

流速이 急變하는 潮流海域을 橫斷하는 船體의 舉動에 관한 研究

尹 秀 源

A Study on the Behavior of Ships Advancing across
the Waters with Sharply Varying Speed
Distribution of Tidal Current

Soo-weon Yoon



目 次

- Abstract
- Nomenclature
1. 序 論
 2. 船體運動方程式 및 潮流海域의 數學모델化
 - 2-1. 座標系
 - 2-2. 船體運動方程式
 - 2-3. 潮流海域의 數學모델化
 - 2-4. 潮流海域에서의 流體力計算方法
 - 2-5. 船體運動의 計算方法
 3. 數值計算
 - 3-1. 計算에 利用한 船體의 主要目 및 流體力資料
 - 3-2. 計算結果의 檢討
 4. 結 論
- 參考文獻
- 附 錄

Abstract

Generally, the tidal current the velocity of which varies sharply can be formed on water areas near islands or waterbreaks etc.

A ship advancing across such tidal current has great yawing moment with heavy roll angle. In that case, capsizing accidents are most likely to occur. But its mechanism has not been clear yet.

In this paper, the author takes the case that a ship advances across the tidal current with varying speed, and the equations of motion are described on surge, sway, yaw and roll motions, and are solved by Runge-Kutta-Gill Method, using hydrodynamic forces obtained by model tests of a container ship in calm water.

As a result of calculations, the author suggests the followings.

- 1) The longer time advancing across such tidal current results in the smaller ship motions.
- 2) The smaller angle of ship's heading to tidal current results in the smaller ship motions.
- 3) Ship's \overline{GM} affects ship motions severely.

— Nomenclature —

- a_H ; Ratio of the lateral force of hull induced by rudder to rudder normal force.
- B_F ; Breadth of tidal current area with varying speed.
- $C1, C2, C3$; Control coefficients of the auto-pilot.
- C_{RX} ; Ratio of the longitudinal force induced on the hull by the rudder to rudder drag force.
- F_n ; Froude number.
- F_N ; Rudder normal force.
- \overline{GM} ; Metacentric height.
- $G-xyz$; Moving coordinates system fixed to ship.
- I_x, I_z ; Moment of inertia of ship about X, Y axis.
- J ; Advance ratio of propeller.
- J_x, J_z ; Added moment of inertia of ship about X, Z axis.
- l_x, l_y ; z coordinate of the center of m_x, m_y respectively.
- m ; Ship's mass.
- n ; Propeller revolutions per second.
- N ; Hydrodynamic yaw moment.
- p ; Roll angular velocity (ϕ).
- $\bar{O}-x_0y_0z_0$; Coordinates system fixed to the earth.
- r ; Yaw angular velocity ($\dot{\psi}$).
- t ; Time in general, or effective thrust deduction factor.
- T ; Thrust of propeller.
- u ; Surge velocity of speed over the water.
- u^* ; Surge velocity of speed over the ground.
- u_p ; Efficient relative inflow velocity in x direction to propeller.
- u_R ; Efficient relative inflow velocity in x direction to rudder.
- v ; Sway velocity of speed over the water.

- v^* ; Sway velocity of speed over the ground.
 V_F ; Tidal current.
 V_{F1} ; Initial tidal current velocity.
 V_{F2} ; Last tidal current velocity.
 V, V^* ; Ship resultant speed ($\sqrt{u^2 + v^2}$, $\sqrt{u^{*2} + v^{*2}}$)
 V_0 ; Ship's initial speed.
 x_H ; x coordinate of the center of the lateral force induced on hull by the rudder interaction.
 x_G ; Distance between C. G. of ship and the midship.
 x_R ; x coordinate of the center of rudder normal force.
 X ; Hydrodynamic surge force.
 Y ; Hydrodynamic sway force.
 w_P ; Effective wake fraction on straight running.
 z_H ; Height between C. G. of ship and the center of the hydrodynamic sway force.
 z_R ; z coordinate of the center of the forces acting on the rudder and hull due to rudder deflection.
 α_R ; Effective rudder inflow velocity.
 α_Y ; x coordinate of center of m_y .
 β ; Drift angle (sway angle).
 $\varepsilon, \gamma, \eta$; Experimental coefficients needed for finding out rudder normal force.
 Ψ ; Heading angle (yaw angle).
 Ψ_F ; Tidal current angle.
 ϕ ; Heel angle (roll angle).
 ρ ; Density of water.
 δ ; Rudder angle.
 δ^* ; Ordered rudder angle.
 $\dot{\delta}_{\max}$; Maximum time rate of steering gear.

1. 序 論

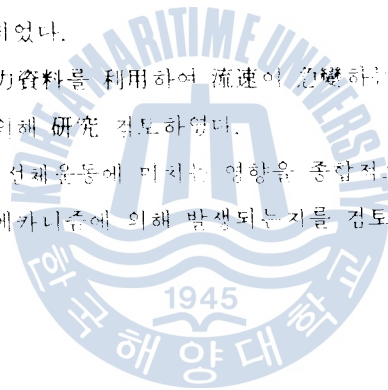
一般的으로地形地物이복잡한狹水道나海岸부근에서는潮流가複雜하다.即섬이나방파제등의부근에서발생하는反流,過流等에의해서流速이急變하는潮流海域이形成된다.이와같은潮流海域을橫斷하는船體는큰回頭모우멘트와橫傾斜를유발하게되며,심지어는轉覆한事例가日本의來島[Kurushima]海峽等에서발생하였다.

이에對한安全指針내지는原因규명이문헌[1][2]를 통해 발표되었다. 문헌[1]에서는實船實驗에 의한 실제적인操船指針을 마련하였고, 문헌[2]에서는선체전복의원인을 규명하기 위해 Surge, Sway, Yaw 운동에 대한 Simulation 계산 수법을 이용하였다.

그러나本論文에서 다루고자 하는 바와 같이 큰橫傾斜를 동반하는操縱運動의 경우 Surge, Sway, Yaw, Roll의 3次元運動으로 취급해야 마땅한 것이다. 최근 문헌[3][4][5] 등에서는 Roll을 포함한操縱運動에 관한運動方程式을定立하였으며, 橫傾斜時의流體力을拘束模型實驗을 통해求한資料가發表되었다.

本論文에서는 문헌[3]의流體力資料를利用하여流速이急變하는潮流海域을橫斷하는船體의舉動을 Simulation 計算에 의해 研究 검토하였다.

즉, 이러한海域의 환경조건이 선체운동에 미치는 영향을 종합적으로 계산하였으며, 船體轉覆이 어떠한 조건下에서 어떠한 메카니즘에 의해 발생되는지를 검토 하였다.



2. 船體의 運動方程式 및 潮流海域의 數學모델化

2-1. 座標系

그림 2-1과 같이 船體의 무게重心G를 座標原點으로 하고, 船首方向을 x 軸, 正橫方向을 y 軸, 鉛直下方을 z 軸으로 하는 直角座標系, 即 船體固定座標系를 $G-xyz$ 라 하고, 重心G를 通하는 水平面內의 空間固定座標系를 $\bar{O}-x_0y_0$ 라 한다.

船體의 運動은 剛體의 空間運動으로 취급할 수 있으므로, 船體의 質量이 重心G에 質點으로서 作用하고 있다고 간주할 수 있다.

船體의 重心G의 對水速度를 V , x, y 軸成分을 各各 u, v , 回頭角을 Ψ , 回頭角速度를 r , 橫傾斜角을 ϕ , 橫搖角速度를 ρ , 船體에 作用하는 流體力 및 모우멘트를 各各 X_0, Y_0, N_0, K_0 로 나타낸다. 따라서 N_0, K_0 은 重心G周圍의 모우멘트이다. 그리고 舵角을 δ , drift angle은 β , 舵直壓力을 F_N 으로 나타낸다. (그림 2-1 참조)

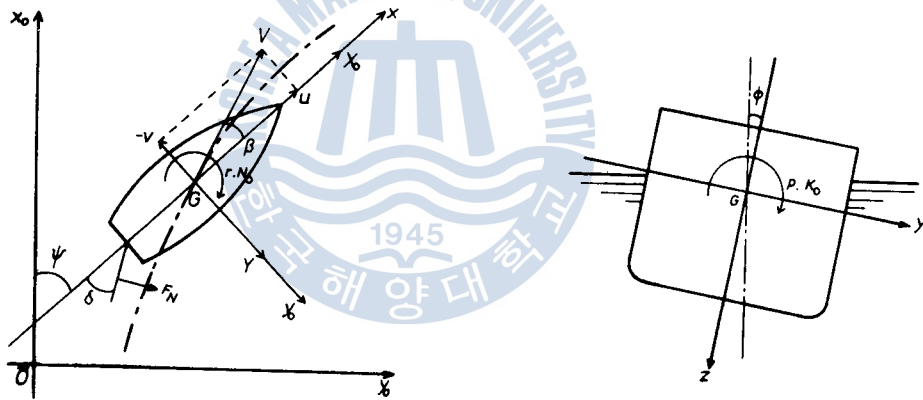


그림 2-1 좌표계

2-2. 船體運動方程式

그림 2-1의 船體固定座標 $G-xyz$ 를 使用하여 Surge, Sway, Yaw, Roll의 運動을 記述하는 運動方程式을 문헌[3][6]에 의해 다음과 같이 유도한다.

