
 論 文

大韓造船學會論文集
 第 35 卷 第 1 號 1998 年 2 月
 Journal of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 35, No. 1, February 1998

파랑중 선박의 자동조타 시스템의 평가에 관한 연구

이승건*, 이경우**, 김태경***

A Study on the Assessment for the Auto-pilot System of a Ship in Waves

by

S. K. Lee*, K. W. Lee** and T. K. Kim***

요 약

불규칙파중의 선박의 운동을 해석하는 방법으로 주파수 영역해석법과 시영역해석법이 있다. 주파수영역해석법은 스펙트럴해석기법에 의해 불규칙파중 선박의 운동특성을 구하는 방법이고, 시영역해석법은 불규칙파를 생성하여 이 파를 실제의 입력으로 하여 선박의 운동을 직접 계산하는 방법이다.

보통 취급이 간편한 주파수 영역해석법이 선박의 자동조타 시스템 평가에 자주 사용되고 있으나, 본 연구에서는 주파수 영역해석법과 시영역해석법에 의한 불규칙파중의 선박의 보침운동 및 자동조타 시스템 평가를 수행하고 두 방법을 비교 검토하였다.

Abstract

There are two kinds of methods in the analysis of ship motion in irregular waves. The one is the spectral method in which the ship motion is assessed with spectral of irregular waves times R.A.O. of a ship. The other is, so called, time domain analysis, in which the irregular waves are used directly in the equation of ship motion to calculate the responses.

발 표 : 1996년도 대한조선학회 추계연구발표회('96. 11. 8.)

접수일자 : 1997년 1월 6일, 재접수일자 : 1997년 12월 23일

*정회원, 부산대학교 조선해양공학과, 기계기술연구소 연구원

**정회원, 목포해양대학교 해양및조선공학부

*** 부산대학교 대학원 조선공학과

In this paper, both methods are applied for the calculation of course keeping motion of a ship in irregular waves with auto-pilot control. And, the differences and usefulness of the two methods in the assessment of auto-pilot system are compared

1. 서론

불규칙파중의 선박의 운동을 해석하는 방법은 주파수영역 해석법과 시영역 해석법으로 나누어진다. 주파수 영역해석법에서는 선체운동에 대한 RAO와 불규칙파의 스펙트럼을 곱하여 운동의 스펙트럼을 얻어낸 다음, 그 스펙트럼을 변환하여 운동을 계산한다. 시영역해석법은 동유체력과 파랑강제력의 충격응답함수를 구하여 합성적분을 이용하여 시영역에서의 운동을 계산하는 것이다.

이 두 방법을 이용하여 불규칙파중의 보침운동을 계산하고, 오토파일럿의 성능을 평가하여 비교하였다.

2. 좌우요-선수요 선형운동방정식

Fig.1과 같이 선체 중앙에 원점을 잡은 이동좌표계 G-xy를 이용하여 선박의 조종운동을 기술하기로 한다. 일반적으로 상수계수를 가지는 선형 좌우요-선수요 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (m - Y_{\dot{v}})\dot{v} - Y_{\dot{v}}v + (mU - Y_r)r - Y_{\dot{r}}\dot{r} \\ = Y_{\delta}\delta + Y_{\omega c}\cos \omega_e t + Y_{\omega s}\sin \omega_e t \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} (I_{zz} - N_r)\dot{r} - N_r r - N_v v - N_{\dot{v}}\dot{v} \\ = N_{\delta}\delta + N_{\omega c}\cos \omega_e t + N_{\omega s}\sin \omega_e t \end{aligned}$$

한편, 유체력의 주파수 의존성을 고려한 엄밀한 좌우요-선수요 방정식은 식(2)와 같이 Volterra 함수의 형태로 나타낸다.

$$\begin{aligned} (m - Y_{v}(\infty))\dot{v} - Y_{v}(\infty)v - Y_{\dot{v}}(\infty)\dot{r} + (mU - Y_r(\infty))r \\ + \int_0^{\infty} K_v^*(\tau)v(t-\tau)d\tau + \int_0^{\infty} K_r^*(\tau)r(t-\tau)d\tau \\ = Y_{\delta}\delta + \int_0^{\infty} F_{\tau}(\tau)\zeta(t-\tau)d\tau \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (I_{zz} - N_r(\infty))\dot{r} - N_r(\infty)r - N_v(\infty)v + N_{\dot{v}}(\infty)v \\ + \int_0^{\infty} M_v^*(\tau)v(t-\tau)d\tau + \int_0^{\infty} M_r^*(\tau)r(t-\tau)d\tau \quad (2) \\ = N_{\delta}\delta + \int_0^{\infty} M_{\tau}^*(\tau)\zeta(t-\tau)d\tau \end{aligned}$$

여기서 $K_v^*(\tau), K_r^*(\tau) \dots$ 등은 유체력의 충격응답함수이다.

