工 學 碩 士　學 位 論 文

풍압력하에서의 예선·피예선계의 침로안정성에 관한 연구

A Study on Course Stability of Towing and Towed Vessels System under Wind Pressure

指導敎授　孫景浩

2000年 2月

韓國海洋大學校 大學院

造船工學科

金 龍 起

목 차

Abstract ···································· 1

Nomenclature ································ 2

List of Figures ······························ 7

List of Tables ······························· 7

1. 서언 ······································ 8

2. 예선·피예선계의 운동방정식 및 수학모델 ··············· 9

2.1 좌표계 및 운동방정식의 정식화 ······················ 9

2.2 수학모델 ································· 12

2.2.1 유효추력 ······························ 12
2.2.2 주선체에 작용하는 동유체력 ·················· 12
2.2.3 타에 작용하는 유체력 ······················ 13
2.2.4 풍압외력 ······························ 14
2.2.5 예항삭의 장력 ·························· 15

3 **침로안정성** ·· 17

4. **수치계산 및 고찰** ································· 24

5. **결언** ··· 43

6. **참고문헌** ·· 44

A Study on Course Stability of Towing and Towed Vessels System under Wind Pressure

by

Yong Ki Kim

Department of Naval Architecture

Graduate School of Korea Maritime University

Abstract

The author discusses the problem on course stability of towed ship under severe wind pressure. The characteristic equation to assess the stability on course, is derived from sway and yaw coupled motions of towing and towed vessels with wind effect. Through the numerical calculation on course stability of towing and towed vessels system, the relationship between the course stability of a towed ship and wind direction or towrope length, is clarified with the parameter of wind speed in terms of Beaufort number. Two types of towed vessel, such as a bulk carrier and a passenger liner, are applied and examined. The major results are as follows. The course stability of towed vessel under wind pressure depends on the inherent course stability of the vessel herself. The towed vessel will be much unstable for the range from beam to quarter wind in relatively high wind speed. The length of towrope has also great infulence upon the stability. Long towrope will be able to stabilize for all range of wind direction in relatively low wind speed or for the head wind in relatively high wind speed.

Nomenclature

a_0	Distance from midship to towing point
a_H	Ratio of lateral force induced on hull by rudder to rudder normal force
$A_R / L d$	Area ratio of rudder
A_L	Lateral projected area of ship
A_R	Projected area of rudder
A_{ss}	Lateral projected area of superstructure
A_T	Transverse projected area of ship
B	Moulded breadth of ship
C	Rudder chord length
C_b	Block coefficient
C_F	Coefficient of rudder force
C_N	Yawing wind moment coefficient
C_T	Total resistance coefficient
C_X	Fore and aft wind force coefficient
C_Y	Lateral wind force coefficient
D	Diameter of propeller
d	Draft of ship
f_1	Distance from midship to towed point
F_N	Rudder nomal force

K_2	Autopilot constant
H_R	Height of Rudder
I_{zz}	Moment of inertia about z axis
J_{zz}	Added moment of inertia about z axis
K_1	Autopilot constant
l	Length of towrope
l_d	Course stability lever
L_{OA}	Length overall of ship
L	Length between perpendiculars
M	Number of distant groups of masts of kingposts seen in lateral projection
m	Mass of a ship
m_x	Added mass in x direction
m_y	Added mass in y direction
n	Number of propeller revolution per second
N	Yaw moment
N_β	Linear derivative of hydrodynamic yaw moment with respect to sway angle
N_H	Yaw moment induced by hull
N_R	Yaw moment induced by rudder
N_r	Linear derivative of hydrodynamic yaw moment with respect to yaw rate
N_T	Yaw moment induced by towrope

N_W	Yaw moment due to wind
R	Resistance of ship
r	Yaw rate
$\dot{r}$	Time derivative of r
S	Length of perimeter of lateral projection of vessel, excluding waterline and slender bodies such as masts and ventilators
s	Propeller slip ratio
S_A	Wetted surface area of a hull
T	Tension force of towrope
u	Longitudinal component of ship speed V
$\dot{u}$	Time derivative of u
v	Sway velocity of a ship
$\dot{v}$	Time derivative of v
V	Ship's resultant speed
V_w	Absolute wind speed
V_A	Relative wind speed
X	Surge force
X_W	Longitudinal force due to wind
X_H	Longitudinal force induced by hull
X_P	Longitudinal force acting on hull induced by propeller
X_R	Longitudinal force acting on hull induced by rudder

X_T	Longitudinal force induced by a towlrope
Y	Sway force
Y_β	Linear derivative of lateral hydrodynamic force with respect to sway angle
Y_H	Lateral force induced by hull
Y_R	Lateral force induced by rudder
Y_r	Linear derivative of lateral hydrodynamic force with respect to yaw rate
Y_T	Lateral force induced by towrope
Y_W	Lateral force due to wind

Greek

α_R	Effective inflow velocity to rudder
β	Drift angle
γ	Flow staraightening effect coefficient
δ	Rudder angle
η	D / H_R
λ	Aspect ratio of rudder($\lambda = H_R / C$)
ρ	Density of sea water
ρ_A	Density of air
ψ	Heading angle
ψ_A	Angle of relative wind off bow
ψ_w	Angle of absolute wind direction

List of Figures

Fig. 1 Coordinate systems ·· 8
Fig. 2 Projected plans of tug boat ································ 22
Fig. 3 Projected plans of bulk carrie ····························· 23
Fig. 4 Projected plans of passenger liner ·························· 23
Fig. 5 Wind force and moment coefficients estimated
by Isherwood's empirical equations(tug boat) ················ 25
Fig. 6 Wind force and moment coefficients estimated
by Isherwood's empirical equations(bulk carrier) ·········· 26
Fig. 7 Wind force and moment coefficients estimated
by Isherwood's empirical equations(passenger liner) ······ 27
Fig. 8 Course Stability of towed vessel as function of
length of tow line and wind direction(bulk carrier) ······ 30
Fig. 9 Course Stability of towed vessel as function of
length of tow line and wind direction(passenger liner) ·· 34

List of Tables

Table 1 Principal dimensions of tow and towed vessels ········ 24
Table 2 WMO code 1100 ·· 28
Table 3 Inherent course stability lever of towed vessels ········ 28

1. 서언

항만내와 해역같이 많은 선박이 항행중인 지역에서는 항행중인 선박이 충돌, 좌초, 고장 등의 해난사고의 위험성이 높고 특히 항행의 안정성이 중요하게 요구된다. 이러한 해역에서 자항불능된 선박은 안전항행을 위한 속도와 안전한 장소까지 이르지 못하기 때문에 선박은 보다 큰 해난사고로의 진행을 막고, 아울러 주위를 항행하는 다른 선박의 안전을 위하여 신속하게 다른 안전한 장소로의 이동이 요구된다. 최근 IMO(국제해사기구의 약칭)에서도 해양오염방지의 관점에서 조종불능이 된 대형탱커의 표류 및 예항 문제와 관련하여 많은 검토가 이루어지고 있다〔1〕. 예항 문제에서 주요 관심 사항은 예항방법, 예항설비, 피예선의 침로안정성 문제 등을 들 수 있을 것이다.

피예선의 침로안정성은 선박의 왕래가 빈번한 연안해역에서는 특히 중요한 문제로서, 지금까지의 연구로서는 Benford〔2〕, Inoue〔3〕, Kijima〔4〕 등의 연구성과가 있다. 이들 연구에 의하면 침로안정성은, 예선과 피예선의 크기, 예항삭의 길이, 예항점의 위치 등의 영향은 물론이고, 예선·피예선의 유체역학적인 특성과 외력의 영향을 크게 받는다고 알려져 있다. 외력으로서는 바람, 파도, 조류 등을 들 수 있는데, 예항시에는 일반적으로 저속항행을 하게 되므로 특히 바람의 영향이 지배적이다〔4〕.

본 논문에서 선형은 벌크선(bulk carrier)과 여객선(passenger liner)을 대상으로 삼았고 외력으로서는 파도가 충분히 발달되지 않은 초기상태 또는 저속으로 항행하는 상태를 고려하여 바람의 영향만을 취급하였다.

본 논문에서는 피예선이 조종불능이 되었을 때를 가상하고, 예선·피예선계의 침로안정성에 미치는 풍향, 풍속, 예항삭의 길이의 영향을 이론적으로 검토하고, 풍압력하에서의 조종불능인 선박을 다른 안전한 장소로 예항하고자 할 때의 안전운항지침을 개발하고자 한다.

2. 예선 · 피예선계의 운동방정식 및 수학모델

먼저 예선 · 피예선계에 관해서 다음 가정이 성립되는 것으로 한다.

(1) 예항삭은 항상 일직선 상태이고 예항삭의 질량과 탄성은 무시된다.
(2) 예선과 피예선의 상호간섭영향은 예항삭에 의한 것만을 생각한다.
(3) 피예선은 자항 능력이 없으며 조타를 하지 아니한다.

2.1 좌표계 및 운동방정식의 정식화

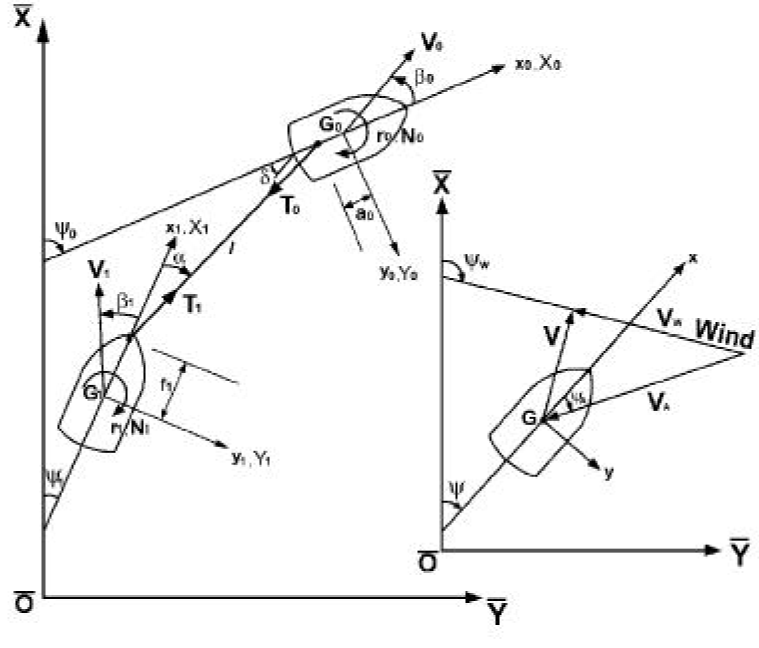


Fig. 1 Coordinate systems

Fig. 1의 좌표계에서 선박의 조종운동은 지구상에 고정된 고정좌표계 $\overline{O}$ - $\overline{X}\ \overline{Y}$ 와 선체의 중심에 원점을 잡은 이동좌표계 G - xy 에 대해서 기술되어진다. Fig. 1에서 예선 · 피예선계의 조종운동방정식은 다음과 같다 〔5〕, 〔6〕. 단, 선체고정좌표계의 원점은 각 선박의 무게중심에 취한다.

$$(m_i + m_{xi})\dot{u}_i - (m_i + m_{yi})v_i r_i = X_i$$

$$(m_i + m_{yi})\dot{v}_i + (m_i + m_{xi})u_i r_i = Y_i \qquad (1)$$

$$(I_{zi} + J_{zi})\dot{r}_i = N_i$$

여기서 첨자 i는 예선, 피예선을 나타내는데, $i = 0$은 예선, $i = 1$은 피예선을 의미하는 것으로 한다. 그리고 m은 선체질량, m_x, m_y는 각각 x, y축 방향 부가질량, I_z와 J_z는 각각 z축 주위의 관성모멘트와 부가관성모멘트, u, v는 x, y축 방향 속도성분, r는 회두각속도, X, Y, N은 선체에 작용하는 동유체력과 외력의 x, y축 방향 성분 및 z축 주위의 모멘트성분을 나타낸다. 또, V는 선속, V_A는 상대풍속, V_w는 절대풍속을 나타내고, ψ_w는 절대풍향, ψ_A는 상대풍향을 나타내며, β, r은 각각 편각과 회두각속도를 나타낸다.