우선 剛體의 空間運動에 관한 Newton의 運動法則에 의해 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$m(\dot{u} - vr) = X_0$$

$$m(\dot{v} + ur) = Y_0$$

$$I_z \dot{r} = N_0$$

$$I_x \dot{\phi} = K_0$$

(2-1)

그러나 完全流體中에서 船體의 運動에 對한 附加質量理論²⁾에 對한 假設의 下에 復原力은 $(W\overline{GZ})(\phi)$ 가 되므로 2-1 식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

但, $\overline{GZ}(\phi)$: 傾斜角 ϕ 에서의 靜復原力이다.

$$\begin{aligned} (m + m_x) \dot{u} + (m + m_y) v \dot{r} &= X_0 \\ (m + m_y) \dot{v} + (m + m_x) u \dot{r} + m_y a_y \dot{r} - m_y l_y \dot{p} &= Y_0 \\ (I_x + J_x) \dot{r} + m_y a_y \dot{v} &= N_0 \\ (I_x + J_x) \dot{p} - m_y l_y \dot{v} - m_x l_x u \dot{r} + W\overline{GZ}(\phi) &= K_0 \end{aligned} \quad (2-2)$$

그러나 流體力은 一般的으로 船體의 中心(\mathbf{x}) 周圍에 對하여 記述하는 것이 便해서 되어 있다. 왜냐하면 船體에 作用하는 流體力을 理論的으로 計算함에 座標原點을 船體中心에 取하는 것이 計算이 容易하기 때문이다. 따라서 座標原點을 傾斜상태의 水線面에서 船首尾線의 中心(\mathbf{x})에 取한 船體固定座標系를 $O-xyz$ 라 하고, O 周圍의 流體力을 X, Y, N, K 라 하면 다음과의 관계가 있다.

$$\begin{aligned} X_0 &= X \\ Y_0 &= Y \\ N_0 &= N + Yx_c \\ K_0 &= K + Yz_c \end{aligned} \quad (2-3)$$

但, x_c, z_c 는 O 에서 船體의 x, z 座標이다. 따라서

$$\begin{aligned} (m + m_x) \dot{u} + (m + m_y) v \dot{r} &= X \\ (m + m_y) \dot{v} + (m + m_x) u \dot{r} + m_y a_y \dot{r} - m_y l_y \dot{p} &= Y + Yx_c \\ (I_x + J_x) \dot{r} + m_y a_y \dot{v} &= N + Yx_c \\ (I_x + J_x) \dot{p} - m_y l_y \dot{v} - m_x l_x u \dot{r} + W\overline{GZ}(\phi) &= K + Yz_c \end{aligned} \quad (2-4)$$

2-4 식은 平水中에서의 運動方程式이지만, 均一한 流速分布를 갖는 潮流海域에서는 u, v, r, p, \dots 등의 變數(parameter)를 對水速度라 생각하면 潮流海域에서도 그대로 적용된다.

對水速度($\mathbb{V}; u, v$)와 對地速度($\mathbb{V}^*; u^*, v^*$)의 관계는

$$\mathbb{V} = \mathbb{V}^* + \mathbb{V}_F \quad (2-5)$$

但, \mathbb{V}_F ; 潮流의 速度

이므로 各 成分別로 表示하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u &= u^* + V_F \cos(\Psi_F - \Psi) \\ v &= v^* + V_F \sin(\Psi_F - \Psi) \\ \dot{u} &= \dot{u}^* + V_F \dot{r} \sin(\Psi_F - \Psi) \\ \dot{v} &= \dot{v}^* - V_F \dot{r} \cos(\Psi_F - \Psi) \end{aligned} \quad (2-6)$$

但, Ψ_F 는 流向을 나타낸다. (그림 2-2 참조)

2-6 식을 2-4 식에 대입하여 對地速度(u^*, v^*)에 대한 運動方程式으로 고쳐쓰면

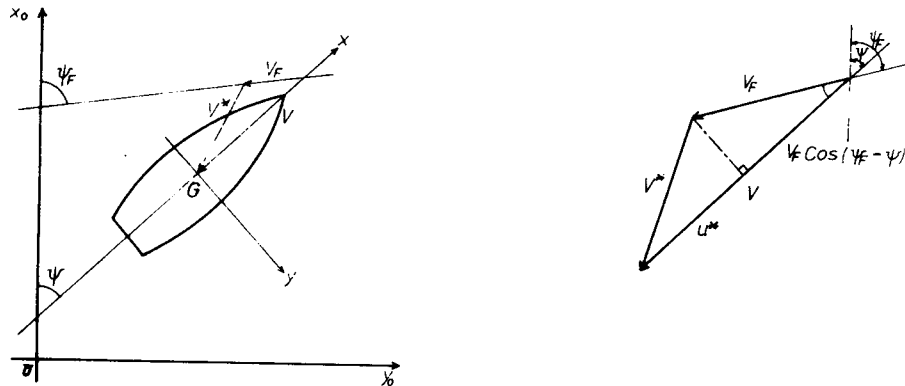


그림 2 - 2 대지속도 (V^*) 와 대수속도 (V) 의 관계

$$\begin{aligned}
 (m + m_x) \dot{u}^* &= X_A \\
 (m + m_y) \dot{v}^* + m_y a_y \dot{r} - m_y l_y \dot{p} &= Y_A \\
 (I_x + J_z) \dot{r} + m_y a_y \dot{v}^* &= N_A \\
 (I_x + J_x) \dot{p} - m_y l_y \dot{v}^* &= K_A
 \end{aligned} \tag{2-7}$$

여기서

$$\begin{aligned}
 X_A &= X + \{ (m + m_y) v - (m + m_x) V_F \sin(\Psi_F - \Psi) \} r \\
 Y_A &= Y - \{ (m + m_x) u - (m + m_y) V_F \cos(\Psi_F - \Psi) \} r \\
 N_A &= N - Yx_c + m_y a_y V_F r \cos(\Psi_F - \Psi) \\
 K_A &= K + Yz_c + \{ m_x l_x u - m_y l_y V_F \cos(\Psi_F - \Psi) \} r - \bar{W} \bar{GZ}(\phi)
 \end{aligned}$$

한편 X, Y, N, K 即 船體에 作用하는 流體力는 粘性流體力와 舵力이며, 이것을 主船體(Hull)에 作用하는 流體力, 舵(Rudder)에 作用하는 流體力 그리고 프로펠라에 기인하는 流體力로 분리하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 X &= X_H + X_R + X_P \\
 Y &= Y_H + Y_R \\
 N &= N_H + N_R \\
 K &= K_H + K_R
 \end{aligned} \tag{2-8}$$

여기서 첨자 H, R, P 는 各各 Hull, Rudder, Propeller의 略字이다.

各 流體力成分은 구체적으로 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned}
 X_H &= X(u) + X_{vr} \phi r + X_{vv} v^2 + X_{rr} r^2 + X_{\phi\phi} \phi^2 \\
 X_R &= -C_{Rx} F_N \cos \delta \\
 X_P &= (1-t) T(J)
 \end{aligned} \tag{2-9}$$

但, $X(u)$ 는 선체저항, $J = u_p / (nD)$, $T(J)$ 는 프로펠라 추력이다.

