
 論 文

大韓造船學會論文集
 第29卷第3號 1992年8月
 Transactions of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol.29, No. 3, August 1992

船舶의 波浪中 操縱運動에 있어서 動流體力에
 의한 메모리 效果

이승건*

A Study on the Memory Effect of the Radiation
 Forces in the Maneuvering Motion of a Ship
 by

Lee, Seung-Keon*

요 약

波浪中에서 操縱運動을 하는 船舶에 있어, 실용적으로 線形 計算의 경우 波浪力을 단순한 定常 變動 外力으로 취급하는 수가 많다. 본 논문은 이와같은 경우에 있어서 파랑력에 의한 操縱 運動에 있어서의 Memory Effect를 조사하여, 이러한 실용 計算法의 妥當性을 논하였다. 그 결과를 요약하면

- (1) ω_e 의 周波數로 선체에 작용하는 定常 파랑력에 의한 Memory Effect도 거의 無視할 수 있다.
- (2) 따라서, 波浪中에서 조종 운동을 취급하는 경우, 간이 계산법으로서, 靜水중에서의 操縱 응답과 規則波중에서의 船體應答를 계산하여 이 둘을 합하여도 무방하다.

그러나, 이상의 結論은 선형 운동에 局限된 것으로서, 실제의 조종 운동은 非線形性이 重要視되므로 定常 波浪 外力에 의한 Memory Effect를 좀더 嚴密하게 考察하기 위해서는 非線形 Impulse Response Function을 求하고 이를 이용하여 波浪力에 의한 Memory Effect를 評價하여야 할 것이다.

Abstract

The memory effect in maneuvering motion is very small and usually neglected. But, considering the maneuvering motion in waves, we need to calculate the memory effect strictly. Meanwhile, it is popular to treat the wave exciting forces as the steady sinusoidal forces and

발 표: 1990년도 대한조선학회 추계연구발표회('90. 11. 10.)

접수일자: 1990년 12월 3일, 재접수일자: 1991년 9월 2일

* 정회원, 부산대학교 조선공학과

simply add to the right-hand side of the equation of the motion. This paper treats the memory effect in maneuvering motion when we take the wave exciting forces as the simple external forces and discuss the validity of such treatments.

1. 序 論

船舶이 波浪中에서 操縱運動을 할 경우, 波浪에 의한 Memory Effect를 嚴密하게 계산하려면 船體의 姿勢와 波의 相對의 位置 및 波粒子의 速度, 發散波의 전파등을 고려한 Potential 問題를 구성하여 이를 時時刻刻으로 풀어야 하나, 이 경우 방대한 計算이 要求된다. 한편, 實用的인 計算法으로서는 波浪力을 正常 變動 外力으로서 運動 方程式의 右邊에 添加하여 操縱運動을 計算한다[1~3].

本 論文은 이처럼 實用計算에 있어, 正常 變動 外力으로서의 波浪力이 操縱運動에 미치는 Memory Effect를 計算하여, 그러한 近似的 取扱이 妥當한 것인가를 確認하려고 한다.

對象으로 한 船舶은 Todd의 Series 60 船型($C_b=0.7$)으로, 規則強制動搖 試驗에서 얻어진 左右搖-船首搖의 流體力을 基礎로 하여 Impulse response function을 求하고, 이를 利用하여 入사각 $\mu=270^\circ$, 波長은 $\lambda=1.0L_{pp}$ 인 規則波中에서의 Zig-zag運動을 計算하였다.

2. 運動 方程式

嚴密한 形態의 左右搖-船首搖의 連成 運動 方程式은 다음과 같다.

$$\int_{-\infty}^{\infty} K_v(\tau)v(t-\tau)d\tau + \int_{-\infty}^{\infty} K_r(\tau)r(t-\tau)d\tau = Y(t) \\ \int_{-\infty}^{\infty} M_v(\tau)v(t-\tau)d\tau + \int_{-\infty}^{\infty} M_r(\tau)r(t-\tau)d\tau = N(t) \tag{1}$$

여기서 $K_v(\tau)$, $K_r(\tau)$ 는 Sway force에 관한 Impulse response function을 意味하고, $M_v(\tau)$, $M_r(\tau)$ 는 Yaw moment에 관한 Impulse response function을 意味한다. 이들 Impulse response function의 Fourier變換이 곧 操縱 微係數이므로, 어느 한쪽을 알고 있으면 다른 한쪽을 구할 수 있게 된다.

