

풍압력하에서 피예항중인 손상선박의 침로안정성에 관한 연구

손경호*, 김용기**, 이상갑*, 최경식*

A Study on Course Stability of Towed Damaged-ship under Wind Pressure

K.H. Sohn*, Y.K. Kim**, S.G. Lee* and K.S. Choi*

요 약

본 논문은 손상선박의 안전대책에 관한 연구의 일환으로, 황천항행중인 선박이 충돌, 좌초 등 원인에 의해 손상을 받았을 때를 가상하고, 손상선박을 다른 안전한 장소로 예항하고자 할 때의 침로안정성 문제를 다루고 있다. 외력으로는 바람의 영향만을 고려할 때 예선·피예선계의 침로안정성 평가를 위한 특성방정식을 도출하고, 피예선의 각 손상상태에 따른 침로안정성을 수치계산하였다. 그 결과 손상상태, 풍속, 풍향 및 예항사의 길이 등이 침로안정성에 미치는 영향을 평가할 수 있었다.

Abstract

This paper is related with one of safety plans to rescue a damaged-ship whether by collision, grounding or internal accident. We discuss the problem on course stability of damaged-ship while towed under severe wind pressure. The characteristic equation to assess the stability on course, is derived from sway and yaw coupled motion of towing and towed vessels with wind effect. Through the numerical calculation on course stability of towing and towed vessels system, the

*정회원, 한국해양대학교 조선해양공학부

**정회원, 한국해양대학교 대학원 조선공학과

relationship between the course stability of a towed damaged-ship and wind direction or towrope length, is clarified with the parameters of weather and damage conditions.

1. 서 언

항행중인 선박이 충돌, 좌초, 고장 등 원인에 의해 손상을 받거나 조종불능이 되었을 때, 보다 큰 재난사고로의 진행을 막고, 아울러 주위를 항행하는 다른 선박의 안전을 위하여, 신속하게 다른 안전한 장소로의 이동을 생각하지 않으면 안된다. 최근 IMO(국제해사기구의 약칭)에서도 해양 오염방지의 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. 외력으로서의 바람, 파도, 조류 등을 들 수 있는데, 예항시에는 일반적으로 저속항행을 하게 되므로 특히 바람의 영향이 지배적이다 [4].

본 논문에서는 손상선박의 안전대책에 관한 연구의 일환으로서, 황천항행중인 선박이 충돌, 좌초 등 원인에 의해 손상을 받았을 때를 가상하고, 손상선박을 다른 안전한 장소로 예항하고자 할 때의 침로안정성 문제를 검토한다. 외력으로서의 바람의 영향만을 생각하며, 각 손상상태에 따른 침로안정성을 이론적으로 검토하여, 풍압력하에서 손상선박을 안전하게 예항하기 위한 지침을 도출하고자 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 손상선박으로서 자항능력이 없으며 조타를 하지 아니한다.

2.1 좌표계 및 운동방정식의 정식화

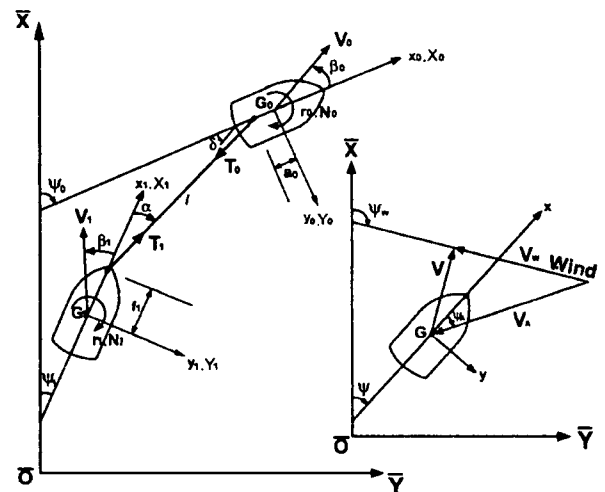


Fig. 1 Coordinate systems

Fig. 1의 좌표계에서 예선·피예선계의 조종운동방정식은 다음과 같다 [5], [6]. 단, 선체고정좌표계의 원점은 각 선박의 무게중심에 취한다.

$$\begin{aligned}
 (m_i + m_{xi}) \dot{u}_i - (m_i + m_{yi}) v_i r_i &= X_i \\
 (m_i + m_{yi}) \dot{v}_i + (m_i + m_{xi}) u_i r_i &= Y_i \\
 (I_{zi} + J_{zi}) \dot{r}_i &= N_i
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 첨자 i 는 예선, 피예선을 나타내는데, $i = 0$ 은 예선, $i = 1$ 은 피예선을 의미하는 것

으로 한다. 그리고 m 은 선체질량, m_x, m_y 는 각각 x, y 축 방향 부가질량, I_z 와 J_z 는 각각 z 축 주위의 관성모멘트와 부가관성모멘트, u, v 는 x, y 축 방향 속도성분, r 는 회두각속도, X, Y, N 은 선체에 작용하는 동유체력과 외력의 x, y 축 방향 성분 및 z 축 주위의 모멘트성분을 나타낸다.