$$Y_H = Y_v + Y_r r + Y_\phi P + Y_\phi \phi + Y_{vvv} v^3 + Y_{rrr} r^3 + Y_{vvr} v^2 r + Y_{vrr} v r^2 + Y_{v\phi\phi} v^2 \phi + Y_{v\phi v} v \phi^2 + Y_{rr\phi} r^2 \phi + Y_{r\phi\phi} r \phi^2 \quad (2-10)$$

$$Y_R = -(1 + a_H) F_N \cos \delta$$

$$N_H = N_{vv} v + N_r r + N_\phi P + N_\phi \phi + N_{vvv} v^3 + N_{rrr} r^3 + N_{vvr} v^2 r + N_{vrr} v r^2 + N_{v\phi\phi} v^2 \phi + N_{r\phi\phi} r \phi^2 \quad (2-11)$$

$$N_R = -(x_R + a_H x_H) F_N \cos \delta$$

$$K_H = -Y_H \cdot Z_H \quad (2-12)$$

$$K_R = (1 + a_H) Z_R F_N \cos \delta = -Y_R \cdot Z_R$$

但, Z_H, Z_R 은 各各 Y_H, Y_R 의 着力點의 Z 座標,

그리고 F_N 은 舵直壓力(Rudder normal force)으로서 MMG(日本造船學會 操縱運動數學 模型檢討그룹)의 推定式¹⁶⁾을 利用하면

$$F_N = \frac{1}{2} \rho A_R V_R^2 \sin \alpha_R f_\alpha(\wedge) \quad (2-13)$$

이고, V_R 는 舵有效流速로서

$$V_R = \sqrt{u_R^2 + v_R^2}$$

$$u_R = \frac{\varepsilon u_p}{1-S} \sqrt{1 - 2(1-\eta K)S + (1-\eta K)(2-K)S^2}$$

$$u_p = u(1 - W_p) \quad (2-14)$$

$$S = 1 - u_p / (P_R)$$

$$\eta = D/H$$

$$k = k/\varepsilon$$

$$v_R = \gamma(v + Cr \cdot L \cdot r)$$

α_R 은 舵有效流入角으로서

$$\alpha_R = \delta + \tan^{-1}(v_R/u_R) \quad (2-15)$$

$f_\alpha(\wedge)$ 은 揚力係數로서 Fujii의 實驗式¹⁸⁾

$$f_\alpha(\wedge) = \frac{6.13\lambda}{\lambda + 2.25}$$

라 가정한다.

2-3. 潮流海域의 數學모델化

流速이 急變하는 潮流海域을 그림 2-3과 같이 數學모델化하고, 다음과 같이 가정한다.

- (1) 흐름의 狀態는 船體의 存在로 인하여 攪亂되지 않는다.
- (2) 潮流의 흐름은 모든 海域에서 平行하다.
- (3) 潮流의 流速分布는 均一한 第1流速海域帶, 第2流速海域帶, 第1流速海域과 第2流速海域의 境界海域으로 구분되고, 第2流速은 第1流速보다 빠르다.

(4) 上記 境界海域의 幅은 一定하고, 境界海域內的 流速分布는 幅方向으로 直線的으로 變化한다.

船體의 平面運動은 그림 2-3에 나타낸 座標系에 대하여 計算한다. 境界의 幅 B_F 의 中心線上에 空間固定座標系의 原點 O 를 두고, 境界는 x_0 軸에 대하여 ψ_F 의 方向을 가지고, 흐름은 前記의 假定을 만족한다. 船體는 均一한 흐름中에서 境界를 橫斷하여 進行하며, V_{F2} 의 均一한 흐름中으로 進行하는 것으로 한다(그림 2-3 참조).

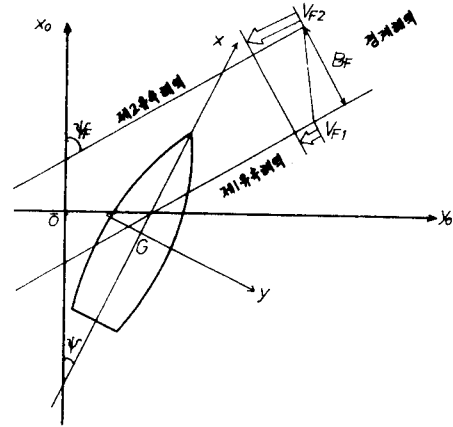


그림 2-3 조류해역과 좌표계

2-4. 潮流海域에서의 流體力 計算方法

流速이 急變하는 潮流海域에서의 流體力 計算方法으로 우선 船體에 作用하는 流體壓의 船體 길이方向 分布를 다음과 같이 假定한다.

$$Y_H = q(v, r, p, \phi) \int_{-L/2}^{L/2} f(\xi) d\xi$$

$$N_H = q(v, r, p, \phi) \int_{-L/2}^{L/2} \xi f(\xi) d\xi \quad (2-16)$$

여기서 v, r, p, ϕ 는 船體의 重心 G의 對水速度成分이고, Y_H, N_H 는 船體의 中心 O 周圍의 流體力이다.

$q(v, r, p, \phi) = Y_H$ 라 假定하면

$$\int_{-L/2}^{L/2} f(\xi) d\xi = 1 \quad (2-17)$$

但, $f(\xi)$ 는 分布函數

ξ_0 를 槪보기 橫着力點이라 하면

$$\xi_0 = \frac{N_H}{Y_H}$$

그러므로

$$\xi_0 = \int_{-L/2}^{L/2} \xi f(\xi) d\xi \quad (2-18)$$

$f(\xi)$ 를 ξ 의 1차식, $f(\xi) = a\xi + b$ 라 假定하면 2-17, 2-18式으로 부터

$$a = 12\xi_0/L^3, \quad b = 1/L$$

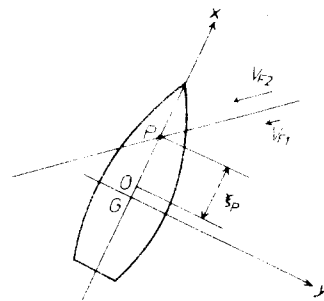
以上の 關係는 船體中心의 對水速度가 V 인 均一한 潮流海域에서 만족되지만, 船體의 一部 (Strip) $d\xi$ 가 이와 같은 狀態에 있는 경우에도 그部分에 關係는 全船體가 同一條件에 있다고 간주하고 위의 關係를 적용시켜 q 와 $f(\xi)$ 를 구하여 Strip에 作用하는 流體力을 求한다.

Strip에 作用하는 流體力을 $Y_H(\xi) d\xi, N_H(\xi) d\xi$ 라 하면 全流體力은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 Y_H &= \int_{-L/2}^{L/2} Y_H(\xi) d\xi \\
 N_H &= \int_{-L/2}^{L/2} N_H(\xi) d\xi
 \end{aligned}
 \tag{2-19}$$

예를 들어, 그림 2-4의 같이 船體中心線과 흐름의境界線과의交點 P의 座標를 ξ_P 라 하고, P의前方流速 V_{F2} 인 곳에 있는部分에 F, 後方流速 V_{R1} 인 곳에 있는部分에 A의 力을 작용시켜서 나타내면 各部分의 流體力은

$$\begin{aligned}
 Y_{HF} &= q_F \int_{\xi_P}^{L/2} f_A(\xi) d\xi \\
 Y_{HA} &= q_A \int_{-L/2}^{\xi_P} f_A(\xi) d\xi \\
 N_{HF} &= q_F \int_{\xi_P}^{L/2} \xi f_A(\xi) d\xi \\
 N_{HA} &= q_A \int_{-L/2}^{\xi_P} \xi f_A(\xi) d\xi
 \end{aligned}
 \tag{2-20}$$



따라서 全船體에 作用하는 流體力은

$$\begin{aligned}
 Y_H &= Y_{HF} + Y_{HA} \\
 N_H &= N_{HF} + N_{HA}
 \end{aligned}
 \tag{2-21}$$

이다(그림 2-4 참조).

그리고 실제의 數值計算에 있어서는 船體를 4개의 Strip으로 나누어서 計算하였다.

그림 2-4 두 조류해역의 경계에 위치한 선체의 좌표계

(부록 1 참조)

2-5. 船體運動의 計算方法

對地運動에 대한 運動方程式 2-7 식에서 各系數를 간단히

$$\begin{aligned}
 (m + m_x) &= A_0 \\
 (m + m_y) &= B_0, \quad m_y a_y = B_1, \quad m_y l_y = B_2 \\
 (I_x + J_2) &= C_0, \quad m_y a_y = C_1 \\
 (I_x + J_x) &= D_0, \quad m_y l_y = D_1
 \end{aligned}
 \tag{2-22}$$

이라고 하면

$$\begin{aligned}
 A_0 \dot{u}^* &= X_A \\
 B_0 \dot{v}^* + B_1 \dot{\tau} + B_2 \dot{p} &= Y_A \\
 C_0 \dot{\tau} + C_1 \dot{v}^* &= N_A \\
 D_0 \dot{p} + D_1 \dot{v}^* &= K_A
 \end{aligned}
 \tag{2-23}$$

그러므로

$$\begin{aligned}
 \dot{u}^* &= \frac{X_A}{A_0} \\
 \dot{v}^* &= \frac{C_0 D_0 Y_A + B_2 C_0 K_A - B_1 D_0 N_A}{C_0 (B_0 D_0 - B_2 D_1) - B_1 C_1 D_0} \\
 \dot{\tau} &= \frac{C_1 D_0 Y_A + B_2 C_1 K_A - (B_0 D_0 - B_2 D_1) N_A}{B_1 C_1 D_0 - C_0 (B_0 D_0 - B_2 D_1)}
 \end{aligned}
 \tag{2-24}$$

$$\dot{p} = \frac{D_1}{D_0} \left\{ \frac{C_0 D_0 Y_A + B_2 C_0 K_A - B_1 D_0 N_A}{C_0 (B_0 D_0 - B_2 D_1) - B_1 C_1 D_0} \right\} + \frac{1}{D_0} K_A$$

이다. 그리고 Auto-pilot 의 수학모델로서

$$\delta^* = -C_1 \Psi - C_2 r' - C_3 y'_o \quad (2-25)$$

를 가정한다.