한편, Van Leeuwen은 Todd의 Series 60 船型에 대해 넓은 周波數 範圍에 걸쳐 強制動搖試驗(P.M.M. 試驗)을 行하여 左右搖와 船首搖에 관한 8개의 線形 微係數 값들을 求해 놓았으므로[4], 이 結果를 使用하여 식(1)에 있는 Impulse response function들을 求해 보자. 먼저 式(1)을 操縱微係數들을 利用하여 바꿔쓰면

$$(m - Y_v'(\infty)) \dot{v}(t) - Y_v(\infty)v(t) - Y_r'(\infty)r'(t) + (mU - Y_r(\infty))r(t) + \int_{-\infty}^t K_v^R(\tau)v(t-\tau)d\tau + \int_{-\infty}^t K_r^R(\tau)r(t-\tau)d\tau = Y(t) \\ (I_{zz} - N_r'(\infty))r'(t) - N_r(\infty)r(t) - N_v'(\infty)\dot{v}(t) - N_v(\infty)v(t) + \int_{-\infty}^t M_v^R(\tau)v(t-\tau)d\tau + \int_{-\infty}^t M_r^R(\tau)r(t-\tau)d\tau = N(t) \tag{2}$$

식(2)의 右邊 $Y(t)$ 나 $N(t)$ 는 선체에 작용하는 外力, 예를들어 조타력 등을 나타낸다.

여기서 $Y_v(\infty)$ 는 $Y_v(\omega)$ 인 함수에서 $\omega \rightarrow \infty$ 인 경우의 값을 의미하고, $K_v^R(\tau)$ 는 함수 $K_v(\tau)$ 의 Regular part를 의미한다.

이제 식(2)에서 $Y_v(\infty)$, $N_r(\infty)$... 등의 값을 求하고 또 $K_v^R(\infty)$, $K_r^R(\infty)$... 등을 計算하기 위해 $Y_v(\omega)$ 나 $Y_r(\omega)$ 등의 實驗值들을 다음과 같은 有理函數로 Fitting 해보자. 예를 들어

$$m - Y_v'(\omega) = \frac{C_2 + C_3\omega^2 + C_4\omega^4}{C_0 + C_1\omega^2 + \omega^4} \tag{3}$$

여기서 ω 에 관한 冪수항만 택한 理由는 $m - Y_v'(\omega)$ 가 ω 에 관한 冪함수이기 때문이고, 4차항까지만 사용한 이유는 나중의 계산을 쉽게하기 위해서이다.

Fitting은 非線形 最小 自乘法를 使用하였다. 그 結果 얻어진 것이 Fig. 1~Fig. 8이다.