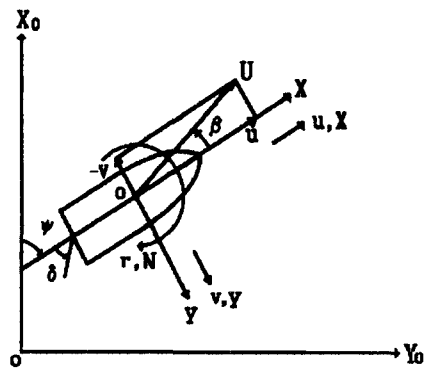


Fig. 1 Coordinate system

3. 충격응답함수의 계산

3.1 동유체력의 충격응답함수

운동하는 선박의 충격응답함수를 계산하는 직접적인 방법은 시간영역에서 경계치 문제를 푸는 방법이다. 그러나 그 과정은 매우 복잡하고 어렵다. 따라서 주파수 응답함수를 구하는 간접적인 방법은 동유체력의 주파수 응답을 Fourier 변환하여 충격응답함수를 구하는 것이다.

본 논문에서는 Van Leeuwen[8]에 의한 Todd's Series 60의 PMM 시험 결과를 사용하여 좌우요 방향의 속도와 선수요 각속도에 대한 동유체력의 충격응답을 계산하였다.

$$\begin{aligned}
 K_x^*(t) &= -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \{Y_x(\omega) - Y_x(\infty)\} \cos \omega t d\omega \\
 &= -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \{(m - Y_{v_x}(\omega)) - (m - Y_{v_x}(\infty))\} \sin \omega t d\omega
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

$K_x^*(t)$, $M_x^*(t)$, $M_y^*(t)$ 는 같은 방법으로 계산된다.

$F_n=0.2$ 일 때 주어진 모형선의 충격응답함수를 Fig.2에 나타낸다. 여기서, 부가질량과 감쇠계수는 Fourier 변환을 얻기 위해 유리함수로 근사하였으며 Fourier Cosine 변환을 통해 얻은 충격응답함수는 Fourier Sine 변환에 의한 결과와 정확히 일치한다.

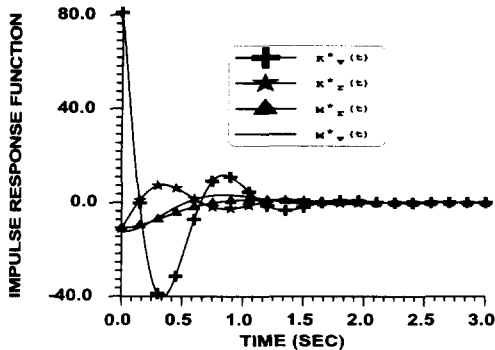


Fig.2 Impulse response function of radiation forces

3.2 파랑에 기인한 충격응답함수

단위진폭을 가지는 충격파의 충격응답함수는 주파수영역에서 여러 Sine파에 의한 모델응답의 Fourier변환을 통해 계산된다. 본 연구에서는 주어진 모델의 파랑강제력의 주파수 응답을 구하기 위해 OSM이 사용되었다.

본 계산에 사용된 선박의 부가질량과 조파감쇠계수는 Close-fit method[9]로 계산하였다.

여기서, 파랑에 기인한 충격응답함수는

$$\begin{aligned}
 K_x(t) &= \frac{2}{\pi} \text{Re} \left\{ \int_0^{\infty} H_f(\omega) \cdot e^{i\omega t} d\omega \right\} \\
 M_x(t) &= \frac{2}{\pi} \text{Re} \left\{ \int_0^{\infty} H_M(\omega) \cdot e^{i\omega t} d\omega \right\}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

식(4)에서 $H_f(\omega)$, $H_M(\omega)$ 는 각각 좌우요 파랑 강제력과 선수요 파랑강제모멘트의 주파수 응답을 나타낸다. 이러한 방법으로 얻은 충격응답함수를 Fig.3에 나타내었다.