식(1)을 무차원화 하고 속도성분 u, v대신에 편각(사항각) β를 써서 표현하면 다음과 같다.

$$(m_i' + m_{xi}')\left(\frac{L_i}{V_i}\right)\left(\frac{\dot{V}_i}{V_i}\cos\beta_i - \dot{\beta}_i\sin\beta_i\right) + (m_i' + m_{yi}')r_i'\sin\beta_i = X_i'$$

$$-(m_i' + m_{yi}')\left(\frac{L_i}{V_i}\right)\left(\frac{\dot{V}_i}{V_i}\sin\beta_i + \dot{\beta}_i\cos\beta_i\right) + (m_i' + m_{xi}')r_i'\cos\beta_i = Y_i' \qquad (2)$$

$$(I_{zi}' + J_{zi}')\left(\frac{L_i}{V_i}\right)\left(\frac{\dot{V}_i}{V_i}r_i' + \dot{r}_i'\right) = N_i'$$

여기서 V는 합속도를 의미하며, 무차원화는 다음과 같다.

$$m_i', m_{xi}', m_{yi}' = m_i, m_{xi}, m_{yi} / \left(\frac{1}{2}\rho L_i^2 d_i\right)$$

$$I_{zi}' , J_{zi}' = I_{zi} , J_{zi} / \left(\frac{1}{2} \rho L_i^4 d_i \right)$$

$$X_i' , Y_i' = X_i , Y_i / \left(\frac{1}{2} \rho L_i d_i V_i^2 \right) \qquad (3)$$

$$N_i' = N_i / \frac{1}{2} \rho L_i^2 d_i V_i^2$$

$$r_i' = r_i (L_i / V_i)$$

여기서 L , d 는 선체길이와 평균흘수, ρ 는 해수의 밀도이다.

식(2)에서 우변의 동유체력 및 외력 항은 다음과 같이 표시된다.

$$X_i' = X_{Pi}' + X_{Hi}' + X_{Ri}' + X_{Ti}' + X_{Wi}'$$

$$Y_i' = Y_{Hi}' + Y_{Ri}' + Y_{Ti}' + Y_{Wi}' \qquad (4)$$

$$N_i' = N_{Hi}' + N_{Ri}' + N_{Ti}' + N_{Wi}'$$

여기서 첨자 P , H , R , T , W 는 각각 선박 i 의 프로펠러, 선체, 타, 예항삭 및 바람에 기인하는 동유체력 또는 외력을 나타내고 있다. 단, X_{Pi} 항의 경우 예선만 추력을 발생한다.

그리고 예선, 피예선의 무게중심 G_0 , G_1 의 좌표를 각각 $(\overline{X_0} , \overline{Y_0})$, $(\overline{X_1} , \overline{Y_1})$ 라 하면 양 좌표 사이의 관계는 다음과 같이 표시된다.

$$\overline{X_1} = \overline{X_0} - \{ a_0 \cos \psi_0 + l \cos (\psi_1 + \alpha) + f_1 \cos \psi_1 \}$$

$$\qquad (5)$$

$$\overline{Y_1} = \overline{Y_0} - \{ a_0 \sin \psi_0 + l \sin (\psi_1 + \alpha) + f_1 \sin \psi_1 \}$$

2.2 수학모델

예선과 피예선에 작용하는 동유체력과 외력의 수학모델은 다음과 같다〔7〕.

2.2.1 유효추력

예선의 유효추력 X_{P0}는 예선·피예선계가 정상직진시의 선체저항 및 바람에 의한 저항과 평형을 이룬다고 가정하면 다음 평형식이 성립한다.

$$X_{P0} = (R_0 + R_1) - (X_{W0S} + X_{W1S}) \tag{6}$$

여기서 R_0, R_1은 각각 예선, 피예선에 작용하는 전저항으로서 예항속도가 저속이므로 Schoenherr식으로부터 구한다. 그리고 X_{W0S}, X_{W1S}는 정상직진시 예선, 피예선에 작용하는 풍압력의 x 방향 성분을 나타낸다.

2.2.2 주선체에 작용하는 동유체력

$$X_H' = -R'(1 + 13\beta^2)$$

$$Y_H' = Y_\beta'\beta + Y_r'r' \tag{7}$$

$$N_H' = N_\beta'\beta + N_r'r'$$

여기서 예선, 피예선에 관한 첨자 0, 1을 생략하고 있으며 Y_H, N_H는 선형유체력만을 생각하고, 각 유체력미계수는 다음의 Inoue 식〔8〕으로부터 추정한다.

$$Y_\beta' = \left\{\frac{1}{2}\pi\Lambda + 1.4\,c_B\,(B/L)\right\}\left(1 + \frac{2}{3}\tau/dm\right)$$

$$Y_r' = \frac{1}{4}\pi\Lambda(1 + 0.8\tau/dm)$$

$$N_\beta' = \Lambda(1 - \frac{0.27}{l_\beta}\tau/dm) \qquad (8)$$

$$N_r' = -(0.54\Lambda - \Lambda^2)(1 + 0.3\tau/dm)$$

단, $\Lambda = 2d/L$, $\tau = da - df$, $dm = (da + df)/2$

$l_\beta = \Lambda / (\frac{1}{2}\pi\Lambda + 1.4c_B B/L)$

또, X_H' 에 관한 식에서 $(1 + 13\beta^2)$ 부분은 사항에 따른 저항증가량을 나타낸 것이다.

2.2.3 타에 작용하는 유체력

$$X_R' = -F_N'\sin\delta$$

$$Y_R' = -(1 + a_H)F_N'\cos\delta \qquad (9)$$

$$N_R' = \frac{1}{2}(1 + a_H)F_N'\cos\delta$$

여기서 F_N 은 타직압력, δ 는 타각을 나타낸다. 그리고 F_N', a_H 등은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_N' = \frac{6.13\Lambda}{(\Lambda + 2.25)}(\frac{A_R}{Ld})(1 - w)^2\{1 + g(s)\}\sin\alpha_R$$

$$a_H = 0.63C_B - 0.15$$

$$g(s) = 0.6\eta(2 - 1.4s)s/(1 - s)^2$$

$$\eta = D/H_R \qquad (10)$$

$$s = 1 - V(1 - w)/nP$$

$$w = 0.6329 - 1.552\, C_B + 1.5034\, C_B^{\,2}$$

$$n = 1.744\left(\frac{V}{D}\right)\left\{\frac{C_{T0}S_{A0} + C_{T1}S_{A1}}{D^2}\right\}^{1/3}$$

$$\alpha_R = \delta - \gamma(\beta + r')$$

단, 피예선의 경우 $n = 0$, $\delta = 0$ 이다. C_B 는 방형계수, D 는 프로펠러 직경, P 는 프로펠러 핏치, λ 는 타의 종횡비, H_R 은 타의 높이(스팬길이), A_R 은 타면적, C_T 와 S_A 는 각각 전저항계수와 침수표면적을 나타낸다. 그리고 γ 는 정류계수 ($\gamma \approx 0.45$) 이다. w 는 유효반류계수로서 Taylor도표 〔9〕를 커브핏팅하였다. n 은 매초당 프로펠러 회전수로서 추진계수 ($\eta = EHP/DHP$) $\eta = 0.6$, 토오크계수 $K_Q \approx 0.025$ 라 가정할 때의 근사식이다. 그리고 본 논문에서는 예선의 타각을 ψ_0 (예선의 회두각), r_0' (회두각속도의 무차원치)에 비례하는 조타를 행하면서 항행하는 것으로서 타각 δ_0 를 다음식과 같이 자동조타하는 것으로 간주한다.

$$\delta_0 = -K_1\psi_0 - K_2 r_0' \tag{11}$$

여기서 K_1, K_2 는 비례정수로서, Koyama의 연구결과 〔9〕를 참조하여 $K_1 = 1.0$, $K_2 = 0.05$ 를 가정한다.

2.2.4 풍압외력

Fig. 1에서 예선의 경우(첨자 "0"), 상대풍속 V_{A0}, 상대풍향 ψ_{A0} 라 하면

$$V_{A0} = \sqrt{V_w^{\,2} + V_0^{\,2} - 2V_wV_0\cos\{\pi - (\beta_0 + \psi_w - \psi_0)\}}$$

$$\psi_{A0} = \tan^{-1}\left\{\frac{-\sin\beta_0 + (V_w/V_0)\sin(\psi_w - \psi_0)}{\cos\beta_0 + (V_w/V_0)\cos(\psi_w - \psi_0)}\right\} \tag{12}$$

$$X_{W0}' = -(\rho_A/\rho)(A_{T0}/L_0 d_0) \cdot C_{X0} \cdot (V_{A0}/V_0)^2$$
$$Y_{W0}' = -(\rho_A/\rho)(A_{L0}/L_0 d_0) \cdot C_{Y0} \cdot (V_{A0}/V_0)^2 \quad (13)$$
$$N_{W0}' = -(\rho_A/\rho)(A_{L0}/L_0 d_0) \cdot C_{N0} \cdot (V_{A0}/V_0)^2$$

여기서 ρ_A **는 공기의 밀도,** A_{T0}, A_{L0} **는 각각 예선의 수면 상부 정면적과 측면적이다. 그리고 풍압모우멘트계수** C_{X0}, C_{Y0}, C_{N0} **는** ϕ_{A0} **의 함수로서** Isherwood **회귀식** 〔10〕 **으로부터 구한다. 피예선의 경우에는 식**(12), (13)**에서 첨자 "0" 대신에 "1"로 표시하면 된다.**

2.2.5 예항삭의 장력

정상직진 상태에서 예항삭에 작용하는 장력 T_{0S} **는 다음과 같이 표시할 수 있다. 여기서 장력** T_{0S} **는 피예선의 직진시의 저항** R_1 **과 바람에 의한 저항** X_{W1S} **의 합으로 나타낼 수 있다.**

$$T_{0S} = R_1 - X_{W1S}$$

단, $X_{W1S} = -\frac{1}{2}\rho_A V_{A1S}{}^2 A_{T1} \cdot C_{X1}(\phi_{A1S})$

$$V_{A1S}{}^2 = V_1{}^2 \{1 + (V_w/V_1)^2 + 2(V_w/V_1)\cos\phi_w\}$$

$$\phi_{A1S} = \tan^{-1}\left[\frac{(V_w/V_1)\sin\phi_w}{1 + (V_w/V_1)\cos\phi_w}\right]$$

운동상태(**사항고려**)**에서의 장력을** T_0 **라 하면**

$$T_0 = T_{0S}\{1 + 13(\beta_1 + \alpha_1)^2\} \quad (14)$$

여기서 β_1 **은 피예선의 사항시의 편각이고,** α_1 **은 당시의 피예선의 선체중심선과 예항삭과의 각을 이룬다.**

따라서

$$X_{T0} = - T_0 \cos(\psi_0 - \psi_1 - \alpha)$$

$$Y_{T0} = T_0 \sin(\psi_0 - \psi_1 - \alpha) \quad (15)$$

$$N_{T0} = - T_0 a_0 \sin(\psi_0 - \psi_1 - \alpha)$$

피예선의 경우에는 다음과 같다.

$$X_{T1} = T_1 \cos\alpha$$

$$Y_{T1} = T_1 \sin\alpha \quad (16)$$

$$N_{T1} = T_1 f_1 \sin\alpha$$ 단, $T_1 = T_0$

여기서 $a_0' = a_0 / L_0$ 로 a_0 는 예선의 중심과 예항점까지의 거리를 나타낸다.