식(1)을 무차원화 하고 속도성분 u, v 대신에 편각(사항각) β 를 써서 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (m_i' + m_{xi}') \left(\frac{L_i}{V_i} \right) \left(\frac{\dot{V}_i}{V_i} \cos \beta_i - \dot{\beta}_i \sin \beta_i \right) \\ + (m_i' + m_{yi}') r_i' \sin \beta_i = X_i' \\ - (m_i' + m_{xi}') \left(\frac{L_i}{V_i} \right) \left(\frac{\dot{V}_i}{V_i} \sin \beta_i + \dot{\beta}_i \cos \beta_i \right) \\ + (m_i' + m_{yi}') r_i' \cos \beta_i = Y_i' \quad (2) \\ (I_{zi}' + J_{zi}') \left(\frac{L_i}{V_i} \right) \left(\frac{\dot{V}_i}{V_i} r_i' + \dot{r}_i' \right) = N_i' \end{aligned}$$

여기서 V 는 합속도를 의미하며, 무차원화는 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m_i', m_{xi}', m_{yi}' \\ = m_i, m_{xi}, m_{yi} / \left(\frac{1}{2} \rho L_i^2 d_i \right) \\ I_{zi}', J_{zi}' = I_{zi}, J_{zi} / \left(\frac{1}{2} \rho L_i^4 d_i \right) \\ X_i', Y_i' = X_i, Y_i / \left(\frac{1}{2} \rho L_i d_i V_i^2 \right) \\ N_i' = N_i / \frac{1}{2} \rho L_i^2 d_i V_i^2, \\ r_i' = r_i (L_i / V_i) \quad (3) \end{aligned}$$

여기서 L, d 는 선체길이와 평균흘수, ρ 는 해수의 밀도이다.

식(2)에서 우변의 동유체력 및 외력 항은 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} X_i' = X_{Pi}' + X_{Hi}' + X_{Ri}' + X_{Ti}' \\ + X_{Wi}' \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_i' = Y_{Hi}' + Y_{Ri}' + Y_{Ti}' + Y_{Wi}' \\ N_i' = N_{Hi}' + N_{Ri}' + N_{Ti}' + N_{Wi}' \quad (4) \end{aligned}$$

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 예선에서만 추력이 발생된다.

그리고 예선, 피예선의 무게중심 G_0, G_1 의 좌표를 각각 $(\bar{X}_0, \bar{Y}_0), (\bar{X}_1, \bar{Y}_1)$ 라 하면 양좌표 사이의 관계는 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} \bar{X}_1 = \bar{X}_0 - \{ a_0 \cos \psi_0 + l \cos(\psi_1 + \alpha) \\ + f_1 \cos \psi_1 \} \\ \bar{Y}_1 = \bar{Y}_0 - \{ a_0 \sin \psi_0 + l \sin(\psi_1 + \alpha) \\ + f_1 \sin \psi_1 \} \quad (5) \end{aligned}$$

2.2 수학모델

예선과 피예선에 작용하는 동유체력과 외력의 수학모델은 다음과 같다 [7]

(1) 유효추력

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

$$\begin{aligned} X_{P0} = (R_0 + R_1) \\ - (X_{W0S} + X_{W1S}) \quad (6) \end{aligned}$$

여기서 R_0, R_1 은 각각 예선, 피예선에 작용하는 전저항으로서 예항속도가 저속이므로 Schoenherr 식으로부터 구한다. 그리고 X_{W0S}, X_{W1S} 는 정상직진시 예선, 피예선에 작용하는 풍압력의 x 방향 성분을 나타낸다.

(2) 주선체에 작용하는 동유체력

$$\begin{aligned} X_H' = -R' (1 + 13\beta^2) \\ Y_H' = Y_\beta' \beta + Y_r' r' \\ N_H' = N_\beta' \beta + N_r' r' \quad (7) \end{aligned}$$

여기서 예선, 피예선에 관한 첨자 0, 1을 생략하

고 있으며 Y_H', N_H' 는 선형유체력만을 생각하고, 각 유체력미계수는 Inoue 식 [8] 으로부터 추정한다. 그리고 X_H' 에는 사항(斜航)에 의한 저항증가량으로서 Jinnaka [9] 의 연구결과를 이용한다.