但, $r' = (\frac{L}{V}) r$, $y'_o = y_o/L$, 舵制限角度는 35° 이다.

그리고 조타기의 수학모델로서

$$\begin{aligned} \dot{\delta} &= (\delta^* - \delta) / T_E ; |\delta^* - \delta| \leq T_E |\dot{\delta}_{\max}| \\ \dot{\delta} &= \text{Sign}(\delta^* - \delta) |\dot{\delta}_{\max}| ; |\delta^* - \delta| > T_E |\dot{\delta}_{\max}| \end{aligned} \quad (2-26)$$

를 가정한다.

但, $T_E = 2.5 \text{ sec}$, $|\dot{\delta}_{\max}| = 3.0 \text{ deg/sec}$ 로 한다.

이것은 보통 채택되고 있는 전동유압식 조타기의 값이다. 그리고 δ^* 는 指令舵角이며, $\dot{\delta}$ 는 操舵角速度이다.

運動의 計算은 逐次積分法을 利用하여 電子計算機에 의해 다음과 같이 計算한다.

[1] 速度 및 角速度

$$u^*(t) = u^*(o) + \sum_{\tau=0}^{t-\Delta t} \dot{u}^*(\tau) \Delta t$$

$$v^*(t) = v^*(o) + \sum_{\tau=0}^{t-\Delta t} \dot{v}^*(\tau) \Delta t$$

$$r(t) = r(o) + \sum_{\tau=0}^{t-\Delta t} \dot{r}(\tau) \Delta t$$

$$p(t) = p(o) + \sum_{\tau=0}^{t-\Delta t} \dot{p}(\tau) \Delta t$$

[2] 位置, 方位角 및 橫搖角

$$\phi(t) = \phi(o) + \sum_{\tau=0}^{t-\Delta t} p(\tau) \Delta t$$

$$\Psi(t) = \Psi(o) + \sum_{\tau=0}^{t-\Delta t} r(\tau) \Delta t$$

$$x_o(t) = x_o(o) + \sum_{\tau=0}^{t-\Delta t} \{u^*(\tau) \cos \phi(\tau) - v^*(\tau) \cos \phi(\tau) \cdot \sin \Psi(\tau)\} \Delta t$$

$$y_o(t) = y_o(o) + \sum_{\tau=0}^{t-\Delta t} \{u^*(\tau) \sin \Psi(\tau) + v^*(\tau) \cos \phi(\tau) \cdot \cos \Psi(\tau)\} \Delta t$$

$$\beta(t) = \tan^{-1} \{-v^*(t)/u^*(t)\}$$

실제의 計算은 船體가 境界海域에 進入하기 前인 第1潮流海域에 있는 狀態에서 始作하여 船體가 轉覆할 때까지 行하였으며, 그 外의 경우에는 境界海域의 중심으로부터 船體 길이의 4 배 정도 나아간 곳까지 行하였다.

本論文에는 $V_{F1} = 0$, 進行時的初期舵角 $\delta_0 = 0$ 의 경우에 대하여計算을 수행한다. 이것은 가장 基本的인 경우이지만, V_{F1} 이 0이 아닐 때에는 第2의流速 V_{F2} 와의速度差 및 船體가 처음부터 潮流中에 있음으로 해서 생기는 漂流角에 기인하는 進入角度的相違를 고려해 주면 된다.



3. 數 值 計 算

3-1. 計算에 利用한 船舶의 主要目 및 流體力 資料.

計算에 利用한 船舶은 代表的인 Container 船型으로서 實선의 길이 175m 이다. 主要目은 表 3-1에, 概略線圖는 그림 3-1에 나타냈다(表 3-1, 그림 3-1 참조).

그리고 流體力資料는 문헌 [3]의 流體力微係數들을 利用하였으며 表 3-2에 나타냈다(表 3-2 참조).

그리고 本船舶의 靜復原 아암 $\overline{GZ}(\phi)$ 는 桑野研^[9]의 근사추정법(부록 2 참조)을 利用하여 구하였으며, $\overline{GM}=0.5\text{m}$ 의 경우 $\overline{GZ}(\phi)$ 의 값을 계산하여 그림 3-2에 表示하였다.

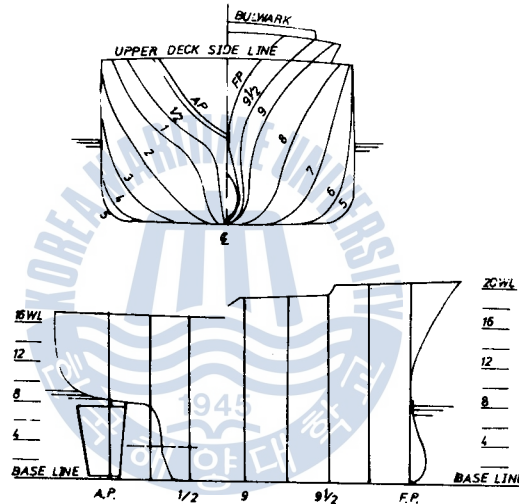


그림 3-1 계산에 이봉한 선박의 개략선도

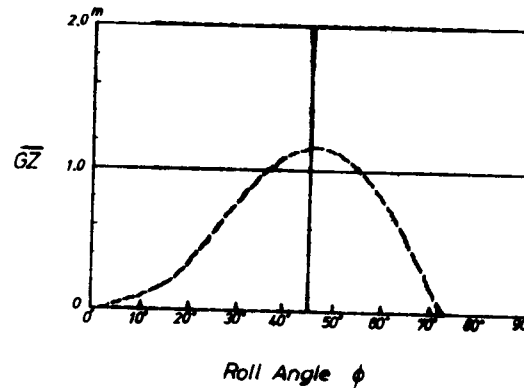


그림 3-2 \overline{GZ} 곡선 ($\overline{GM}=0.5\text{m}$ 의 경우)

표 3 - 1 계산에 이용한 실박의 주요특

ITEMS			ACTUAL	MODEL
Hull	Length B. P.	L(m)	175.00	3.00
	Breadth	B(m)	25.40	0.435
	Draft Fore	d_F (m)	8.00	0.1371
	Aft	d_A (m)	9.00	0.1543
	Mean	d(m)	8.50	0.1457
	Displacement volume	(m^3)	21,222	0.10686
	Height from keel to transverse metacenter	KM(m)	10.39	0.1781
	Height from keel to center of buoyancy	KB(m)	4.6154	0.07912
	Block coefficient	C_B		0.559
	Prismatic coef.	C_P		0.580
	Waterplane area coef.	C_W		0.686
	Midship section coef.	C_M		0.966
	L.C.B. from F.P.			0.518L
	Radius of gyration about z axis			0.240L
Bilge keel				
	Length	(m)	43.75	0.75
	Depth	(cm)	45.0	0.7714
	Rudder Area	$A_R(m^2)$	33.036	0.009709
	Height	H(m)	7.7583	0.133
	Aspect ratio	A		1.8219
	Area ratio	A_R/Ld		1/45.0
Propeller				
	Diameter	D(m)	6.533	0.112
	Pitch ratio	P		1.009
	Expanded area ratio			0.67
	Boss ratio			0.18
	Number of blade			5

표 3 - 2 유체력 미계수

a) HULL ONLY

X_{uu}	-0.0004226	Y_v	-0.0116	N_v	-0.0038545
X_{vv}	-0.00386	Y_r	0.00242	N_r	-0.00222
X_{rr}	0.0002	$Y_{\dot{\theta}}$	0.0	$N_{\dot{\theta}}$	0.000213
$X_{\dot{\theta}\dot{\theta}}$	-0.0002	$Y_{\dot{\phi}}$	-0.000063	$N_{\dot{\phi}}$	-0.0001424
X_{vr}	-0.00311	Y_{vvv}	-0.109	N_{vvv}	0.001492
K_T	0.527-0.455J	Y_{rrr}	0.00177	N_{rrr}	-0.00229
		Y_{rvv}	0.0214	N_{rvv}	-0.0424
		Y_{rrv}	-0.0405	N_{rrv}	0.00156
		$Y_{vv\dot{\theta}}$	0.04605	$N_{vv\dot{\theta}}$	-0.019058
		$Y_{v\dot{\theta}\dot{\theta}}$	0.00304	$N_{v\dot{\theta}\dot{\theta}}$	-0.005376
		$Y_{rr\dot{\theta}}$	0.009325	$N_{rr\dot{\theta}}$	-0.003859
		$Y_{r\dot{\theta}\dot{\theta}}$	-0.001368	$N_{r\dot{\theta}\dot{\theta}}$	0.0024195
m'	0.00792	I_z	0.000456		
m'_x	0.000238	J_z	0.000419		
m'_y	0.007049	α'_v	0.05		
I_x	0.0000176				
J_x	0.0000034				

b) PROPELLER AND RUDDER

N_p	79.1(Fn 0.2)	a_H	0.237	E	1.0
	118.64(Fn 0.3)	x_H	-0.48	k	0.600
	158.19(Fn 0.4)	C_{RX}	0.71	r	0.4
$(1-t)$	0.825	C_L	-1.0	x'_R	-0.5

3 - 2. 計算結果의 檢討

우선 流速이 急變하는 潮流海域을 橫斷할 때의 運動經過의 例를 그림 3-3에 나타냈다.