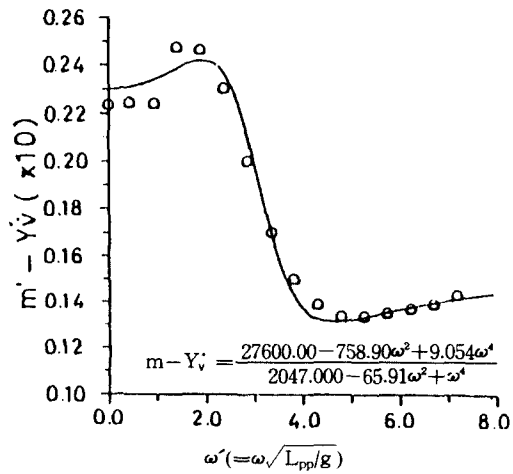


Fig. 1 Fitting of $m - Y_v$

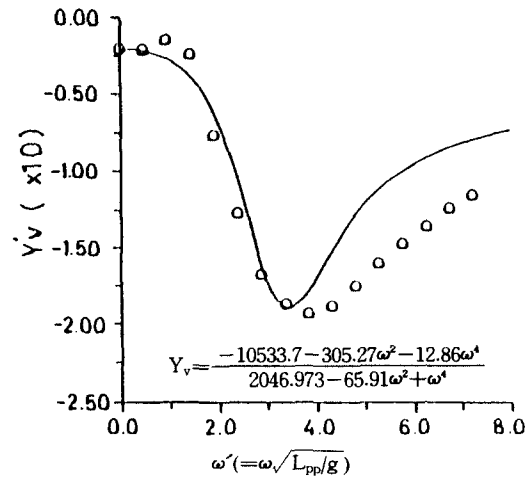


Fig. 2 Fitting of Y_v

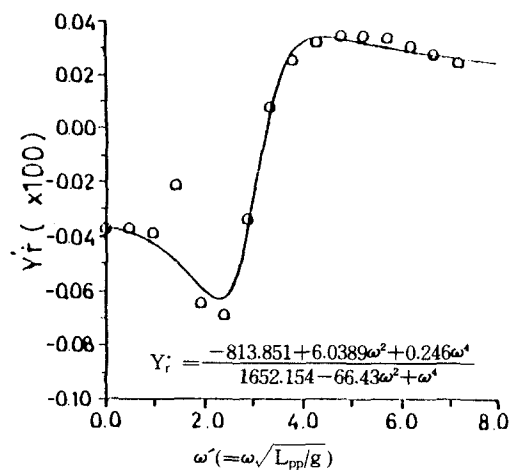


Fig. 3 Fitting of Y_r

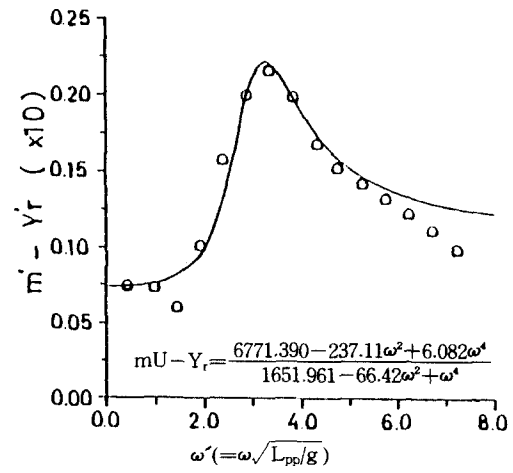


Fig. 4 Fitting of $mU - Y_r$

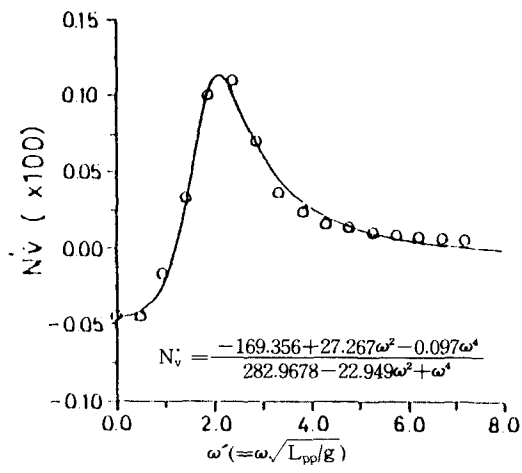


Fig. 5 Fitting of N_v

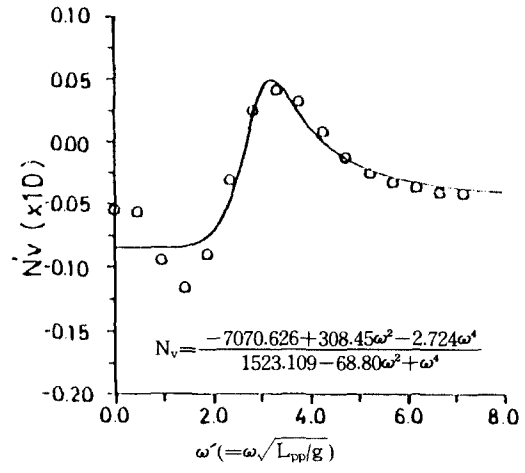


Fig. 6 Fitting of N_v

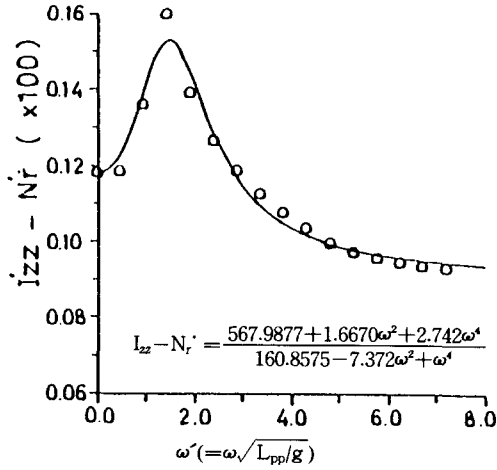


Fig. 7 Fitting of $I_{zz} - N_r$

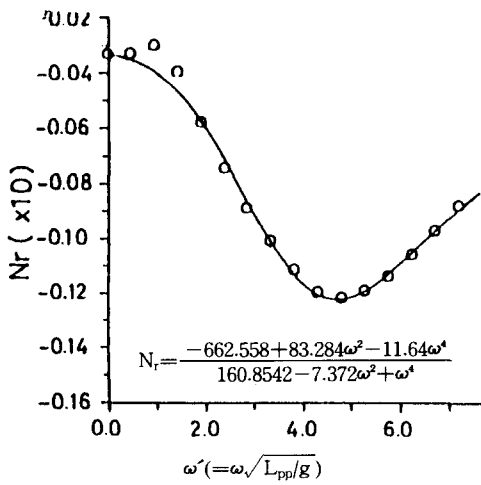


Fig. 8 Fitting of N_r

3. 波浪 強制力の 計算

運動方程式 (1)의 우변에 나타나는 波浪 強制力은 O.S.M.의 係數들을 使用하여 計算하였다.

즉 波浪에 의한 Sway force를 F_{Sw} , Yaw moment 를 M_{Yw} 라고 하면

$$F_{Sw} = F_{Swc} \cos \omega_e t + F_{Sws} \sin \omega_e t \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{단, } F_{Swc} &= 2\rho g \zeta_a \int c_3 \text{sink}'x dx \\ &+ \zeta_a \omega \omega_e \int c_3 m_{22} \text{sink}'x dx \\ &+ \zeta_a \omega \int c_3 N_{22} \cos k'x dx \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{Sws} &= 2\rho g \zeta_a \int c_0 (-\cos k'x) dx \\ &+ \zeta_a \omega \omega_e \int c_3 m_{22} (-\cos k'x) dx \\ &+ \zeta_a \omega \int c_0 N_{22} \text{sink}'x