(3) 타에 작용하는 유체력

$$\begin{aligned} X_R' &= -F_N' \sin \delta \\ Y_R' &= -(1 + a_H) F_N' \cos \delta \\ N_R' &= \frac{1}{2} (1 + a_H) F_N' \cos \delta \end{aligned} \quad (8)$$

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

$$\begin{aligned} F_N' &= \frac{6.13 \Lambda}{(\Lambda + 2.25)} \left(\frac{A_R}{Ld} \right) (1-w)^2 \\ &\quad \times \{1 + g(s)\} \sin \alpha_R \\ a_H &= 0.63 C_B - 0.15 \\ g(s) &= 0.6 \eta (2 - 1.4s) s / (1-s)^2 \\ \eta &= D / H_R \\ s &= 1 - V(1-w) / nP \\ w &= 0.6329 - 1.552 C_B + 1.5034 C_B^2 \\ n &= 1.744 \left(\frac{V}{D} \right) \\ &\quad \times \left\{ \frac{C_{T0} S_{A0} + C_{T1} S_{A1}}{D^2} \right\}^{1/3} \\ \alpha_R &= \delta - \gamma (\beta + r') \end{aligned} \quad (9)$$

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 Taylor도표를 커브핏팅하였다 [10]. n 은 매초당 프로펠러 회전수로서 추진계수 $\eta = 0.6(\eta = EHP/DHP)$, 토오크계수 $K_Q \approx$

0.025라 가정할 때의 근사식이다. 그리고 본 논문에서는 예선의 타각을 다음과 같이 자동조타하는 것으로 간주한다.

$$\delta_0 = -K_1 \phi_0 - K_2 r_0' \quad (10)$$

여기서 K_1, K_2 는 비례정수로서, Koyama의 연구결과 [11]를 참조하여 $K_1 = 1.0$, $K_2 = 0.05$ 를 가정한다.

(4) 풍압외력

Fig. 1에서 예선의 경우(첨자 "0"), 상대풍속을 V_{A0} , 상대풍향을 ϕ_{A0} 라 하면

$$\begin{aligned} V_{A0} &= \sqrt{V_w^2 + V_0^2 - 2V_w V_0 \cos \{\pi - (\beta_0 + \phi_w - \phi_0)\}} \\ \phi_{A0} &= \tan^{-1} \left\{ \frac{-\sin \beta_0 + (V_w/V_0) \sin(\phi_w - \phi_0)}{\cos \beta_0 + (V_w/V_0) \cos(\phi_w - \phi_0)} \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

와 같고, 이때 풍압외력은 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} X_{W0}' &= -(\rho_A/\rho) (A_{T0}/L_0 d_0) \\ &\quad \times C_{X0} \cdot (V_{A0}/V_0)^2 \\ Y_{W0}' &= -(\rho_A/\rho) (A_{L0}/L_0 d_0) \\ &\quad \times C_{Y0} \cdot (V_{A0}/V_0)^2 \\ N_{W0}' &= -(\rho_A/\rho) (A_{L0}/L_0 d_0) \\ &\quad \times C_{N0} \cdot (V_{A0}/V_0)^2 \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 ρ_A 는 공기의 밀도, A_{T0}, A_{L0} 는 각각 예선의 수면 상부 정면적과 측면적이다. 그리고 C_{X0}, C_{Y0}, C_{N0} 는 ϕ_{A0} 의 함수로서 Isherwood 회귀식 [12] 으로부터 구한다. 피예선의 경우에는 식(11), (12)에서 첨자 "0" 대신에 "1"로 표시하면 된다.

(5) 예항삭의 장력

정상직진 상태에서 예항삭에 작용하는 장력 T_{0S} 는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$T_{0S} = R_1 - X_{W1S} \quad (13)$$

운동상태에서의 장력을 T_0 라 하면

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

따라서

$$\begin{aligned} X_{T_0} &= -T_0 \cos(\phi_0 - \phi_1 - \alpha) \\ Y_{T_0} &= T_0 \sin(\phi_0 - \phi_1 - \alpha) \\ N_{T_0} &= -T_0 a_0 \sin(\phi_0 - \phi_1 - \alpha) \end{aligned} \quad (15)$$

피예선의 경우에는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} X_{T_1} &= T_1 \cos \alpha \\ Y_{T_1} &= T_1 \sin \alpha \\ N_{T_1} &= T_1 f_1 \sin \alpha \quad \text{단, } T_1 = T_0 \end{aligned} \quad (16)$$

