다른 두 조건보다 크게 나타나는데 그 원인을 찾을 수 있다. 그리고 단파정파중의 외란 특성을 이용한 계산 결과는 정량적인 값의 차이는 보이지만, 대체적으로 장파정 해석에 의한 결과와 거의 비슷한 경향을 보인다. 이것은 외란 특성의 변화에 따른 결과로서, 보다 정확한 자동조타 시스템의 평가에는 실제 해상상태를 잘 구현해 주는 단파정파중의 외란특성을 이용하는 것이 타당하다고 생각한다.

동일해상 상태에서 J 에 미치는 K_p 의 영향은 2.0일 때 상대적으로 추진에너지 손실량이 가장 크다는 것을 알 수 있었는데, T_D 값이 큰 영역에서의 과도한 K_p 는 J 를 커지게 한다는 것을 알 수 있었다.

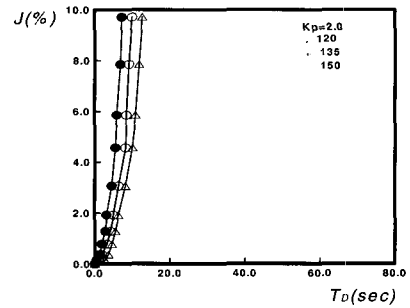
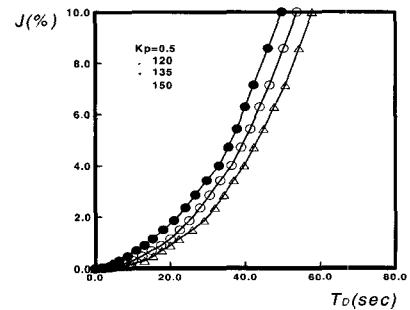
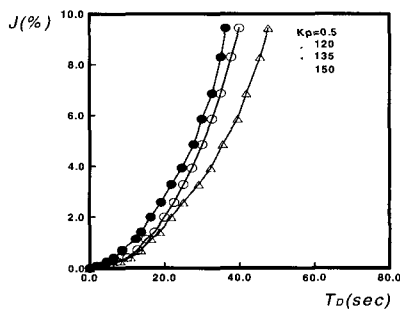


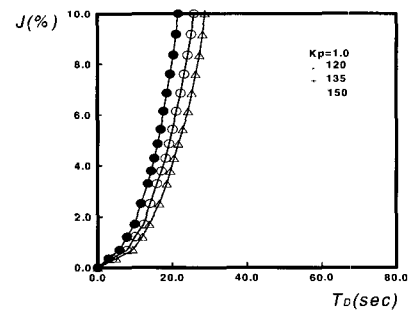
Fig. 8. Performance index curves ($K_p = 2.0$).



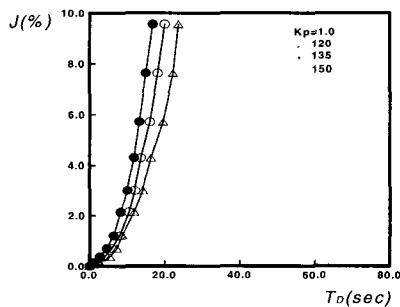
($K_p = 0.5$)



($K_p = 0.5$)



($K_p = 1.0$)



($K_p = 1.0$)

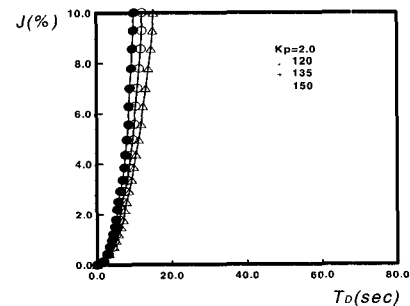
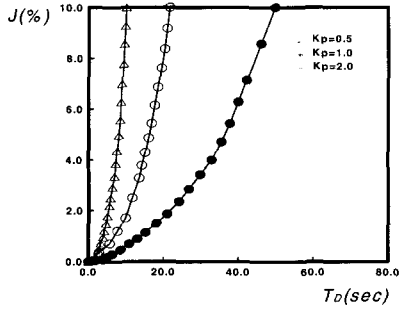
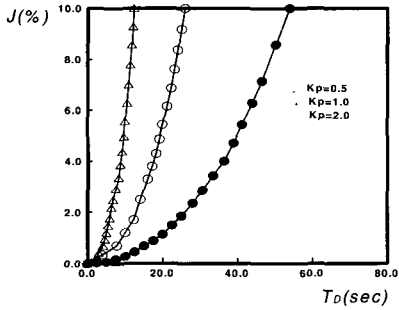