그림 3-3은 $\overline{GM}=0.5m$, 境界의 幅 B_r 가 船体길이의 3/4인 경우로서 船舶의 初速(V_{F1} 流速中的 對地速度) $V_o=8.283m/sec$ ($F_n=0.2$), 第1流速 $V_{F1}=0m/sec$, 第2流速 $V_{F2}=8.283m/sec$, 流向 $\psi_r=60^\circ$ 인 때의 船体重心의 軌跡이다. 船体는 舵의 作用에도 불구하고 潮流의 方向으로 回頭를 계속한다.

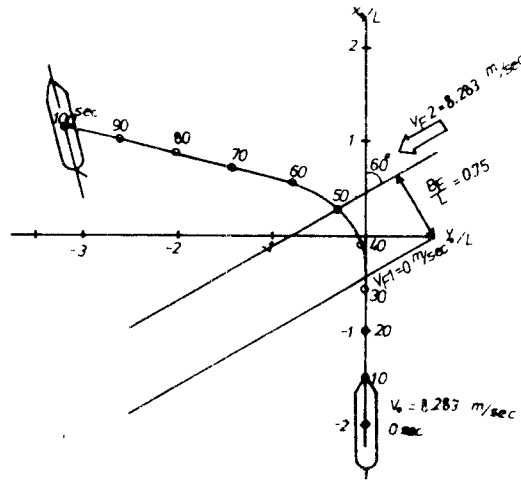


그림 3-3 조류해역을 횡단하는 선체중심의 궤적

以下 여러 환경조건下에서 船體의 舉動을 종합적으로 評價하기 위해 潮流海域을 橫斷할 때의 最大橫揺角과 最大回頭角速度의 크기를 比較 檢討하여, 어떠한 條件下에서 運動이 격심하게 일어나는지를 파악하였다.

그림 3-4는 最大橫揺角 ϕ_{max} 와 最大回頭角速度 r'_{max} 에 미치는 船體의 初期進入速度의 影響을 나타낸다. 豫想했던 바와 같이 境界海域에로의 進入速度가 增加함에 따라 ϕ_{max} 와 r'_{max} 는 急增加하는 것으로 나타낸다. 그림은 $\overline{GM}=0.5m$, 流向 $\psi_F=60^\circ$, 第2流速이 各各 $4.141m/sec$ ($F_n=0.1$), $8.283m/sec$ ($F_n=0.2$), $12.424m/sec$ ($F_n=0.3$)인 경우이다.

그림 3-5는 流速差의 影響을 나타낸다. V_{F1} , V_{F2} 의 流速差가 클수록 ϕ_{max} 와 r'_{max} 는 增加한다. 流速差의 影響도 船體의 進入速度의 影響과 거의 같은 경향이다. 그림에서는 $\overline{GM}=0.5m$, $V_{F1}=0m/sec$, ψ_F 는 各各 $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 인 경우이다.

그림 3-6은 境界海域의 幅의 影響을 나타낸다. 船體進入速度와 流速差가 작은 範圍에서는 境界海域의 幅의 影響도 작다.

그림 3-7은 流向의 影響을 나타낸다. 이 경우는 ψ_F 가 작은 범위에서 船體運動이 적게 일어난다.

그림 3-8은 船體의 \overline{GM} 의 影響을 나타낸다. \overline{GM} 이 감소하면 復原力이 감소하게 되므로 ϕ_{max} 가 增加하게 된다.

한편 ϕ_{max} 또는 r'_{max} 가 일어나는 시각은 船體가 潮流의 흐름을 正橫方向에서 받게 되는 때이고, 이때 船體에 最大의 流体力이 作用하게 된다.

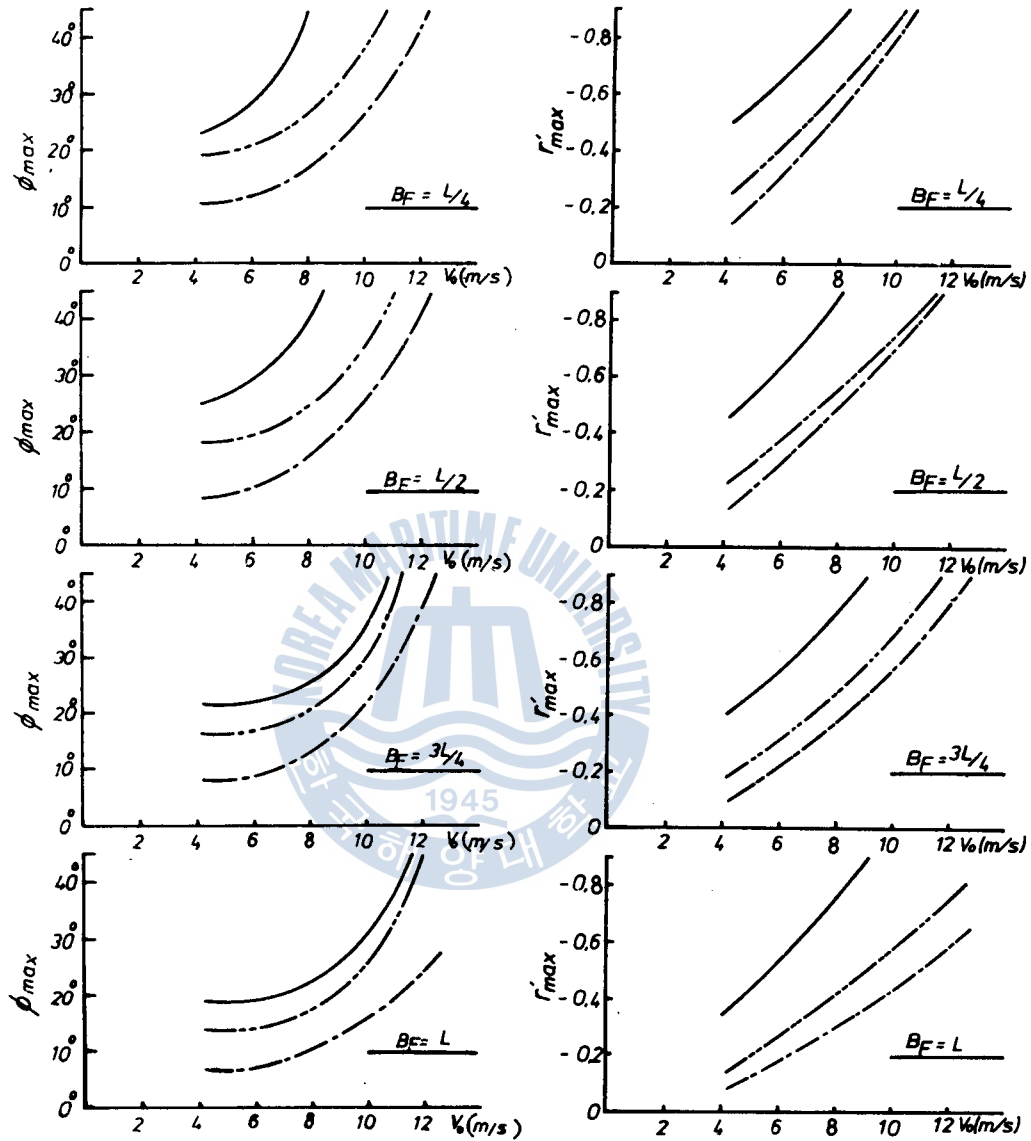


그림 3 - 4 횡요각과 회두각속도에 미치는
진입속도의 영향

$\gamma F = 50^\circ$
 $V_{F1} = 0 \text{ m/sec}$
 $GM = 0.5 \text{ m}$
 $V_{F2} =$
 — 12.424 m/sec
 - - - 8.283 m/sec
 - · - 4.141 m/sec