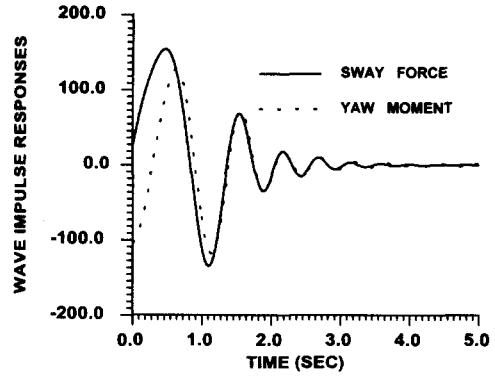


Fig.3 Impulse responses function of wave exciting forces

4. 불규칙파외란의 추정

4.1 주파수 영역해석법

불규칙 외란의 추정은, 불규칙파중의 선체응답이 규칙파중의 선체운동 응답함수와 불규칙파의 스펙트럼을 이용한 선형중첩으로 얻어질 수 있다는 가정을 전제로 한다.

파도가 선체에 유기하는 회두각 속도 스펙트럼은 파도의 스펙트럼과 규칙파에 대한 선수동요 응답으로부터 식 (5)과 같이 계산할 수 있다. 한편, 선수동요 응답함수는 스트립 이론을 이용하여 계산한다.

$$S_{\dot{w}}(\omega_e) = \omega_e^2 \cdot S_w(\omega_e) \cdot \left[\frac{\psi_a}{\psi_a}(\omega_e) \right]^2 \tag{5}$$

만남파 스펙트럼 $S_w(\omega_e)$ 와 ITTC 스펙트럼 $S_\omega(\omega)$ 사이에는 식(6)와 같은 관계가 성립한다.

$$S_w(\omega_e) = S_\omega(\omega) / \left(1 - \frac{2\omega V}{g} \cos \chi \right) \tag{6}$$

여기서

V : 선속, g : 중력가속도

χ : 파도와 선체의 만남각

그리고 만남 주파수와 파도의 원주파수 사이에는 식 (7)과 같은 관계가 성립된다.

$$\omega_e = \omega(1 - \frac{\omega}{g} V \cos \chi) \quad (7)$$

파도의 스펙트럼은 ITTC 스펙트럼을 이용한다. Fig.4는 ITTC 스펙트럼을 나타낸다.

풍속은 15.432 knot 이고, 유의파고는 2.375m이다.

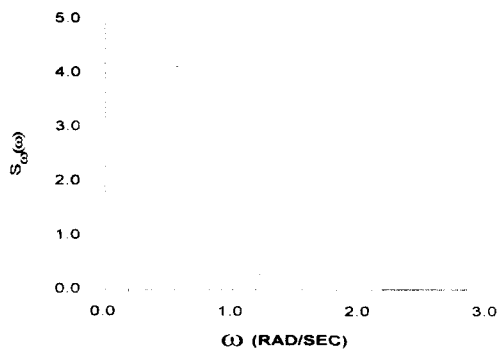


Fig.4 ITTC spectrum

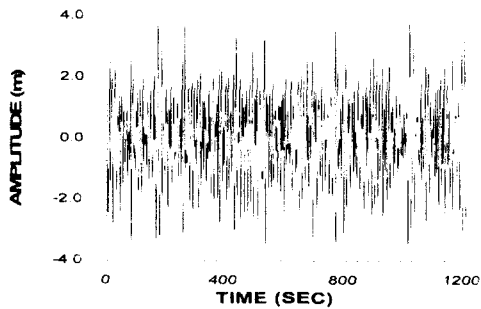


Fig.5 Irregular Wave due to ITTC Spectrum

Fig.5는 ITTC스펙트럼을 이용하여 불규칙파를 생성한 것을 나타내었다.

Fig.6는 불규칙파를 이용하여 스펙트럼을 계산하고 이를 원래 입력한 ITTC 스펙트럼과 비교한 것이다.

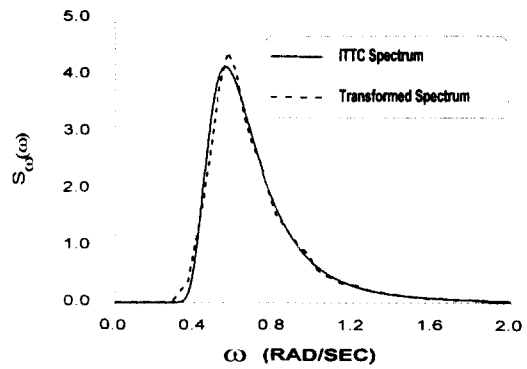


Fig.6 ITTC spectrum & transformed spectrum

4.2 시영역 해석법

불규칙파의 파랑강제력은 식(2)의 미적분방정식에서 사용한 파의 충격응답함수를 사용하여 쉽게 구할 수 있다.