dx \\ M_{Yw} &= M_{Yc} \cos \omega_e t + M_{Yws} \sin \omega_e t \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{단, } M_{Yc} &= 2\rho g \zeta_a \int c_0 X \text{sink}'x dx \\ &+ \zeta_a \omega \omega_e \int c_3 x m_{22} \text{sink}'x dx \\ &+ U \zeta_a \omega \int c_3 m_{22} \cos k'x dx \\ &+ \zeta_a \omega \int c_3 N_{22} x \cos k'x dx \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{Yws} &= 2\rho g \zeta_a \int c_0 x (-\cos k'x) dx \\ &+ \zeta_a \omega \omega_e \int c_3 x m_{22} (-\cos k'x) dx \\ &+ U \zeta_a \omega \int c_3 m_{22} \text{sink}'x dx \\ &+ \zeta_a \omega \int c_3 N_{22} x \text{sink}'x dx \end{aligned}$$

위 式에서 $k' = k \cos \mu$

$$\begin{aligned} c_0 &= \int_{starb}^{-tz} e^{\sin(ky \sin \mu) dz} \\ &\approx \sin(kB/2 \sin \mu) (-1/k) (e^{-kd} - 1) \\ c_3 &= e^{-kd/2} \sin \mu \\ \omega_e &= \omega - kU \cos \mu \\ \zeta_a &= 3.0m \\ \mu &= 270^\circ \end{aligned}$$

2次元斷面の 附加質量 係數 $m_{22}(x)$ 와 造波 減衰 係數 $N_{22}(x)$ 는 Close-fit 法을 使用하여 計算하였다.

4. 波浪中 Zig-zag運動의 計算

對象으로한 Todd의 Series 60 船型의 主要目은 Table 1과 같고 規則波의 波振幅 $\zeta_a = 3.0m$, 波長은 $\lambda = 1.0 L_{pp}$, 입사각 $\mu = 270^\circ$ 인 경우 $10^\circ - 10^\circ$ Zig-zag 運動을 計算하였다.