3 침로안정성

운동변수 θ_0, β_0, θ_1, β_1, α의 변화가 미소하고, 선형항만을 고려하며, $r' = r_i(L_i/V_i)$ 의 관계를 사용하고, 선속이 $V_0 = V_1 = V$라 가정할 때, 식(2), (4) 및 2.2절의 수학모델로부터 예선, 피예선의 운동방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$-(m_0' + m_{y0}')(L_0/V)\dot{\beta}_0 + (m_0' + m_{x0}')(L_0/V)\dot{\psi}_0$$
$$= Y_{\beta 0}'\beta_0 + Y_{r0}'(L_0/V)\dot{\psi}_0 + C_{F0}[K_1\psi_0 + K_2(L_0/V)\dot{\psi}_0$$
$$+ \gamma_0\{\beta_0 + (L_0/V)\dot{\psi}_0\}] + Y_{W0}' + T_0'(\psi_0 - \psi_1 - \alpha)$$

$$(I_{z0}' + J_{z0}')(L_0/V)^2\ddot{\psi}_0$$
$$= N_{\beta 0}'\beta_0 + N_{r0}'(L_0/V)\dot{\psi}_0 - \frac{1}{2}C_{F0}[K_1\psi_0 + K_2(L_0/V)\dot{\psi}_0$$
$$+ \gamma_0\{\beta_0 + (L_0/V)\dot{\psi}_0\}] + N_{W0}' - T_0'a_0'(\psi_0 - \psi_1 - \alpha)$$

$$-(m_1' + m_{y1}')(L_1/V)\dot{\beta}_1 + (m_1' + m_{x1}')(L_1/V)\dot{\psi}_1$$
$$= Y_{\beta 1}'\beta_1 + Y_{r1}'(L_1/V)\dot{\psi}_1 + C_{F1}\gamma_1\{\beta_1 + (L_1/V)\dot{\psi}_1\}$$
$$+ Y_{W1}' + T_1'\alpha$$

$$(I_{z1}' + J_{z1}')(L_1/V)^2\ddot{\psi}_1$$
$$= N_{\beta 1}'\beta_1 + N_{r1}'(L_1/V)\dot{\psi}_1 - \frac{1}{2}C_{F1}\gamma_1\{\beta_1 + (L_1/V)\dot{\psi}_1\} \qquad (17)$$
$$+ N_{W1}' + T_1'f_1'\alpha$$

단, $a_0' = a_0/L_0$, $f_1' = f_1/L_1$

$$C_{F0} = (1 + a_{H0}) \left\{ \frac{6.13\lambda_0}{\lambda_0 + 2.25} \right\} \cdot \left(\frac{A_{R0}}{L_0 d_0} \right)$$

$$\times (1 - w_0)^2 \cdot \left\{ 1 + \frac{0.6\eta_0 (2 - 1.4s)s}{(1 - s)^2} \right\}$$

$$C_{F1} = (1 + a_{H1}) \left\{ \frac{6.13\lambda_1}{\lambda_1 + 2.25} \right\} \cdot \left(\frac{A_{R1}}{L_1 d_1} \right) \cdot (1 - w_1)^2$$

여기서 λ_0 , λ_1 은 예선, 피예선의 타의 종횡비, A_{R0} , A_{R1} 은 각각 타면적비, w_0 , w_1 은 반류계수이다.

식(5)로부터 예선, 피예선의 무게중심 좌표의 관계식은 다음과 같이 근사 표시된다.

$$\beta_1 = -\psi_0 + \beta_0 + \psi_1 + a_0'(L_0/V)\dot{\psi}_0 + l'(L_1/V)(\dot{\psi}_1 + \dot{\alpha})$$

$$+ f_1'(L_1/V)\dot{\psi}_1 \quad \text{단,} \; l' = l/L_1 \tag{18}$$

식(18)을 식(17)에 대입하여 정리하면 다음과 같다. 단, $\dot{\psi}_0 = \phi_1$, $\dot{\psi}_1 = \phi_2$, $\dot{\alpha} = \phi_3$ 와 같이 표현한다.

$$A_0 \dot{\phi}_1 = A_1 \phi_1 + A_4 \beta_0 + A_5 \psi_0 + A_6 \psi_1 + A_7 \alpha + A_8$$

$$B_0 \dot{\phi}_2 = B_1 \phi_1 + B_2 \phi_2 + B_3 \phi_3 + B_4 \beta_0 + B_5 \psi_0 + B_6 \psi_1 + B_7 \alpha + B_8$$

$$C_0 \dot{\phi}_3 = C_1 \phi_1 + C_2 \phi_2 + C_3 \phi_3 + C_4 \beta_0 + C_5 \psi_0 + C_6 \psi_1 + C_7 \alpha + C_8 + C_9 \dot{\phi}_1 + C_{10} \dot{\phi}_2 + C_{11} \dot{\beta}_0 \tag{19}$$

$$D_0 \dot{\beta}_0 = D_1 \phi_1 + D_4 \beta_0 + D_5 \psi_0 + D_6 \psi_1 + D_7 \alpha + D_8$$

여기서 계수 A_0 , A_1 , $\cdots$, B_0 , B_1 , $\cdots$, C_0 , C_1 , $\cdots$, D_0 , D_1 , $\cdots$ 은 다음과 같다.

$$A_0 = (I_{z0}' + J_{z0}')(L_0/V)^2$$

$$A_1 = N_{r0}'(L_0/V) - \frac{1}{2} C_{F0} K_2 (L_0/V) - \frac{1}{2} C_{F0}\gamma_0 (L_0/V)$$

$$A_4 = N_{\beta 0}' - \frac{1}{2} C_{F0}\gamma_0$$
$$+ (\rho_A/\rho)(A_{L0}/L_0 d_0) C_{N0}(2 V_w/V)\sin\psi_w$$

$$A_5 = -0.5 C_{F0} K_1$$
$$- (\rho_A/\rho)(A_{L0}/L_0 d_0) C_{N0}(2 V_w/V)\sin\psi_w - T_0' a_0'$$

$$A_6 = T_0' a_0'$$

$$A_7 = T_0' a_0'$$

$$A_8 = -(\rho_A/\rho)(A_{L0}/L_0 d_0) C_{N0}$$
$$\times \{1 + (V_w/V)^2 + (2 V_w/V)\cos\psi_w\}$$

$$B_0 = (I_{z1}' + J_{z1}')(L_1/V)^2$$

$$B_1 = a_0'(L_0/V)\{N_{\beta 1}' - 0.5 C_{F1}\gamma_1$$
$$+ (\rho_A/\rho)(A_{L1}/L_1 d_1) C_{N1}(2 V_w/V)\sin\psi_w\}$$

$$B_2 = (L_1/V)[N_{r1}' - 0.5 C_{F1}\gamma_1 + (l_1' + f_1')\{N_{\beta 1}'$$
$$- 0.5 C_{F1}\gamma_1 + (\rho_A/\rho)(A_{L1}/L_1 d_1) C_{N1}(2 V_w/V)\sin\psi_w\}]$$

$$B_3 = l'(L_1/V)\{N_{\beta 1}' - 0.5 C_{F1}\gamma_1$$
$$+ (\rho_A/\rho)(A_{L1}/L_1 d_1) C_{N1}(2 V_w/V)\sin\psi_w\}$$

$$B_4 = N_{\beta 1}' - 0.5\, C_{F1}\gamma_1 + (\rho_A/\rho)(A_{L1}/L_1 d_1)\, C_{N1}(2 V_w/V)\sin\psi_w$$

$$B_5 = -N_{\beta 1}' + 0.5\, C_{F1}\gamma_1 - (\rho_A/\rho)(A_{L1}/L_1 d_1)\, C_{N1}(2 V_w/V)\sin\psi_w$$

$$B_6 = N_{\beta 1}' - 0.5\, C_{F1}\gamma_1$$

$$B_7 = T_1' f_1'$$

$$B_8 = -(\rho_A/\rho)(A_{L1}/L_1 d_1)\, C_{N1} \times \left\{1 + (V_w/V)^2 + 2(V_w/V)\cos\psi_w\right\}$$

$$C_0 = -(m_1' + m_{y1}')(L_1/V)^2\, l'$$

$$C_1 = -(m_1' + m_{y1}')(L_1/V)^2 + (Y_{\beta 1}' + C_{F1}\gamma_1)\, a_0'(L_0/V) + (\rho_A/\rho)(A_{L1}/L_1 d_1) \times C_{Y1}\{2(V_w/V)\, a_0'(L_0/V)\sin\psi_w\}$$

$$C_2 = (L_1/V)[(m_1' + m_{y1}') - (m_1' + m_{x1}') + Y_{r1}' + C_{F1}\gamma_1 + (l' + f_1')\{Y_{\beta 1}' + C_{F1}\gamma_1 + (\rho_A/\rho)(A_{L1}/L_1 d_1)\, C_{Y1}\{2(V_w/V)\sin\psi_w\}]$$

$$C_3 = l'(L_1/V)\{Y_{\beta 1}' + C_{F1}\gamma_1 + (\rho_A/\rho)(A_{L1}/L_1 d_1)\, C_{Y1}\{2(V_w/V)\sin\psi_w\}$$

$$C_4 = Y_{\beta 1}' + C_{F1}\gamma_1 + (\rho_A/\rho)(A_{L1}/L_1 d_1)\, C_{Y1}(2 V_w/V)\sin\psi_w$$

$$C_5 = - Y_{\beta 1}' - C_{F1}\gamma_1$$
$$- (\rho_A / \rho)(A_{L1}/L_1 d_1) C_{Y1} (2 V_w / V) \sin\psi_w$$

$$C_6 = Y_{\beta 1}' + C_{F1}\gamma_1$$

$$C_7 = T_1'$$

$$C_8 = - (\rho_A / \rho)(A_{L1}/L_1 d_1) C_{Y1}$$
$$\times \{ 1 + (V_w / V)^2 + 2 (V_w / V) \cos\psi_w \}$$

$$C_9 = - (m_1' + m_{y1}') (L_0 L_1 / V^2) a_0'$$

$$C_{10} = (m_1' + m_{y1}') (L_1 / V)^2 (l' + f_1')$$

$$C_{11} = - (m_1' + m_{y1}') (L_1 / V)$$

$$D_0 = - (L_0 / V) (m_0' + m_{y0}')$$

$$D_1 = (L_0 / V) \{ - (m_0' + m_{x0}') + Y_{r0}'$$
$$+ C_{F0} K_2 + \gamma_0 C_{F0} \}$$

$$D_4 = Y_{\beta 0}' + \gamma_0 C_{F0}$$
$$+ (\rho_A / \rho)(A_{L0}/L_0 d_0) C_{Y0} (2 V_w / V) \sin\psi_w$$

$$D_5 = C_{F0} K_1 - (\rho_A / \rho)(A_{L0}/L_0 d_0) C_{Y0} (2 V_w / V) \sin\psi_w$$
$$+ T_0'$$

$$D_6 = - T_0'$$

$$D_7 = - T_0'$$

$$D_8 = - (\rho_A / \rho)(A_{L0} / L_0 d_0) C_{Y0}$$
$$\times \{1 + (V_w / V)^2 + (2 V_w / V) \cos \psi_w\} \tag{20}$$