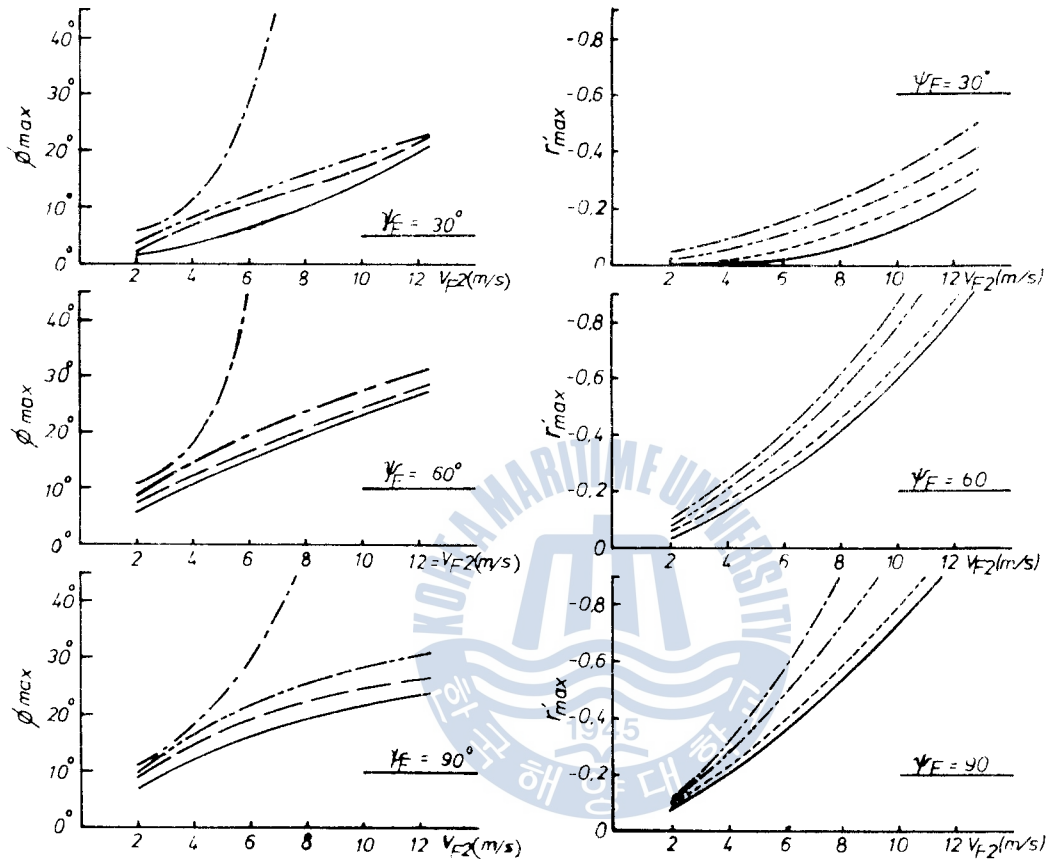


그림 3 - 5 횡요각과 회두각속도에 미치는 유속하의 영향

$V_0 = 8.283 \text{ m/sec}$
 $V_{CF} = 0 \text{ m/sec}$
 $\overline{GM} = 0.5 \text{ m}$
 $B_F =$
 - - - - $L/4$
 - - - - $L/2$
 - · - · - $3L/4$
 ——— L

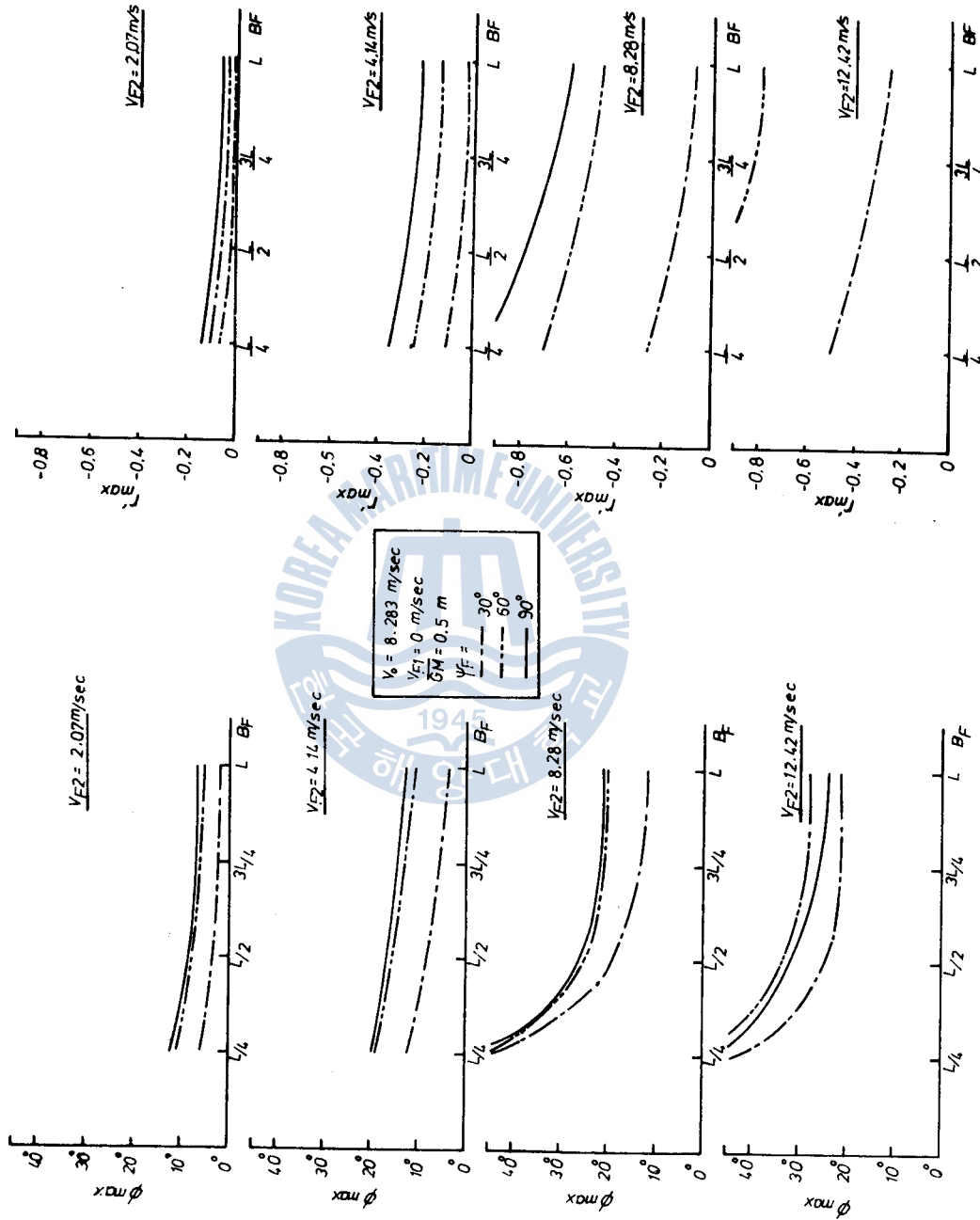
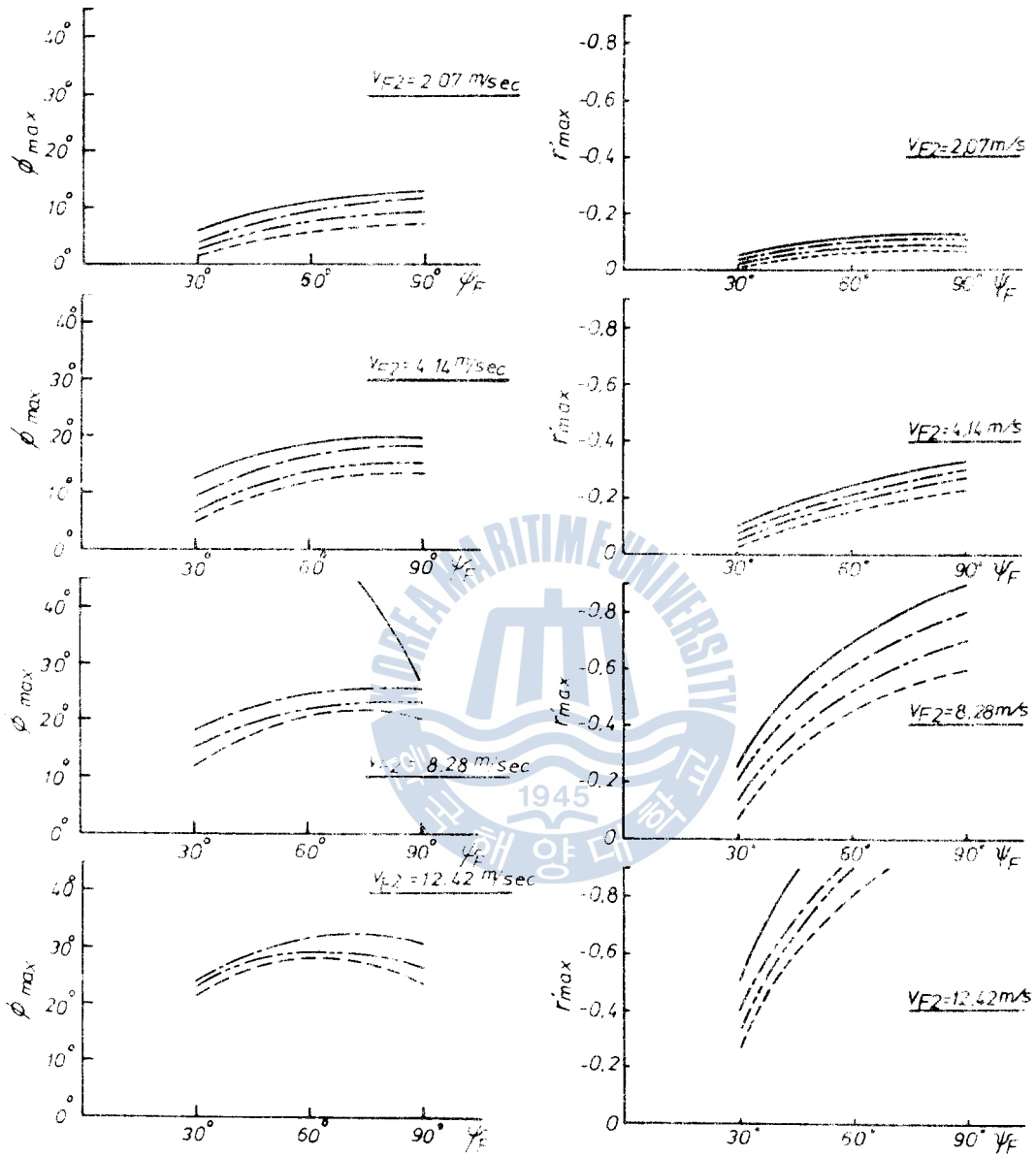