먼저, 式(2)의 Impulse response funtion의 嚴密解를 求해보면,

Table 1 Principal particulars of the model

Length between perpendiculars	2.258m
Breadth	0.323m
Draught	0.129m
Volume of displacement	0.0657m ³
L.C.B. forard 1/2L _{pp}	0.011m
Radius of gyration	0.25L _{pp}
Service speed	0.928m/s

$$K_v^R(\tau) = 1/\pi \int_{-\infty}^{\infty} \omega [(m - Y_v(\omega)) - (m - Y_v(\infty))]$$

에서 $m - Y_v(\omega)$ 를 식(3)과 같이 假定했으므로

$$K_v^R(\tau) = -1/2 \exp(-\tau^4 \sqrt{c_0} \cos P) \left[\frac{(c_3 - c_1 c_4) \sin(2P - \tau^4 \sqrt{\sin P})}{\sin sP} + \frac{(c_2 - c_1 c_4) \sqrt{1/c_0} \sin(\tau^4 \sqrt{\sin P})}{\sin 2P} \right] \quad (7)$$

여기서 $P = 1/2 \cos^{-1}(1/2 C_1 \sqrt{1/C_0})$ 이다.
 (사용된 積分 公式은 附錄 I 을 參照)
 식(7)에 의해 求해진 各 Impulse response funtion 들이 Fig. 9, Fig. 10이다.

이제 식(2)를 時間領域에서 Runge-Kutta-Gill法을 使用하여 풀다.

먼저 靜水중에서의 10°-10° Zig-zag 運動을 Memory effect를 考慮하면서 풀고, 한편으로 $\omega=0$ 일 때의 微係數 값을 갖는 常數係數의 左右搖-船首搖 運動方程式을 풀어兩者를 比較한 것이 Fig. 11 이다.

兩者 사이에 거의 차이가 없어 Memory effect 가 微微함을 알 수 있다. 이 계산에서는 操舵시기를 回頭角에 관계없이 일정시간후 自動적으로 操舵되도록 하여서 兩計算에 있어 操舵의 差異에 의한 運動에의 影響可能性을 排除하였고, 고로 10°-10° Zig-zag 運動이라고 하지만, 通常의 Zig-zag 運動과는 약간 다른 것을 Fig. 11에서 發見할 수 있다.

다음으로 波浪 強制力을 O.S.M.에 의하여 求해 식(2)의 우변에 加算하여 10°-10° Zig-zag 運動을 計算한 것이 Fig. 12이다.

이 경우도 Memory effect를 考慮한 것과, 안한 것을 比較하고 있다. 그림에서도 알 수 있듯이 波浪中에서의 Memory effect도 거의 無視 可能하다고 할 수 있다.

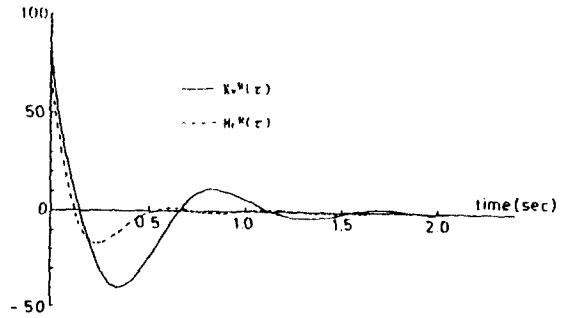


Fig. 9 Regular part of the main impulse response functions K_v, M_r

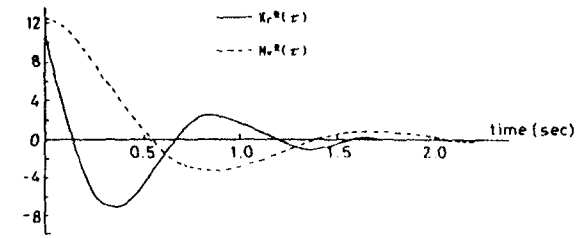


Fig. 10 Regular part of the coupled impulse response functions K_r, M_v

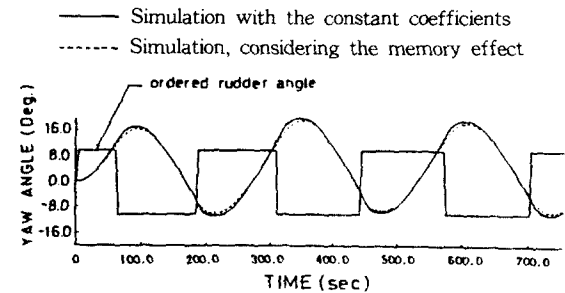


Fig. 11 10°-10° Zig-zag maneuver in calm sea

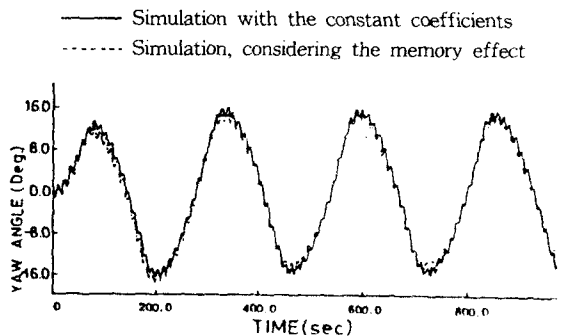


Fig. 12 10°-10° Zig-zag maneuver in the regular waves ($H_w=6.0m, \lambda / L_{pp}=1.0$)