운동변수 $\phi_1, \phi_2, \cdots, \alpha$가 초기평형상태(정상직진상태)로부터 미소교란 $\Delta\phi_1$, $\Delta\phi_2$, $\cdots$, $\Delta\alpha$의 변화가 일어났다고 가정하면 식(19)로부터 다음 관계식을 얻는다.

$$\frac{d}{dt}(\Delta\phi_1) = a_1 \Delta\phi_1 + a_4 \Delta\beta_0 + a_5 \Delta\psi_0 + a_6 \Delta\psi_1 + a_7 \Delta\alpha$$

$$\frac{d}{dt}(\Delta\phi_2) = b_1 \Delta\phi_1 + b_2 \Delta\phi_2 + b_3 \Delta\phi_3 + b_4 \Delta\beta_0 + b_5 \Delta\psi_0 + b_6 \Delta\psi_1 + b_7 \Delta\alpha$$

$$\frac{d}{dt}(\Delta\phi_3) = c_1 \Delta\phi_1 + c_2 \Delta\phi_2 + c_3 \Delta\phi_3 + c_4 \Delta\beta_0 + c_5 \Delta\psi_0 + c_6 \Delta\psi_1 + c_7 \Delta\alpha$$

$$\frac{d}{dt}(\Delta\beta_0) = d_1 \Delta\phi_1 + d_4 \Delta\beta_0 + d_5 \Delta\psi_0 + d_6 \Delta\psi_1 + d_7 \Delta\alpha$$

$$\frac{d}{dt}(\Delta\psi_0) = \Delta\phi_1, \quad \frac{d}{dt}(\Delta\psi_1) = \Delta\phi_2, \quad \frac{d}{dt}(\Delta\alpha) = \Delta\phi_3 \tag{21}$$

여기서 계수 $a_1, \cdots, a_7, b_1, \cdots, b_7, c_1, \cdots, c_7, d_1, \cdots, d_7$은 다음과 같다.

$a_i = A_i / A_0$, $b_i = B_i / B_0$, $d_i = D_i / D_0$ (단, $i = 1 \sim 7$)

$$c_1 = C_1 / C_0 + a_1 C_9 / C_0 + b_1 C_{10} / C_0 + d_1 C_{11} / C_0$$

$$c_2 = C_2 / C_0 + b_2 C_{10} / C_0$$

$$c_3 = C_3 / C_0 + b_3 C_{10} / C_0$$

$$c_i = C_i / C_0 + a_i C_9 / C_0 + b_i C_{10} / C_0 + d_i C_{11} / C_0 \quad (\text{단}, \ i = 4 \sim 7) \tag{22}$$

식(21)의 고유치를 λ라 하면 특성방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{vmatrix} a_1 - \lambda & 0 & 0 & a_4 & a_5 & a_6 & a_7 \\ b_1 & b_2 - \lambda & b_3 & b_4 & b_5 & b_6 & b_7 \\ c_1 & c_2 & c_3 - \lambda & c_4 & c_5 & c_6 & c_7 \\ d_1 & 0 & 0 & d_4 - \lambda & d_5 & d_6 & d_7 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -\lambda & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -\lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -\lambda \end{vmatrix} = 0 \tag{23}$$

또는

$$\lambda^7 + P_1 \lambda^6 + P_2 \lambda^5 + P_3 \lambda^4 + P_4 \lambda^3 + P_5 \lambda^2 + P_6 \lambda + P_7 = 0 \tag{24}$$

여기서 계수 $P_1, P_2, \cdots, P_7$은 $a_1, \cdots, a_7$, $b_1, \cdots, b_7$, $c_1, \cdots, c_7$, $d_1, \cdots, d_7$의 계수들로 구성된다.

식(24)의 대수방정식은 Bairstow의 수치해석법을 이용하여 해를 구하는데 λ의 실수부해가 모두 양(+)의 값을 가지면 예선·피예선계는 침로불안정하다. 일반적으로 예선은 거의 직진운동을 하므로 예선·피예선계가 침로불안정하다는 것은 피예선이 침로불안정하다는 것을 의미한다.

4. 수치계산 및 고찰

제 2장에서 언급한 방법에 따라 풍압력하에서 피예항중인 선박의 침로안정성을 수치계산에 의해 검토한다.
본 연구에서 계산의 대상으로 한 공시선의 주요목은 Table 1에 나타내어져 있고 풍압력 및 풍압모우멘트계산을 위한 선체상부구조물의 정 · 측면 형상 Fig. 2, 3, 4와 같다. 예선은 볼라드풀(bollard pull) 35톤 규모의 항만 출입항 보조 업무용 터그보트이고, 피예선은 중형규모의 벌크선(bulk carrier)과 여객선(passenger liner)이고 두척 모두 만재상태로 있다. 또, 풍압면적중심의 두척 모두 선체중앙부부근에 있다. 또, 풍속과 유의파고의 관계를 나타내는 WMO code 1100을 Table 2에 나타내었고 Fig. 5, 6, 7에서는 Isherwood의 회귀식을 이용한 예선 · 피예선들의 풍압력 및 풍압모우멘트 계수들의 계산결과를 나타낸다. Table 3에서는 만재상태에서의 피예선의 선체 고유의 침로안정성을 나타낸다.

벌크선의 침로안정성에 관한 안정 · 불안정영역은 풍향, 풍속, 예항삭의 길이에 따른 피예선의 침로안정성의 계산결과를 정리한 예가 Fig. 8(a) (i)에 있다. 또 여객선의 내용은 Fig. 9(a) (i)에 나타낸다. 모든 경우에서 예항선속은 3knots를, 예항점의 위치는 $a_0' = 0.1$, $f_1' = 0.5$ 를 상정하였으며, 해상상태를 나타내는 Beaufort 등급에 따라 각각 계산을 수행하였다. 계산순서는 다음과 같다. 먼저 최종흘수에 대해서 이 흘수에 대응하는 유체력미계수 및 풍압면적을 구하고, 각 풍향에 따른 특성방정식의 해를 구하여 안정성 여부를 판별한다. Fig. 8과 Fig. 9에서 횡축은 절대풍향 ψ_w 를, 종축은 예항삭의 길이의 무차원치 l' 를 나타내고 있으며, 각 그림들의 곡선들은 침로안정과 침로불안정의 경계선을 나타내고 있다. 각 곡선의 상부가 안정영역, 하부가 불안정영역이다.

계산결과를 보면 벌크선은 Beaufort No. 1의 결과로 보여지는 것처럼 아주 풍속이 약한 상태에서도 불안정영역이 있다. 그러나 이 안정 · 불안정영역은 ψ_w 에 대해서 거의 변화하지 않는다. 점차적으로 풍속이 증가함에 따라 횡풍과 추사풍의 경우에 불안정영역이 확대되어진다. 약한 풍속에서와는 반대로 강한 풍속에서는 풍향의 변화에 따라 불안정영역이 현저하게 변한다. 약한 풍속에서 안정화하기 위해서는 예항삭을 길게 하면 안정화 되지만 강한 풍속에서는 횡파나 추파중에서는 예항삭을 길게 해도 안정해질수 없다. 그러므로 안정항행을 위해서는 약한 풍속일때는 예항삭을 길게 하고 강한 풍속에서는 추파와 추사파를 피하도록 하여야 한다.

한편, 여객선의 경우에서는 약한 풍속에서는 풍향에 관계없이 안정하지만 풍압면적이 커서 바람의 영향을 많이 받는 선형이다. 풍속이 증가함에 따라 불안정영역이 급격히 증가하고 정횡에서 기울어진 후방까지의 풍향에 대해서는 예항삭을 길게하여도 안정화될 수 가 없다. 이러한 경우에는 침로를 바꾸고 횡풍과 추풍을 피하는 길이 안정화의 방법이라 하겠다. 또, 강한 풍속(Beaufort No. 7 이상)에서는 삭이 짧아도 안정한 부분이 존재하는데 이러한 경향은 벌크선의 경우와 비슷하다.
일반적으로 약한 풍속에서는 횡풍의 경우, 강한 풍속에서는 횡풍과 추사풍의 경우 불안정영역이 확대된다는 것을 알 수 있다. 한편, 공시선의 선체고유의 침로안정성과 풍압력하에서 피예항중인 선박의 침로안정성과의 상관관계를 검토하기 위해서 선체고유의 침로안정성을 계산해 본다. 단, 선체고유의 침로안정성을 계산할 때에는 나각선체(bare hull)만의 유체력미계수(예를 들면 2.2절에서 언급한 Y_{β}', N_{β}' 등)가 아니라 타(rudder)의 영향까지를 고려한 유체력미계수(이것을 $Y_{\beta HR}'$, $N_{\beta HR}'$ 등과 같이 기술함)를 사용하여야 한다. 이때 침로안정성을 나타내는 지표로서 안정성레버(Stability lever) l_d 와 유체력미계수 사이의 관계는 다음과 같다〔12〕.

$$l_d = \frac{N_r'_{HR}}{Y_r'_{HR} - (m' + m_x')} - \frac{N_{\beta}'_{HR}}{Y_{\beta}'_{HR}} \tag{25}$$

$$\begin{aligned} Y_{\beta}'_{HR} &= Y_{\beta}' + C_F \gamma \\ Y_r'_{HR} &= Y_r' + C_F \gamma \\ N_{\beta}'_{HR} &= N_{\beta}' - \frac{1}{2} C_F \gamma \\ N_r'_{HR} &= N_r' - \frac{1}{2} C_F \gamma \end{aligned} \tag{26}$$

여기서 γ 와 C_F 는 각각 식(9)와 식(16)에서 정의한 정류계수와 타력계수이다. 식(25), (26)에 따라 계산한 결과는 예선의 경우에는 l_d 의 값이 대략 0.5로서 침로안정하며, 피예선의 경우에는 Table 3과 같다. 여기서 피예선의 선체고유의 침로안정성의 경향과 Fig. 8, 9에서의 침로안정성과는 밀접한 상관관계가 있음을 알 수 있다. 즉, 선박의 최종흘수에서의 선체고유의 침로안정성이 나빠질수록 풍압력하에서의 피예항중일 때에도 침로안정성이 나빠지는 경향을 나타내고 있다.