그림 3-6 횡요각과 회두각속도에 미치는 경계해역의 폭의 영향



$V_0 = 8.283 \text{ m/sec}$
 $V_{F1} = 0 \text{ m/sec}$
 $\bar{S}M = 0.5 \text{ m}$
 $B_F =$
 ——— $L/4$
 - - - - $L/2$
 - · - · $3L/4$
 ····· L

図 3-1-1 浪高が 8.283 m/sec に 0 m/sec の風速の影響

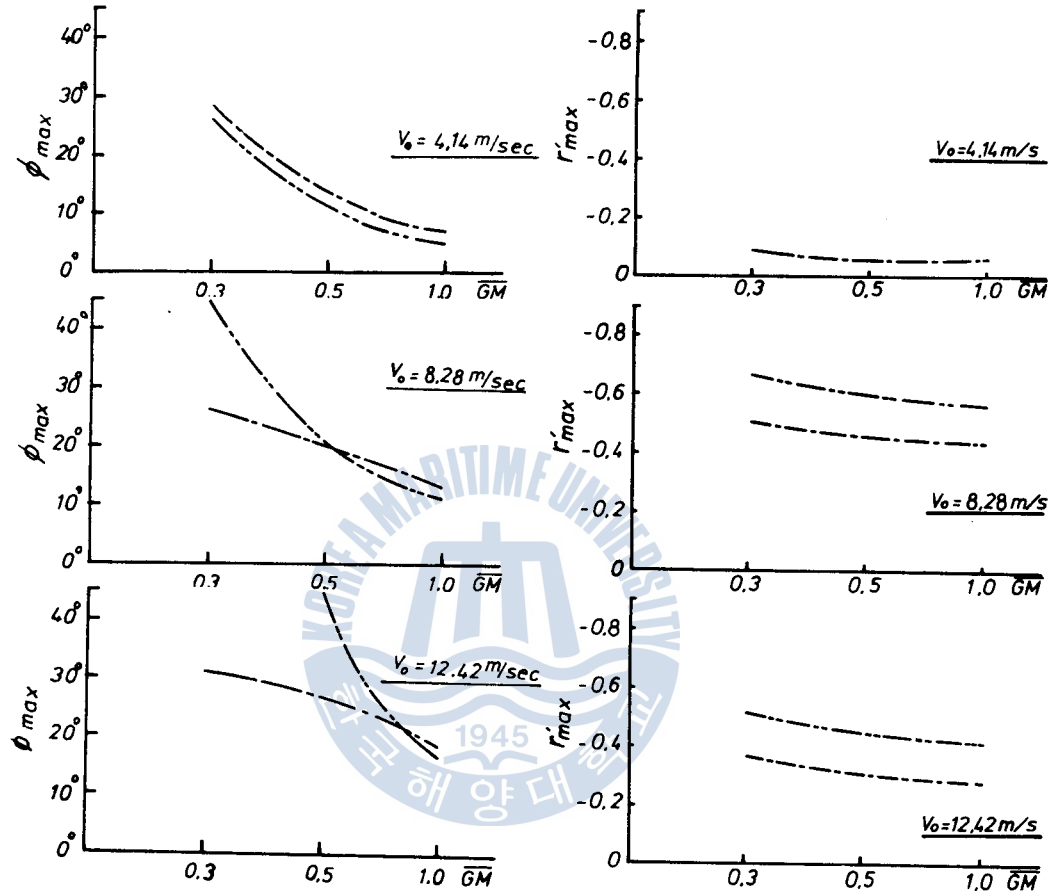


그림 3 - 8 횡요각과 회두각속도에 미치는
GM의 영향

$V_{F1} = 0 \text{ m/sec}$
 $V_{F2} = 8.28 \text{ m/sec}$
 $B_F = L$
 $V_F =$
 - - - 60°
 - · - 90°

4. 結 論

流速이急變하는潮流海域을수식모델化하여, 이海域을橫斷하는船舶의舉動을수치시뮬레이션에의해計算한結果다음과같은結論을얻었다.

- (1) 境界海域을通過하는時間이길면最大橫搖角 ϕ_{max} 및最大回頭角速度 r'_{max} 는작아진다. 即 船速이저속이고, 境界海域의幅이크면 ϕ_{max} 및 r'_{max} 는작아진다.
- (2) 境界海域에進入後, 船體가큰回頭角速度를가지지않는편이 ϕ_{max} 가작아진다. 即 流速差가작은편이 ϕ_{max} 가작아지고, 流向 ψ_f 가작은편이 ϕ_{max} 가작아진다.
- (3) \overline{GM} 의증감은특히 ϕ_{max} 에큰影響을준다.



參 考 文 獻

- 1) 本田啓之輔他：來島海峽の渦流が操船に及ぼす影響，日本航海學會志(論文集)，第45號，1971年8月
- 2) 小川陽弘：強潮流域における船の轉覆について，日本航海學會志(論文集)，第57號，1978年8月
- 3) 係景浩：高速コンテナ船の操縦運動と横揺れの連成舉動について，日本造船學會論文集，第150號，1981年
- 4) H. Eda：Rolling and Steering Performance of high speed Ships, 13th O. N. R. Symposium (1980), Session IV - 4
- 5) M. Hirano and J. Takashina：A Calculation of Ship Turning Motion Taking Coupling Effect due to Heel into Consideration, J. of S. N. A. of Western Japan, No. 59(1980), p. 71-81
- 6) 小川陽弘，長谷川和彦，芳村康男：M M G報告—操縦運動數學モデルの實驗的檢證と改良，日本造船學會志 616號，1980
- 7) J. N. Newman：Marine Hydrodynamics, MIT Press, 1978, p. 135-140
- 8) 藤井齊，津田達雄：自航模型による舵特性の研究(2)，日本造船學會論文集，第110號，1961年
- 9) 桑野研一：復原力近似計算について，日本西部造船會會報，第13號，1957
- 10) 元良誠三：船体と海洋構造物の運動學，成山堂，1982, p. 26



附 錄

1. 潮流海域을橫斷하는船體의運動計算알고리즘
2. 靜復原아암 $GZ(\phi)$ 의 近似推定法



〔附錄 1〕 流速變化가 있는 潮流海域을 橫斷하는 船體의 運動計算알고리즘

流速變化가 있는 潮流海域을 橫斷할 때 船體의 對水速度가 船體길이方向으로 달라지므로, 數值計算에 어려움이 없을 정도로 船體를 四等分하여 計算하였다. 그림 A-1에서 船體의 各等分點의 座標와 船首尾線과 境界線의 交點은 아래와 같다.

우선 船體의 무게重心의 座標(P_0)를 x_0, y_0 로 두면 船體의 中心(\mathcal{C})의 座標(P_1)은

$$x_1 = x_0 + x_M \cos \psi$$

$$y_1 = y_0 + x_M \sin \psi$$

但, x_M 은 重心 G 에서 본 中心 O 의 x 座標이다.