Fig.7은 자동조타기의 미분시정수 T_D 변화에 따른 보침운동의 시뮬레이션 결과이다.

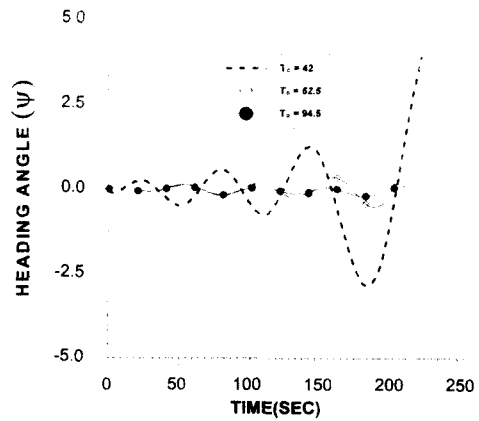


Fig.7 Time history of course keeping maneuver (Time domain analysis)

그리고, Fig.8은 동일계산에서의 타각 δ 의 변화를 나타낸 것이다.

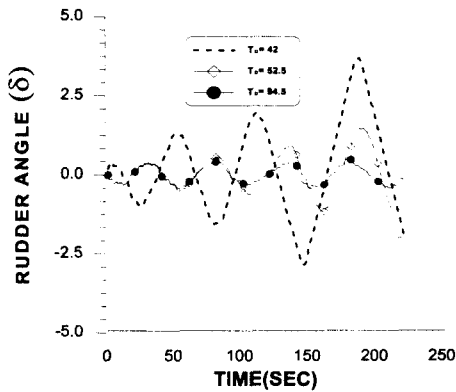


Fig.8 Time history of rudder angle (Time domain analysis)

T_D 가 작아질수록 운동이 커지고 조타량도 커짐을 알 수 있다.

5. 자동조타 시스템의 평가

선박의 오토파일럿은 PD제어와 필터특성을 고려하여 식(8)과 같이 나타낸다.

$$\delta^* = -K_p \{ (\psi - \psi_I) + T_D \dot{\psi} \} \quad (8)$$

식(8)에서 δ^* 는 명령타각, K_p 는 타각정수, ψ 는 회두각, ψ_I 는 목표침로각, T_D 는 미분제어 시정수를 나타낸다[10].

그리고 조타기에 대해서는

$$T_E \dot{\delta} + \delta = \delta^* \quad (|\delta| \leq |\delta_{\max}|) \quad (9)$$

$$\dot{\delta} = \text{sign}(\delta^* - \delta) |\dot{\delta}_{\max}| \quad (|\delta| > |\delta_{\max}|) \quad (10)$$

로 나타낸다[10]. 식(9)의 T_E 는 조타기의 시정수, $|\dot{\delta}_{\max}|$ 는 최대각속도를 나타낸다. 본 연구에서는 Fuwa의 연구결과[11]를 참고하여 결정하였다.

성능평가지수 J 는 참고문헌[10]를 참고하여 계산한다. 그리고, 성능평가지수 J 의 수치계산 결과

는 Fig.9~Fig.10에 나타낸다.

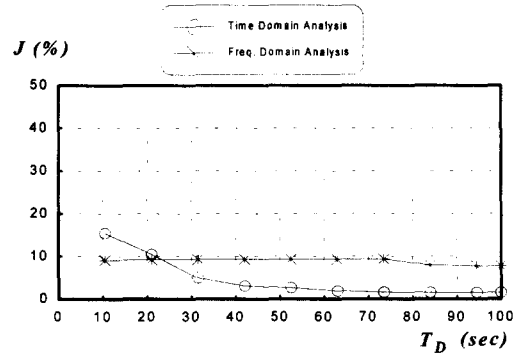


Fig. 9 Calculation of J (Tcr=3.5, Kp=1.0)

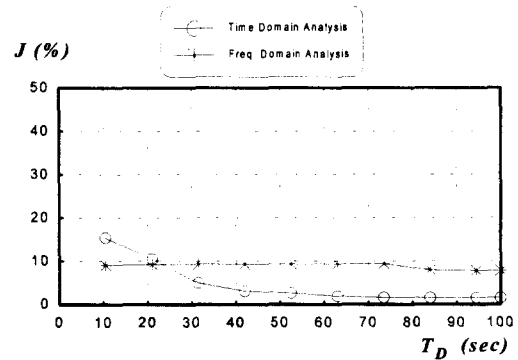


Fig. 10 Calculation of J (Tcr=10.5, Kp=2.0)

계산조건으로는 입사각 $\mu = 30^\circ$, 최대 진폭 $\zeta_a(\max) = 0.0258 m$ 이고, 평균진폭 $\zeta_a(\text{mean}) = 0.0144 m$ 이며, 주파수 영역결과와 시영역 해석결과를 비교하였다. 그 결과, 넓은 T_D 범위에 걸쳐, 시영역 해석의 결과가 주파수 영역해석결과보다 낮은 J 값을 보이고 있다.