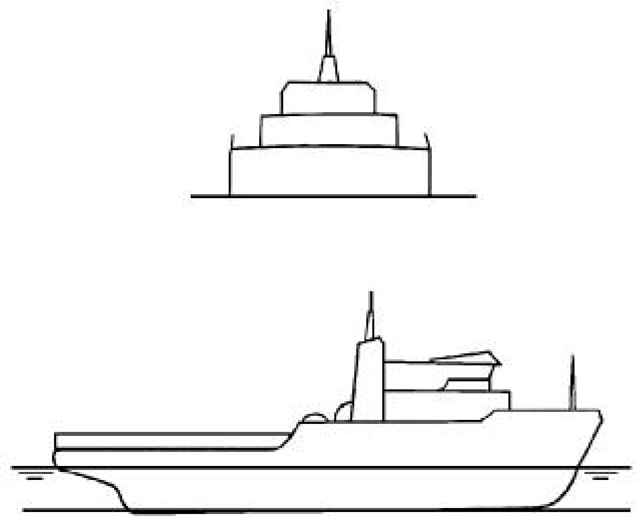


Fig. 2 Projected plans of tug boat

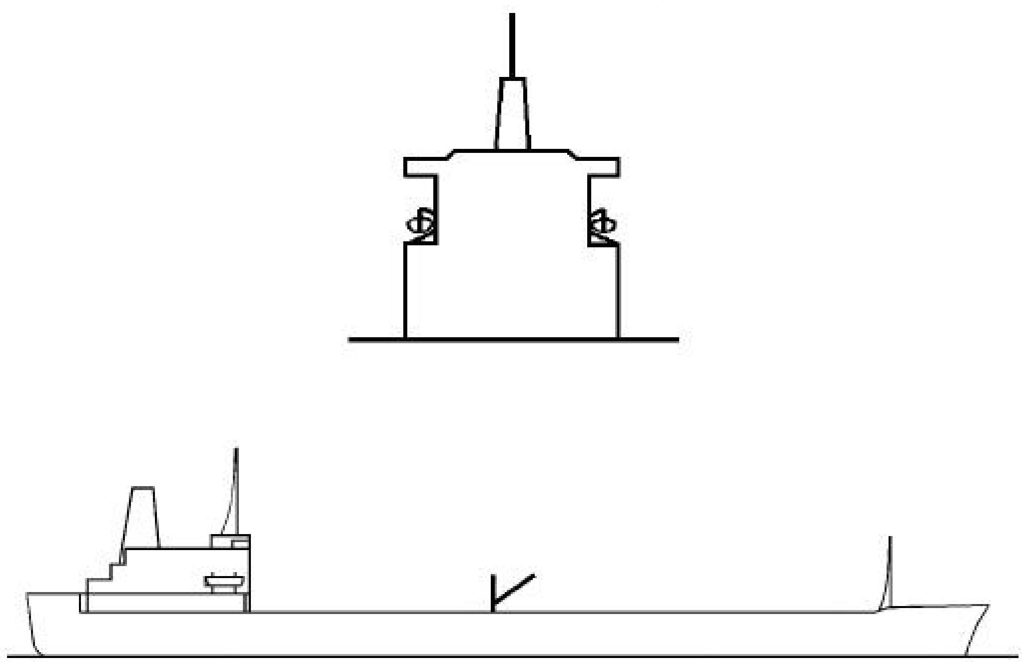


Fig. 3 Projected plans of bulk carrier

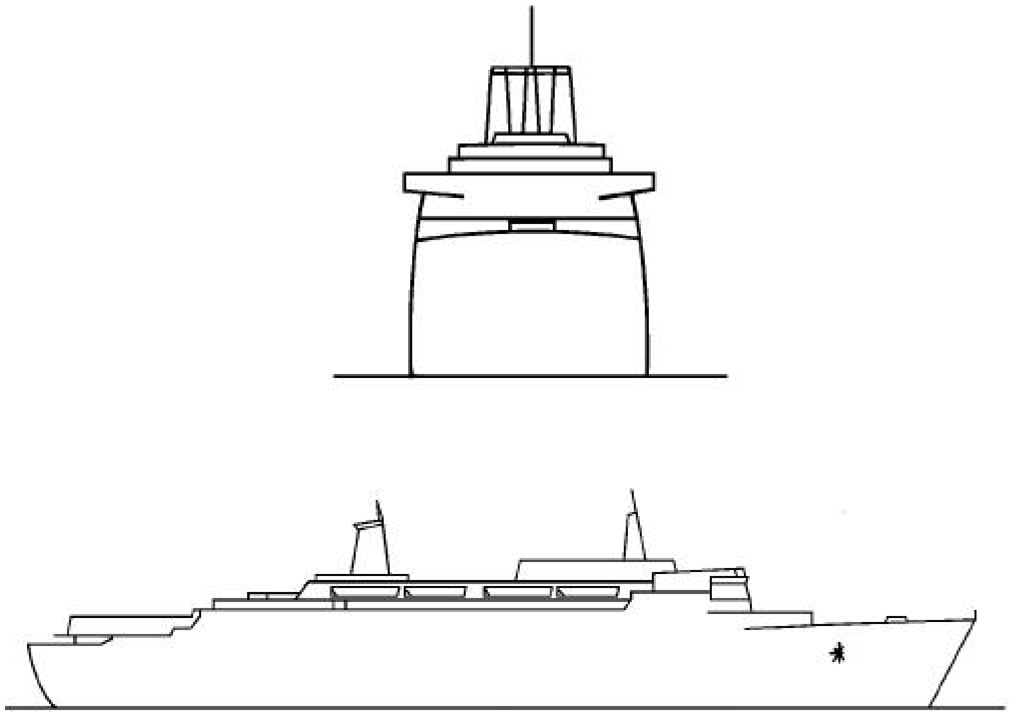
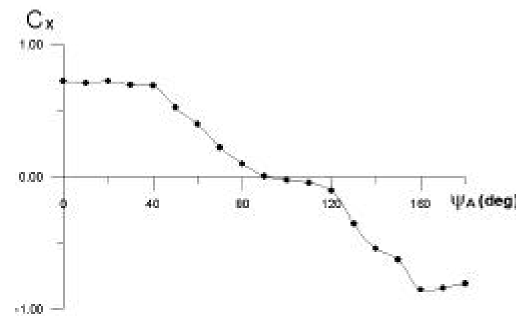


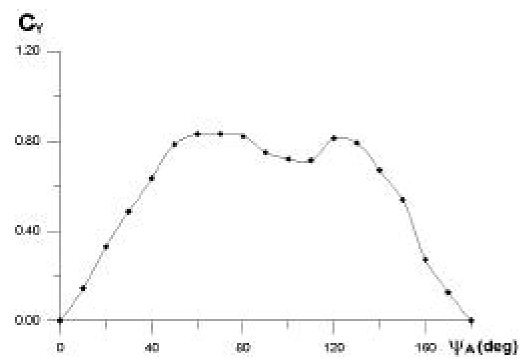
Fig. 4 Projected plans of passenger liner

Table 1 Principal dimensions of tow and towed vessels

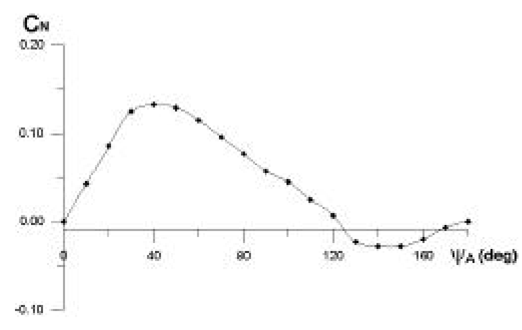
Items			Tug boat	Bulk carrier	Passenger liner
Hull					
Length overall	L_{OA}		30.3	175.0	133.5
Length bet. perpen.	L	(m)	26.0	167.0	118
Breath	B	(m)	8.3	22.6	19.9
Mean draft	d	(m)	2.6	8.0	5.0
fore	df	(m)		7.50	5.0
aft	da	(m)		8.50	5.0
Block coefficient	C_B		0.6	0.76	0.55
Rudder					
Area ratio	$A_R / L d$		0.020 (1/49.7)	0.0154 (1/64.85)	0.0296 (1/33.75)
Aspect ratio	λ		1.4	1.57	1.5
Propeller					
Diameter	D	(m)	1.10	4.60	3.54
Pitch ratio	P/D	(m^2)	0.86	0.77	0.93



(a) Fore and aft wind force coefficient

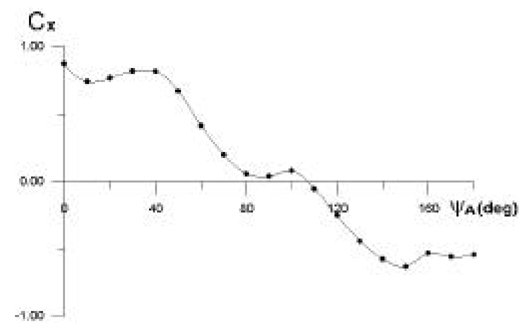


(b) Lateral wind force coefficient

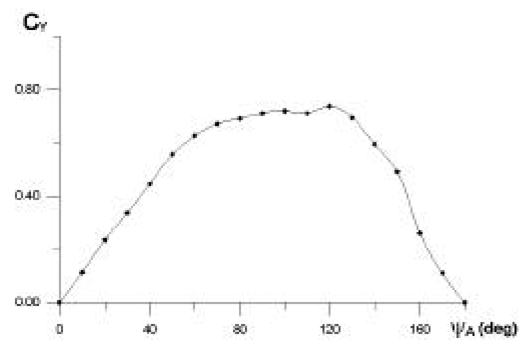


(c) Yawing wind moment coefficient

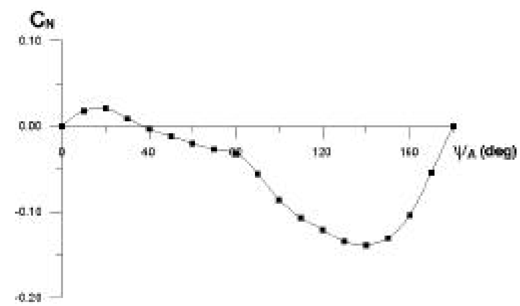
Fig. 5 Wind force and moment coefficients estimated by Isherwood's empirical equations(tug boat)