그리고 船首($L/2$)의 座標(P_2)은

$$x_2 = x_1 + \frac{L}{2} \cos \psi$$

$$y_2 = y_1 + \frac{L}{2} \sin \psi$$

이고, 船體前方($L/4$)의 座標(P_3)은

$$x_3 = x_1 + \frac{L}{4} \cos \psi$$

$$y_3 = y_1 + \frac{L}{4} \sin \psi$$

이고, 船體後方($-L/4$)의 座標(P_4)은

$$x_4 = x_1 - \frac{L}{4} \cos \psi$$

$$y_4 = y_1 - \frac{L}{4} \sin \psi$$

이고, 船尾($-L/2$)의 座標(P_5)은

$$x_5 = x_1 - \frac{L}{2} \cos \psi$$

$$y_5 = y_1 - \frac{L}{2} \sin \psi$$

이다. 그리고 第1境界線($x = \cot \psi_F \cdot y - B_F/2 \sin \psi_F$)과 船首尾線($x = \cot \psi \cdot y + x_0 - \cot \psi \cdot y_0$)의 交點(P_6)은

$$x_6 = \frac{\cot \psi_F (x_0 - \cot \psi \cdot y_0) + \cot \psi (B_F/2 \sin \psi_F)}{\cot \psi_F - \cot \psi}$$

$$y_6 = \frac{x_0 - \cot \psi \cdot y_0 + B_F/2 \sin \psi_F}{\cot \psi_F - \cot \psi}$$

이며, 第2境界線($x = \cot \psi_F \cdot y + B_F/2 \sin \psi_F$)과 船首尾線의 交點(P_7)은

$$x_7 = \frac{\cot \psi_F (x_0 - \cot \psi \cdot y_0) + \cot \psi (B_F/2 \sin \psi_F)}{\cot \psi_F - \cot \psi}$$

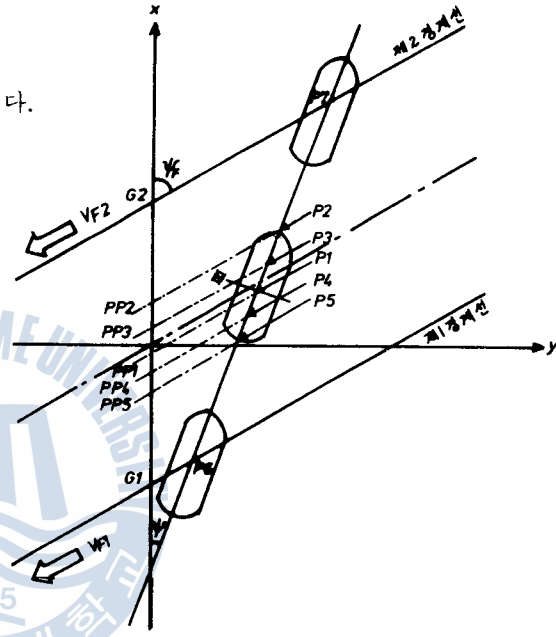


그림 A-1 조류해역

$$y_1 = \frac{x_0 - \cot \psi \cdot y_0 + B_f / 2 \sin \psi_f}{\cot \psi_f - \cot \psi}$$

이다. 그리고各等分點을境界線과平行하게移動한 x 의 절편은

$$PP1 = x_1 - \cot \psi_f \cdot y_1$$

$$PP2 = x_2 - \cot \psi_f \cdot y_2$$

$$PP3 = x_3 - \cot \psi_f \cdot y_3$$

$$PP4 = x_4 - \cot \psi_f \cdot y_4$$

$$PP5 = x_5 - \cot \psi_f \cdot y_5$$

이며, 第1,2境界線의 절편을 G_1, G_2 로 한다. 따라서流速計算은 그림에서처럼 크게 3가지 경우로 구분하여 각 경우에 대해各等分點에서의流速을 구한後, 等分에作用하는平均流速을 구한다. 예를들면船體가境界域內에 있는 경우, 即 $PP2 > G2, PP5 > G1$ 인 경우로各等分點에서의流速을 구하면 아래와 같다.

$$V_{FA} = \frac{PP2 - G1}{G2 - G1} \times (V_{F2} - V_{F1})$$

$$V_{FB} = \frac{PP3 - G1}{G2 - G1} \times (V_{F2} - V_{F1})$$

$$V_{FC} = \frac{PP3 - G1}{G2 - G1} \times (V_{F2} - V_{F1})$$

$$V_{FD} = \frac{PP4 - G1}{G2 - G1} \times (V_{F2} - V_{F1})$$

$$V_{FE} = \frac{PP5 - G1}{G2 - G1} \times (V_{F2} - V_{F1})$$

여기서 $V_{FA}, V_{FB}, V_{FC}, V_{FD}, V_{FE}$ 는各各船首, 船體前方 $L/4$, 船體中心, 船體後方 $L/4$, 船尾에서의流速이다. 그러므로各等分에서의平均流速은 다음과 같다.

$$V_{FAB} = \frac{V_{FA} + V_{FB}}{2}$$

$$V_{FBC} = \frac{V_{FB} + V_{FC}}{2}$$

$$V_{FCD} = \frac{V_{FC} + V_{FD}}{2}$$

$$V_{FDE} = \frac{V_{FD} + V_{FE}}{2}$$

여기서 $V_{FAB}, V_{FBC}, V_{FCD}, V_{FDE}$ 는各各船首에서船體前方 $L/4$, 船體前方 $L/4$ 에서船體中心, 船體中心에서船體後方 $-L/4$, 船體後方 $-L/4$ 에서船尾까지의平均流速이다. 그리고다른 경우에도上記의方法으로서 계산하므로省略한다.

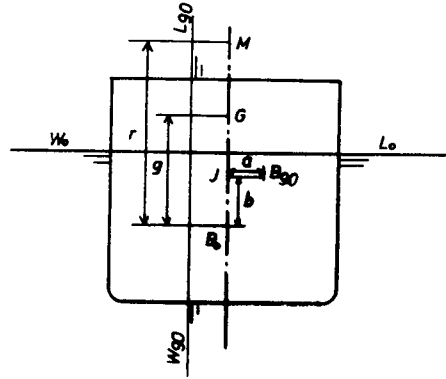


그림 A-2 횡경사도

〔附錄 2〕 靜復原아암 $\overline{GZ}(\phi)$ 의 近似推定法

橫揺角이 少角度 即 15° 以下인 경우에는 수직현측선으로 가정하여 다음과 같이 가정한다.

$$\overline{GZ}(\phi) = \sin(\phi) \left\{ \overline{GM} + \frac{1}{2} \overline{BM} \tan^2 \phi \right\} \quad (1)$$

그리고 橫揺角이 大角度 即 15° 以上인 경우에는 桑野研一의 方法으로 다음과 같이 추정한다.

그림 A-2에서 $W_0 L_0$, $W_{90} L_{90}$ 은 各各 경사각이 0° , 90° 일때의 水線이며, M 은 Metacenter, G 는 무게重心, B_0 , B_{90} 은 各各 경사각이 0° , 90° 일때의 浮力의 中心이다.

$b = g$ 라 가정하고, $x = \frac{\pi}{2} - \phi$ 라 두었을때 桑野의 式은 다음과 같다.

$$\overline{GZ}(x) = F_1(x)a + F_2(x)b + F_3(x)r + F_4(x)m \quad (2)$$

여기서

$$F_1(x) = 2.14359x + 4.14997x^2 - 7.25756x^3 + 1.65523x^5$$

$$F_2(x) = -2.07055x - 1.91120x^2 + 4.06365x^3 - 0.86577x^5 + \cos x$$

$$F_3(x) = -0.07433x - 2.37334x^2 + 3.41892x^3 - 0.84209x^5 - \cos x$$

$$F_4(x) = \cos x$$

이다. $b \neq g$ 인 일반적인 경우에 靜復原아암 $\overline{GZ}(\phi)$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$\overline{G'Z}'(\phi) = \overline{GZ}(\phi) - \overline{GJ} \sin \phi \quad (3)$$

但, $\overline{GJ} = m - \overline{GM}$, $\overline{G'Z}'(\phi) : b \neq g$ 인 경우의 $\overline{GZ}(\phi)$

그리고 2식에서 $r = \overline{B_0 M} = \overline{BM}$

$$m = \overline{JM} \quad (b = g \text{ 일때의 } \overline{GM})$$

이며, a , b 는 문헌 [10]의 prediction chart로 부터 구한다. 따라서 (1)(2)(3)식에서 구한 靜復原아암 $\overline{GZ}(\phi)$ 를 $\overline{GM} = 0.5m$ 인 경우에 對해 그림 3-2에 나타냈다.