Fig. 9. Performance index curves in short crested waves ($K_p = 2.0$).



($\chi = 120$)



($\chi = 135$)

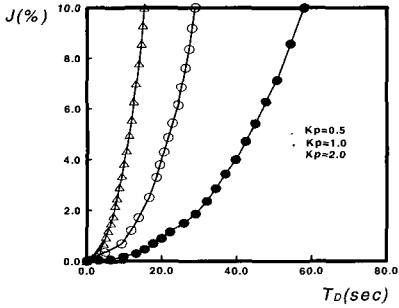


Fig. 10. Performance index curves in short crested waves ($\chi = 150$).

결론

본 연구에서는 선박 자동조타 시스템의 평가의 일환으로 대양을 항해중인 어선에 있어 파도와 바람의 입사각에 따른 추진에너지 손실량 관점에서 유도된 평가함수를 이용, 오토파일럿 제어 상수의 변화와 외란 조건에 따른 오토파일럿의 평가를 실시하였다.

계산 결과에 의하면 T_D 를 증가시키면 J 의 값이 전체적으로 커지는 것을 알 수 있었고, K_P 의 값과

단파정, 장파정 파에 관계없이 120도에서 추진에너지 손실량이 커지는 것을 알 수 있었다. 단파정파중의 외란 특성을 이용한 계산 결과는 정량적인 값의 차이는 보이지만, 대체적으로 장파정 해석에 의한 결과와 거의 비슷한 경향을 보인다. 보다 정확한 자동조타 시스템의 평가에는 실제 해상상태를 잘 구현해주는 단파정파중의 외란특성을 이용하는 것이 타당하다고 생각한다. 동일 해상 상태에서 J 에 미치는 K_P 의 영향은 2.0일 때 상대적으로 추진에너지 손실량이 가장 크다는 것을 알 수 있었고, T_D 값이 큰 영역에서의 과도한 K_P 는 J 를 커지게 한다는 것을 알 수 있었다.

상기 계산 결과를 이용한 자동조타 시스템의 평가, 해석 기술을 기반으로 향후 비선형요소를 포함하는 자동조타 시스템으로 평가, 해석 기술에 관한 추가 연구가 필요하다고 판단된다.

참고문헌

- 1) Tsubokawa, T. *et al.* (1982) : "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, (in Japanese).
- 2) Hasegawa, K. *et al.* (1980) : "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, (in Japanese).
- 3) 손경호 · 이경우 · 김진형 (1995) : "자동조타로써 항행하는 선박에 작용하는 불규칙 외란 추정법에 관한 고찰", 한국항해학회지, 제19권 2호.
- 4) 손경호 · 이경우 · 김진형 (1994) : "규칙파에 대한 조종운동의 응답함수에 관한 고찰", 한국항해학회지, 제18권 4호.
- 5) Takezawa, S. *et al.* (1977) : "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.
- 6) 日野幹雄 (1986) : "Spectral解析", 朝倉書店.
- 7) Davenport, A. G. (1957) : "The Spectrum of Horizontal Gustiness Near the Ground in High Winds", Quarterly Journal of Royal Meteorological Society, Vol. 87.

- 8) Isherwood, R. M. (1973) : "Wind Resistance of Merchant Ships", Transaction of The Royal Institution of Naval Architects, Vol. 115.
- 9) 손경호 · 이경우 (1995) : "선박 자동조타 시스템의 성능평가지수에 관한 고찰", 대한조선학회 논문지, 제32권 4호.

2002년 6월 26일 접수
2003년 1월 22일 수리