(a) Fore and aft wind force coefficient

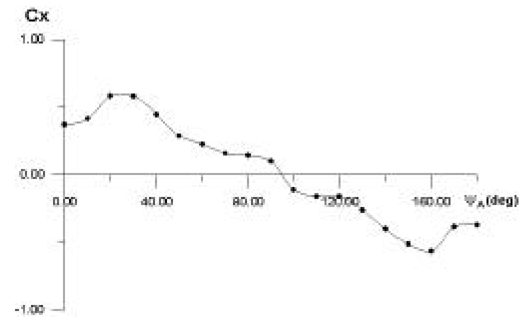


(b) Lateral wind force coefficient

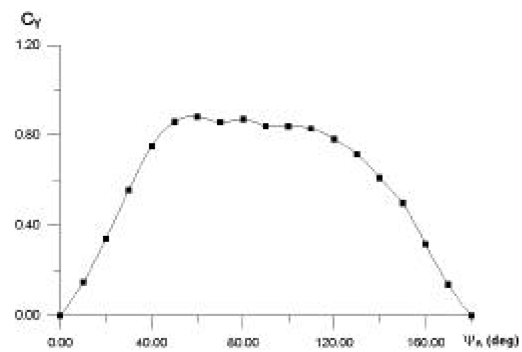


(c) Yawing wind moment coefficient

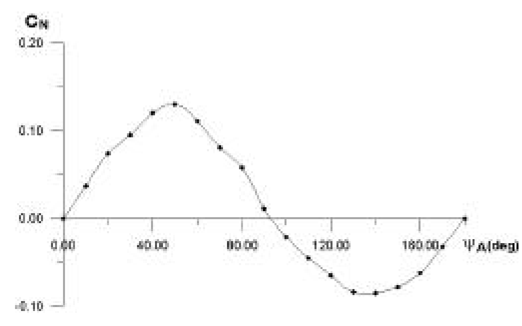
Fig. 6 Wind force and moment coefficients estimated by Isherwood's empirical equations(bulk carrier)



(a) Fore and aft wind force coefficient



(b) Lateral wind force coefficient



(c) Yawing wind moment coefficient

Fig. 7 Wind force and moment coefficients estimated
by Isherwood's empirical equations(passenger liner)

Table 2. WMO code 1100

Beaufort	U_T ($m/\sec$)
1	0.95
2	2.50
3	4.45
4	6.75
5	9.40
6	12.35
7	15.55
8	19.00
9	22.65
10	26.50
11	30.60
12	34.85

Table 3 Inherent course stability lever of towed vessels

	Bulk carrier	Passenger liner
Course stability lever	0.165	-0.017

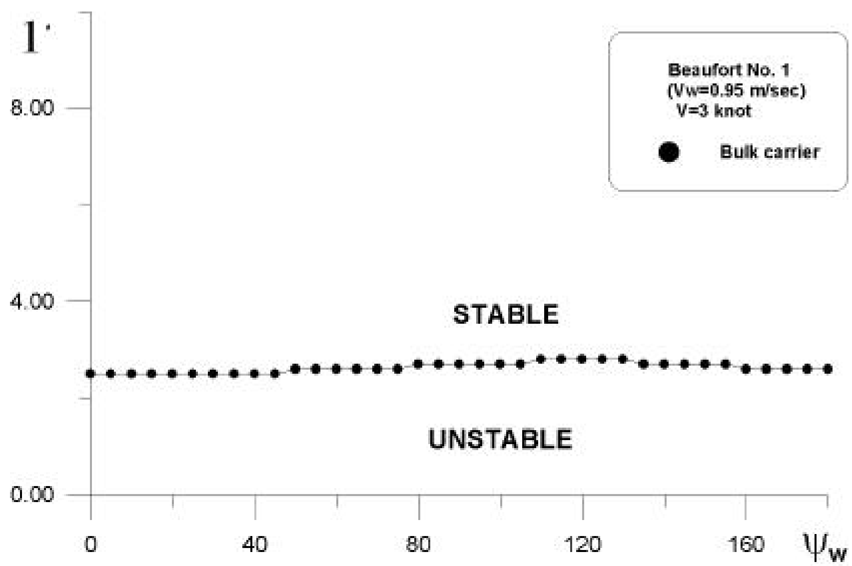


Fig. 8(a) Course stability of towed vessel(bulk carrier) as function of towrope length and wind direction