불규칙적 선수동요시의 성능평가지수 J 는 다음과 같은 식(11)으로 계산된다.

$$J = \frac{1}{2} \overline{\psi^2} + \frac{a_{rr}}{a_{vv}} \overline{r^2} + \frac{a_{\delta\delta}}{a_{vv}} \overline{\delta^2} \quad (11)$$

여기서 $\overline{\psi^2}$, $\overline{r^2}$, $\overline{\delta^2}$ 는 각각 ψ , r , δ 의 제곱평균치이다. 식(11)은 Hasegawa[12]가 도출한

성능평가지수와 동일한 항목으로 구성되어 있다. \dot{a}_{rr} , \dot{a}_{vv} , $\dot{a}_{\delta\delta}$ 의 값은 선박의 유체력 미계수로부터 구할 수 있다.[10]

6. 결론

시간영역에서 자동조타 시스템의 성능해석기법을 제안하여, Todd의 Series 60($C_t=0.7$) 모형선을 대상으로 이를 평가하였다. 즉 불규칙 파랑외력을 시시각각 고려할 수 있는 미적분 방정식 형태의 조종운동 방정식을 사용하여 선박의 보침운동을 계산하고, 자동조타시스템을 평가한 후 이를 종래의 주파수 영역해법에 의한 결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 두 방법에 의한 평가함수 J 의 값은 다소 차이가 있으나, 양자간의 우열을 평가하기 위해서는 모형시험이 선행되어야 한다.

(2) 시영역 해석법은 선박의 조종운동 방정식이나 자동조타 시스템에 있어서 비선형 요소를 충실히 고려할 수 있어 좀더 엄밀한 평가가 가능하다.

(3) 본 계산은 Series 60 한척에 대한 계산결과이므로 보다 일반적인 결론에 도달하기 위해서는 여러 선형에 대한 고찰이 필요하다.

참 고 문 헌

[1] W. E. Cummins, "The Impulse Response Function and Ship Motions", Schiffstechnik Vol.9(1962)
 [2] Bishop,R. E. D., Burcher,R.K., Parkinson,W.G., "Oscillatory Testing for the Assessment of Ship Manoeuvrability" Proceedings of 10th Naval Hydrodynamics Symposium(1974)

[3] Tick, L. T., "Differential Equations with Frequency Dependent Coefficients", Journal of Ship Research Vol.3 No.2(1959)
 [4] Wehausen, J. V., Frank, T., Loeser, D. T., Scragg, C. A., Sibul, O. J., "Transient Manoeuvre Testing and Equation of Manoeuvring", Proceeding of 11th Symposium on Naval Hydrodynamics, London(1976)
 [5] Masami Hamamoto, Kazuhiko Hasegawa, "Estimation of Hydrodynamic Derivatives Derived from Transient Manoeuvring Tests", Journal of the Society of Naval Architects of Japan Vol.161(1987)
 [6] Fujino,M., "The Effect of Frequency Dependence of the Stability Derivatives on Maneuvering Motion", I.S.P. Vol.22 No.256(1975)
 [7] Leonardo Perez y Perez, "A Time-Domain Solution to the Motion of a Steered Ship in Waves", J.S.R. Vol.18 No.1(1974)
 [8] Leeuwen,G.van., "The Lateral Damping and Added Mass of an Oscillating Ship Model", University of Technology, Delft, Report of Ship-building Laboratory No.23(1964)
 [9] Frank,W., Salvesen,N., "The Frank Close-Fit Ship-Motion Computer Program", NSRDC, Report(1975)
 [10] 손경호, 이경우, "선박자동조타시스템의 성능평가지수에 관한 고찰" 대한조선학회논문집 제 32권 4호(1995)
 [11] Takeshi Fuwa, "A Consideration on the Extraordinary Response of the Automatic Steering System for ship Model in Quartering Seas", Papers of SRI, No.50, November (1976)
 [12] Hasegawa, K. et al., "On the Instability Criterion of the Autopilot Navigation", Journal of Kansai Society of Naval Architects, Japan, No. 178, (1980)