5. 結 論

波浪中에서 操縱運動을 하는 船舶의 경우, 실용적인 계산방법으로서 파랑력을 단순한 정상 변동 외력으로 취급하는 경우가 많다. 본 논문은 이러한 경우에 있어서 파랑력에 의한 조종 운동에 있어서의 Memory Effect를 조사하여 이러한 실용계산법의 타당성을 논하였다. 그 결과를 요약하면

(1) ω_e 의 주파수로 선체에 작용하는 정상 파랑력에 의한 Memory Effect도 거의 무시할 수 있다.

(2) 따라서, 파랑중에서 조종 운동을 취급하는 경우간이 계산법으로서, 정수중에서의 조파 응답과 규칙파 중에서의 선체응답을 계산하여 이 둘을 합하여도 무방하다.

그러나, 이상의 결론은 선형 운동에 국한된 것으로서, 실제의 조종 운동은 비선형성이 중요시되므로 정상파랑 외력에 의한 Memory Effect를 좀더 엄밀하게 고찰하기 위해서는 비선형 Impulse Response Function을 求하는 일이 急先務라 할 것이다.

Nomenclature

- $K_v(\tau)$: Impulse response function of sway force due to sway velocity
- $K_v^R(\tau)$: Regular part of $K_v(\tau)$
- $K_r(\tau)$: Impulse response function of sway force due to yaw velocity
- $K_r^R(\tau)$: Regular part of $K_r(\tau)$
- $M_v(\tau)$: Impulse response function of yaw moment due to sway velocity
- $M_v^R(\tau)$: Regular part of $M_v(\tau)$
- $M_r(\tau)$: Impulse response function of yaw moment due to yaw velocity
- $M_r^R(\tau)$: Regular part of $M_r(\tau)$
- $N(t)$: Hydrodynamic yaw moment or external yaw moment
- N_r, N_r, N_v, N_v : Derivatives of yaw moment
- $r(t)$: Yaw angular velocity
- t : Time
- U : Advance speed of a ship
- $v(t)$: Sway velocity
- $Y(t)$: Hydrodynamic sway force or external sway force

- Y_r, Y_r, Y_v, Y_v : Derivatives of sway force
- τ : Dummy variable for time t
- ω : Frequency of motion or wave
- ω_e : Encounter frequency of wave
- λ : Wave length
- ζ_a : Amplitude of wave
- μ : Encounter angle of wave to a ship
- L_{pp} : ship's length between perpendiculars
- ρ : Density of water
- g : Gravitational acceleration

참 고 문 헌

- [1] Fujino, M., The Effect of Frequency Dependence of the Stability Derivatives on Maneuvering Motion, I.S.P. Vol.22, 1975.
- [2] Cummins, W.E., The Impulse Response Function and Ship Motion, schiffstechnik. Vol.9, 1962.
- [3] Carl A. Scragg, Memory Effect in Deep Water Maneuvering, J.S.R. Vol.23, No.3, p.17~187, 1979.
- [4] Leeuwen, G. Van., The Lateral Damping and added mass of an oscillating ship-model, University of Technology, Delft, Report of shipbuilding Laboratory No.23, 1964.
- [5] Gradshteyn, I.S., Table of integrals, series and products, Academic press 1965.

附 錄 1

$$\int_0^\infty \frac{x \sin(ax) dx}{x^4 + 2b^2x^2 \cos 2t + b^4} = \frac{\pi}{2b^2} \exp(-ab \cos t)$$

$$* \sin(ab \sin t) / \sin 2t$$

$$\int_0^\infty \frac{x^3 \sin(ax) dx}{x^4 + 2b^2x^2 \cos 2t + b^4} = \frac{\pi}{2} \exp(-ab \cos t)$$

$$* \sin(2t - ab \sin t) / \sin 2t$$

$$\text{단}(a > 0, b > 0, |t| < \pi/2)$$