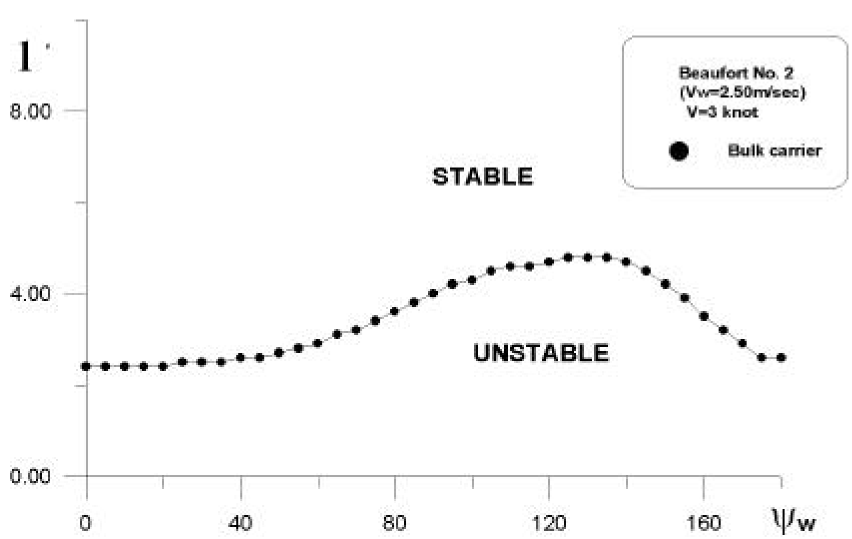


Fig. 8(b) continued

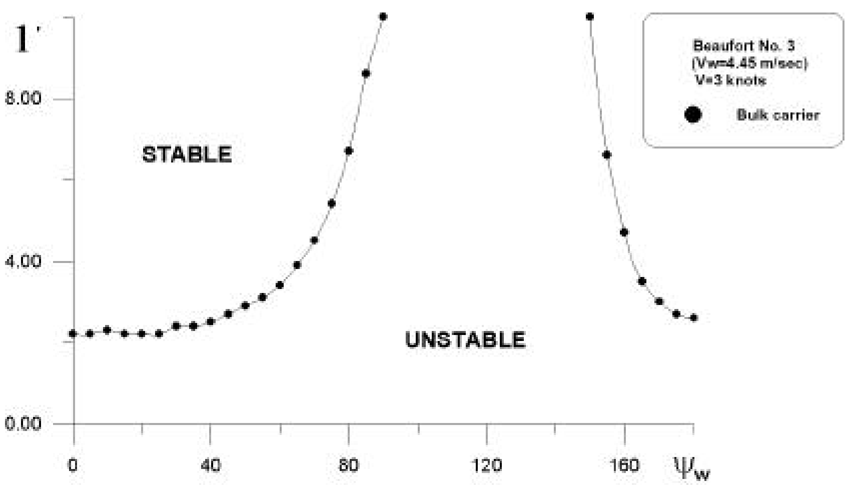


Fig. 8(c) continued

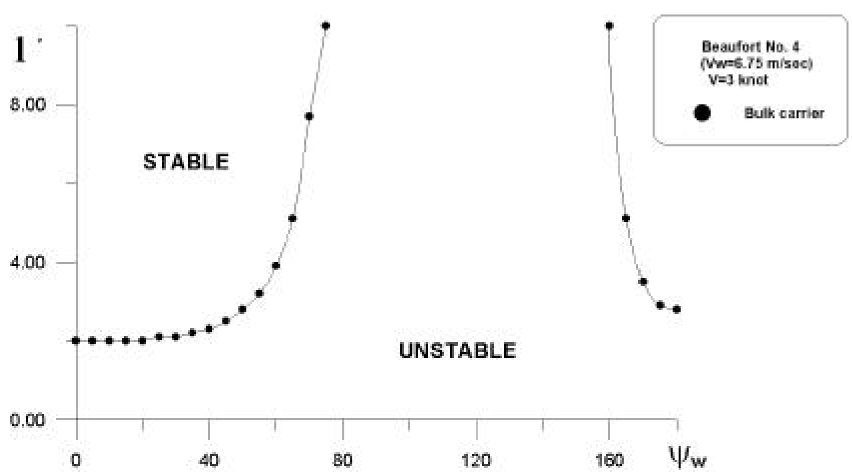


Fig. 8(d) continued

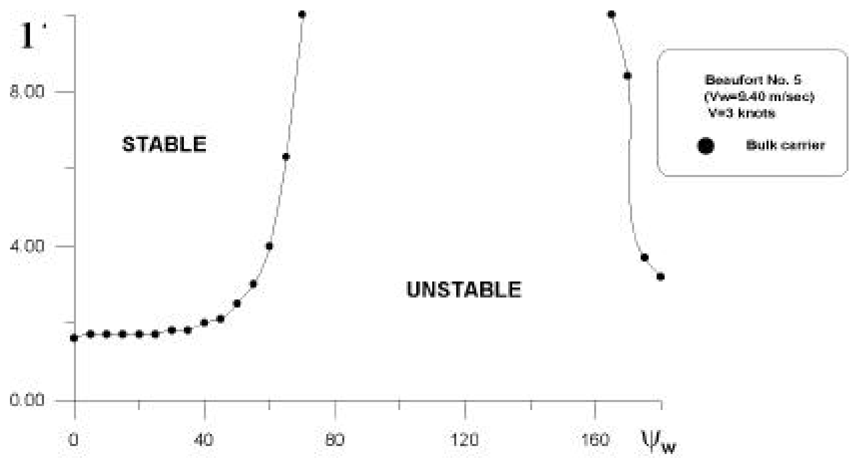


Fig. 8(e) continued

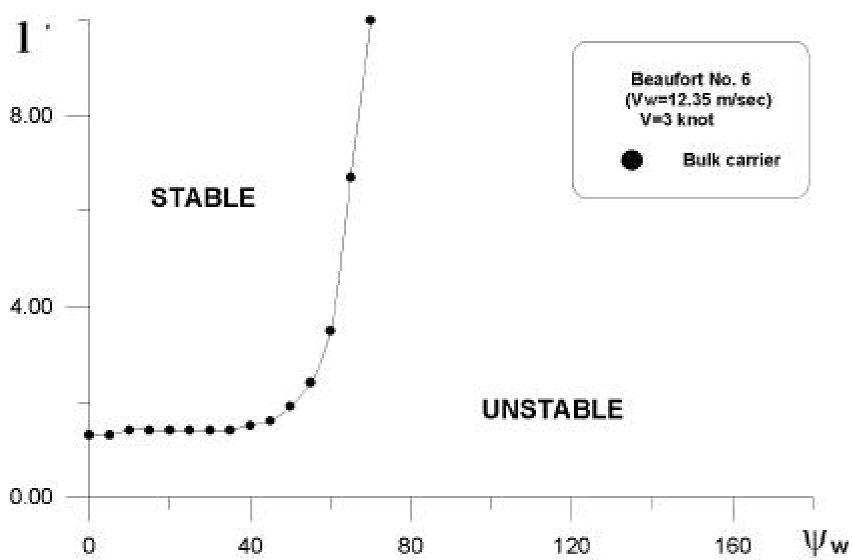


Fig. 8(f) continued

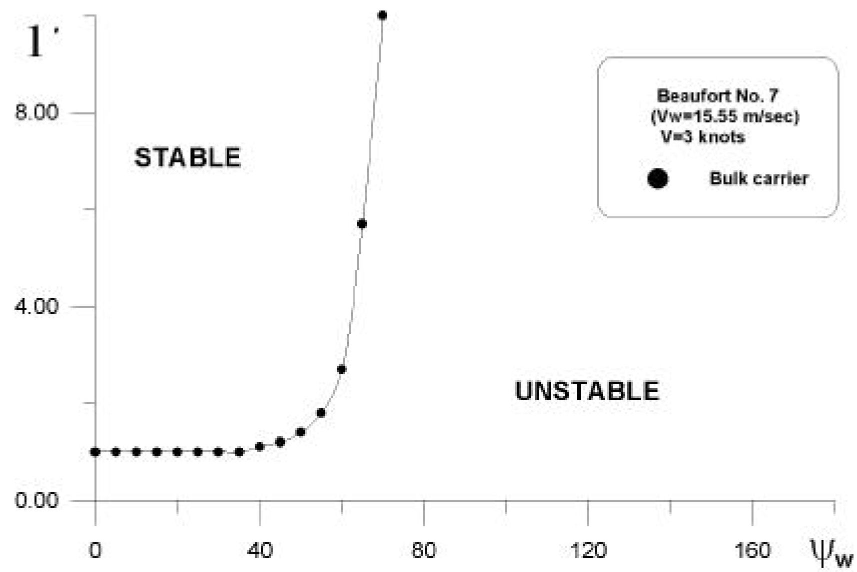


Fig. 8(g) continued

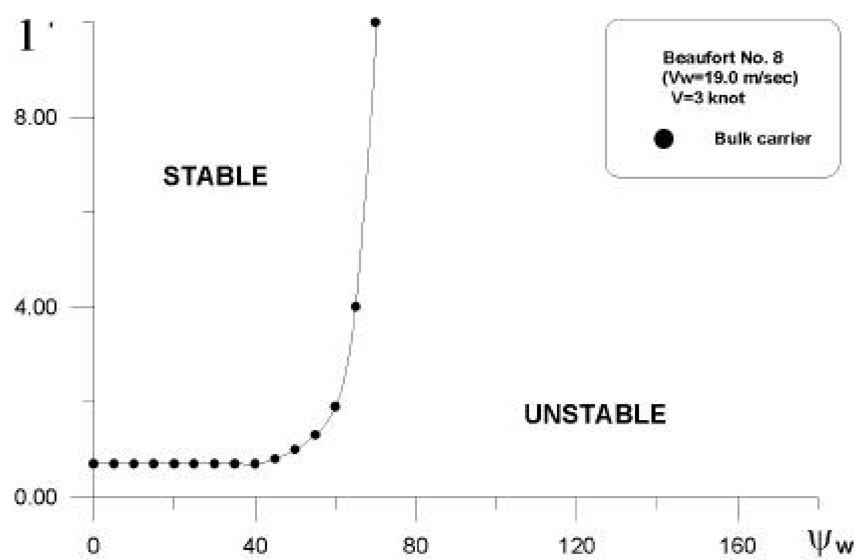


Fig. 8(h) continued

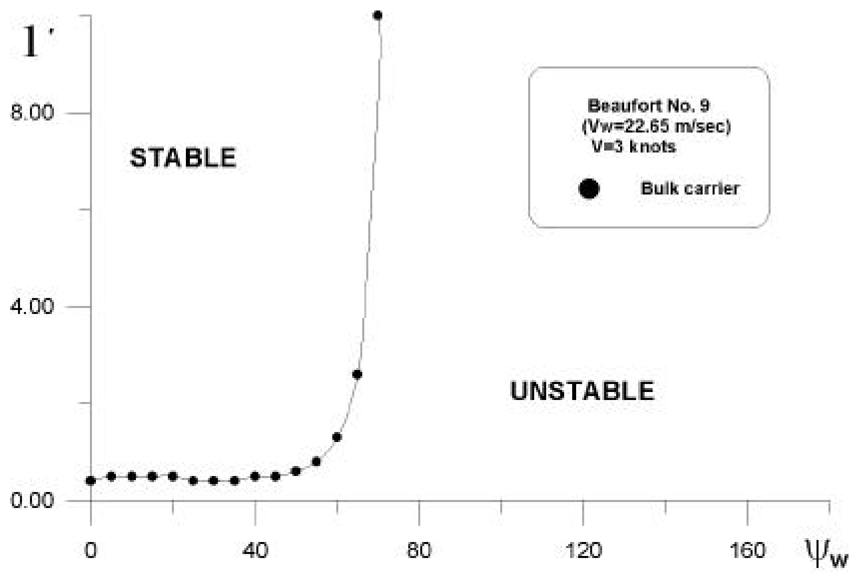


Fig. 8(i) continued

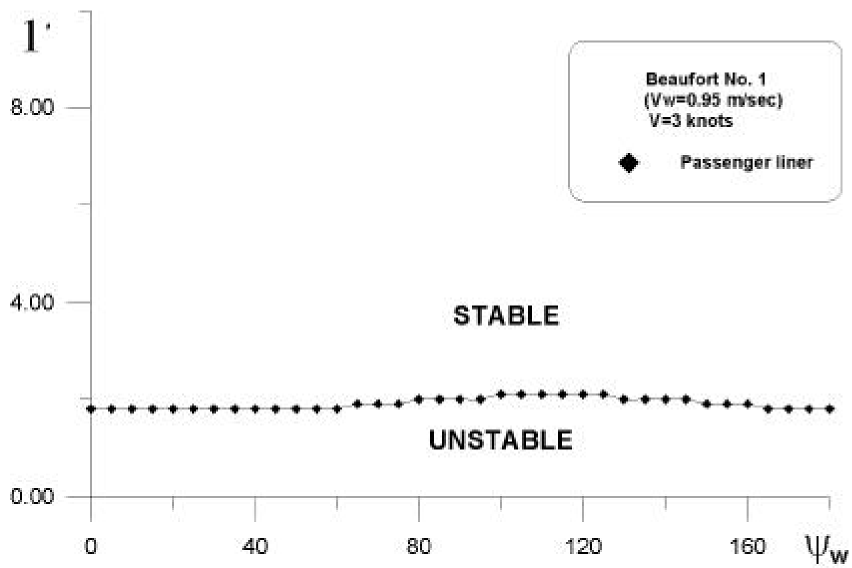


Fig. 9(a) Course stability of towed vessel(passenger liner) as function of towrope and wind direction

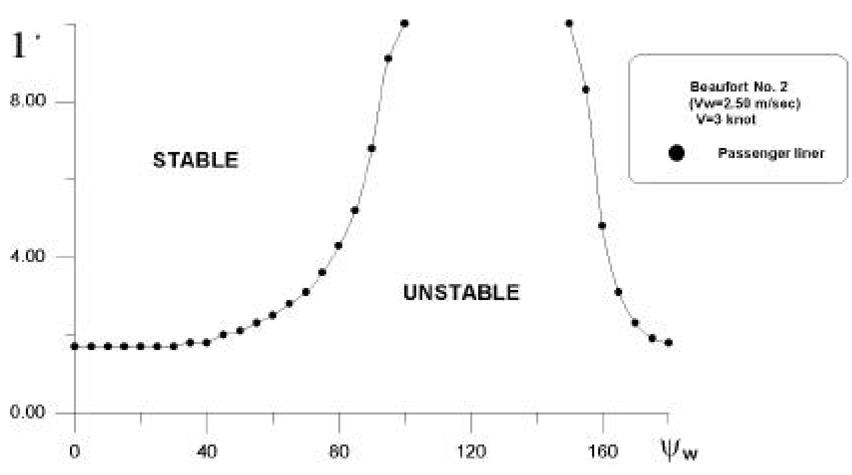


Fig. 9(b) continued

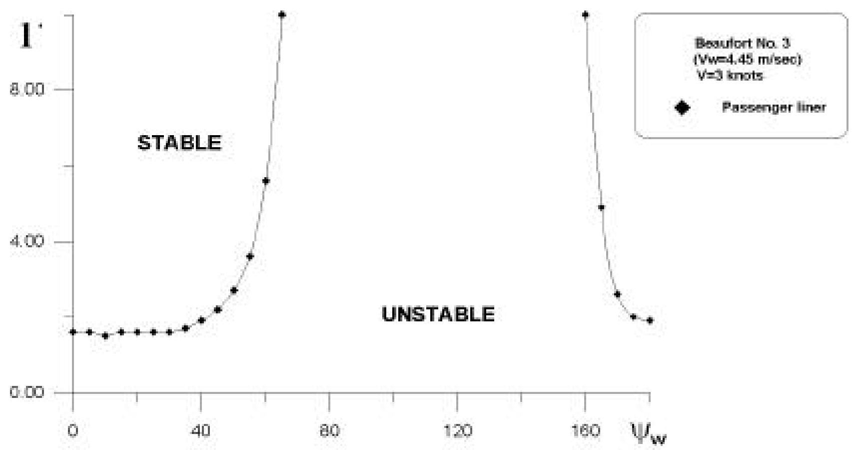


Fig. 9(c) continued

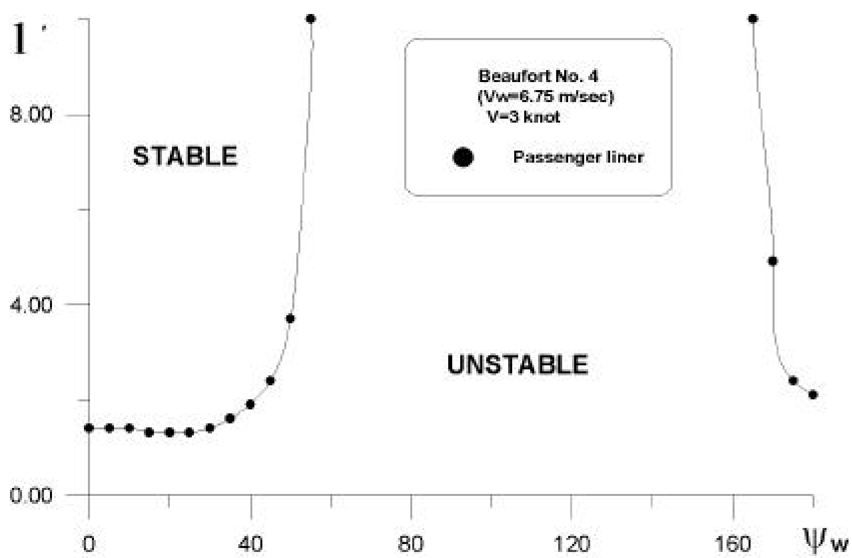


Fig. 9(d) continued

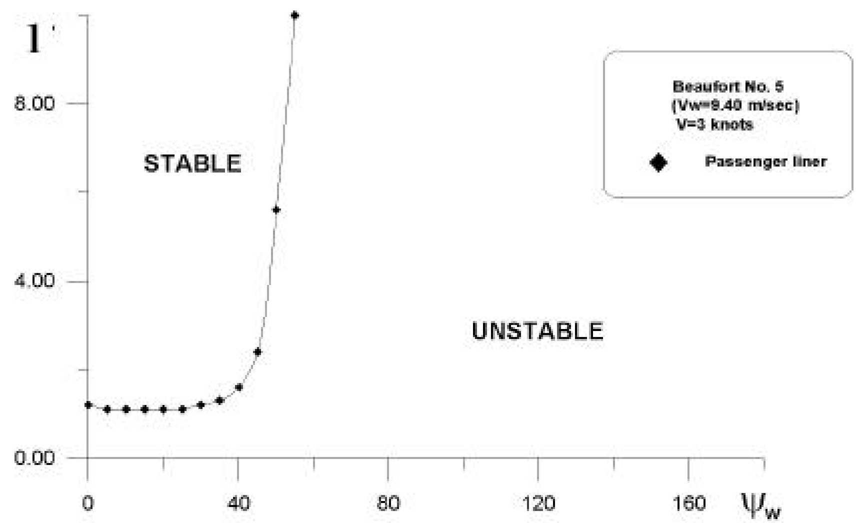


Fig. 9(e) continued

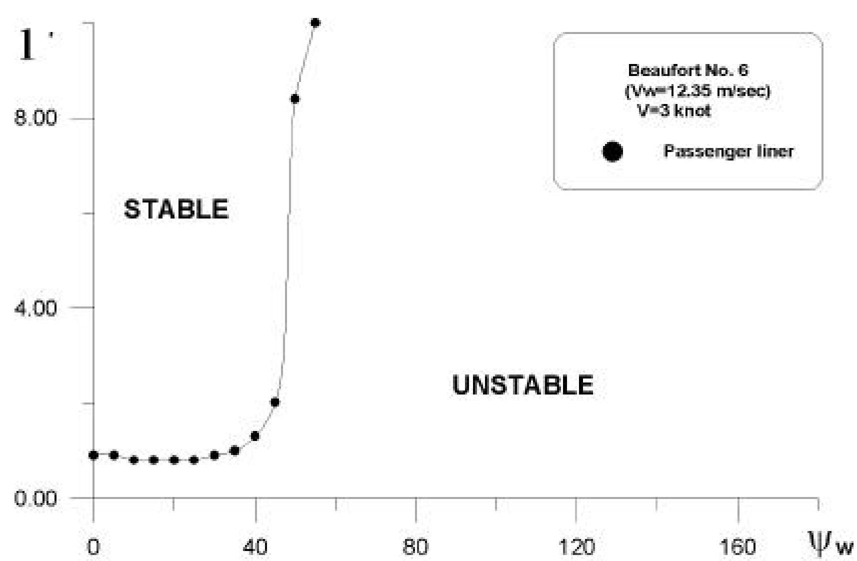


Fig. 9(f) continued

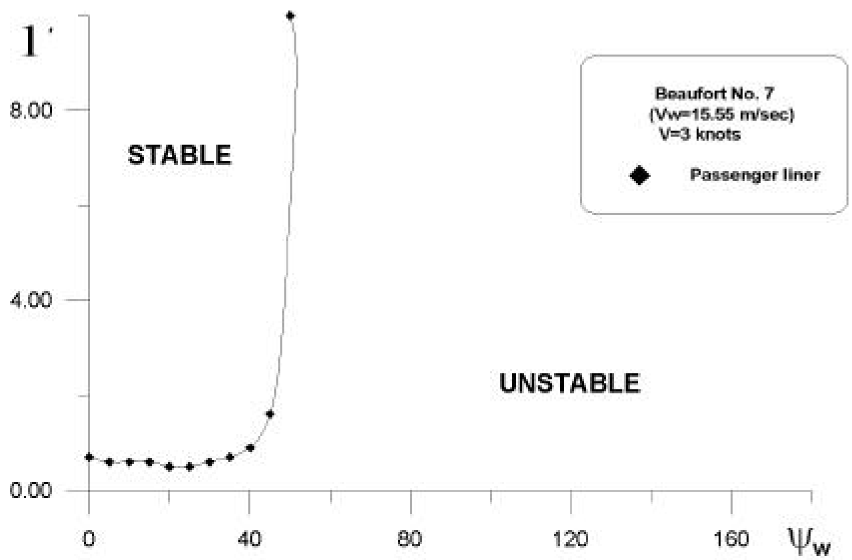


Fig. 9(g) continued

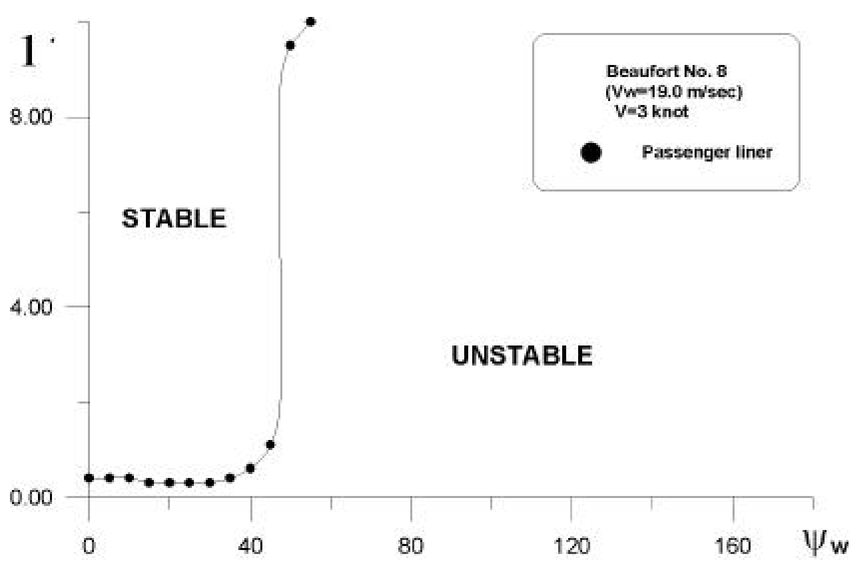


Fig. 9(h) continued

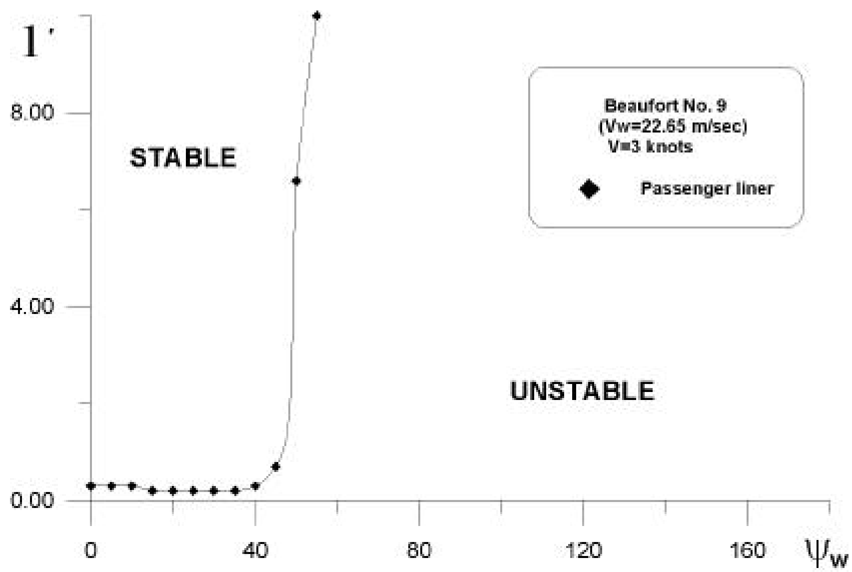


Fig. 9(i) continued

4. 결언

본 논문에서는 예선의 볼라드 풀이 35 *ton* 인 일반 항만출입보조용 Tug boat를 모델로 삼았으며 피예선은 중형규모의 벌크선와 여객선를 모델로 삼았다. 외력으로서 풍압력만을 고려했을 때 예선·피예선계의 침로안정성 평가를 위한 특성방정식을 도출하였으며, 해상상태, 예항삭의 길이 및 풍향 등에 따른 침로안정성을 수치계산하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 풍압력하에서 피예선의 침로안정성은 피예선 선체고유의 침로안정성과 밀접한 상관관계가 있다. 그러나, 풍압면적이 큰 선형에서는 단선으로서의 침로안정성이 좋다 하더라도 풍속, 풍향의 영향을 많이 받기 때문에 침로안정성은 크게 변한다.
2) 피예선의 침로안정성에 미치는 바람의 영향은, 풍속이 강할수록 풍향에 따른 침로안정·불안정영역의 변화가 현저하며, 특히 횡풍과 추사풍의 경우 불안정영역이 확대된다.
3) 예항삭의 길이가 침로안정성에 미치는 영향은, 풍속이 약한 경우에는 예항삭의 길이를 연장함으로써 안정화가 가능하지만, 풍속이 강한 경우에는 횡풍, 추사풍을 제외한 일부 영역에서만 안정화가 가능하고 기타 영역에서는 불가능하다.

이상의 결과로 볼 때 항해자들은 피예선의 예항시 약한 풍속일때는 예항삭을 길게 하여 침로안정을 취하고 가능한 횡풍이나 추풍을 피하여 항행하는 것이 침로안정화하는 길이라 생각된다.

본 논문에서는 외력으로서 바람의 영향만을 고려하였으나 선박에 미치는 그외의 외력 즉, 조류 및 파도에 기인하는 외력 또한 고려되어지는 것이 향후의 과제라 생각되며 피예선의 침로안정성 문제에 대한 연구를 토대로 효율적인 예항방법과 예항설비에 대한 연구 또한 병행되어지는 것이 바람직하다고 생각된다.

참고문헌

〔1〕 Kijima, K., "Chapter 1 of Ship Manoeuvrability and Operational Safety", 2nd Marine Dynamics Symposium Text, The Society of Naval Architects of Japan, 1985(in Japanese).

〔2〕 Benford, H., "The Control of Yaw in Towed Barges", International Shipbuilding Progress, Vol. 2, No. 11, 1955.

〔3〕 Inoue, S., et al., "The Course Stability of Towed Boats", Transaction of the West-Japan Society of Naval Architects, No. 43, 1972(in Japanese).

〔4〕 Kijima, K., et al., "Course Stability of Towed Vessel with Wind Effect", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 153, 1983(in Japanese).

〔5〕 김진안 등, "저속 전·후진 조종에 의한 동유체력의 수학모델", 대한조선학회논문집, 제29권, 제3호, 1992.

〔6〕 이호영 등, "초기설계단계에서 선박조종성능 추정에 대한 정도향상 연구", 대한조선학회논문집, 제35권, 제1호, 1998.

〔7〕 이승건 등, "초기설계시 선박의 선미형상을 고려한 조종성능 추정에 관한 연구", 대한조선학회 논문집, 제36권, 제2호, 1999.

〔8〕 Inoue, S., et al., "Hydrodynamic Derivatives on Ship Manoeuvring", International Shipbuilding Progress, Vol. 28, No. 321, 1981.

〔9〕 Koyama, T., "On the Optimum Automatic Steering Systems of Ships at Sea", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 122, 1967(in Japanese).

〔10〕 Isherwood, R. M., "Wind Resistance of Merchant Ships", Transaction of the Royal Institution of Naval Architects, Vol. 115, 1973.

〔11〕 Lewis, E. V., "Principles of Naval Architecture", 2nd Revision, Vol. I, Published by SNAME, pp. 159 170, 1988.

〔12〕 손경호 등, "타의 스팬길이에 따른 면적변화가 침로안정성에 미치는 영향에 관한 연구", 대한조선학회논문집, 제33권, 제4호, 1996.