2.3 침로안정성

운동변수 $\phi_0, \beta_0, \phi_1, \beta_1, \alpha$ 의 변화가 미소 하고, 선속이 $V_0 = V_1 = V$ 라 가정할 때, 식 (2), (4) 및 2.2절의 수학모델로부터 예선, 피예선의 운동방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} &-(m_0' + m_{y_0'})(L_0/V) \ddot{\beta}_0 + (m_0' + m_{x_0'}) \\ &\times (L_0/V) \dot{\phi}_0 = Y_{\beta 0'} \beta_0 + Y_{r_0'} (L_0/V) \dot{\phi}_0 \\ &+ C_{F0} [K_1 \phi_0 + K_2 (L_0/V) \dot{\phi}_0 \\ &+ \gamma_0 \{ \beta_0 + (L_0/V) \dot{\phi}_0 \}] + Y_{w_0'} \\ &+ T_0' (\phi_0 - \phi_1 - \alpha) \\ (I_{z_0'} + J_{z_0'}) (L_0/V)^2 \ddot{\phi}_0 \\ &= N_{\beta 0'} \beta_0 + N_{r_0'} (L_0/V) \dot{\phi}_0 \\ &- \frac{1}{2} C_{F0} [K_1 \phi_0 + K_2 (L_0/V) \dot{\phi}_0 \\ &+ \gamma_0 \{ \beta_0 + (L_0/V) \dot{\phi}_0 \}] + N_{w_0'} \\ &- T_0' a_0' (\phi_0 - \phi_1 - \alpha) \\ &-(m_1' + m_{y_1'})(L_1/V) \ddot{\beta}_1 + (m_1' + m_{x_1'}) \\ &\times (L_1/V) \dot{\phi}_1 = Y_{\beta 1'} \beta_1 + Y_{r_1'} (L_1/V) \dot{\phi}_1 \\ &+ C_{F1} \gamma_1 \{ \beta_1 + (L_1/V) \dot{\phi}_1 \} \\ &+ Y_{w_1'} + T_1' \alpha \\ (I_{z_1'} + J_{z_1'}) (L_1/V)^2 \ddot{\phi}_1 \\ &= N_{\beta 1'} \beta_1 + N_{r_1'} (L_1/V) \dot{\phi}_1 \\ &- \frac{1}{2} C_{F1} \gamma_1 \{ \beta_1 + (L_1/V) \dot{\phi}_1 \} \\ &+ N_{w_1'} + T_1' f_1' \alpha \end{aligned} \quad (17)$$

단, $a_0' = a_0/L_0$. $f_1' = f_1/L_1$

$$\begin{aligned} C_{F0} &= (1 + a_{H0}) \\ &\times \left\{ \frac{6.13 \lambda_0}{\lambda_0 + 2.25} \right\} \cdot \left(\frac{A_{R0}}{L_0 d_0} \right) \\ &\times (1 - w_0)^2 \cdot \left\{ 1 + \frac{0.6 \eta_0 (2 - 1.4s)s}{(1-s)^2} \right\} \\ C_{F1} &= (1 + a_{H1}) \left\{ \frac{6.13 \lambda_1}{\lambda_1 + 2.25} \right\} \\ &\times \left(\frac{A_{R1}}{L_1 d_1} \right) \cdot (1 - w_1)^2 \end{aligned} \quad (18)$$

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

$$\begin{aligned} \beta_1 &= -\phi_0 + \beta_0 + \phi_1 + a_0' (L_0/V) \dot{\phi}_0 \\ &+ l' (L_1/V) (\dot{\phi}_1 + \dot{\alpha}) \\ &+ f_1' (L_1/V) \dot{\phi}_1 \quad \text{단, } l' = l/L_1 \end{aligned} \quad (19)$$

식(19)를 식(17)에 대입하여 정리하면 다음과 같다. 단, $\dot{\phi}_0 = \phi_1$, $\dot{\phi}_1 = \phi_2$, $\dot{\alpha} = \phi_3$ 와 같이 표현한다.

$$\begin{aligned} A_0 \dot{\phi}_1 &= A_1 \phi_1 + A_4 \beta_0 + A_5 \phi_0 + A_6 \phi_1 \\ &+ A_7 \alpha + A_8 \\ B_0 \dot{\phi}_2 &= B_1 \phi_1 + B_2 \phi_2 + B_3 \phi_3 + B_4 \beta_0 \\ &+ B_5 \phi_0 + B_6 \phi_1 + B_7 \alpha + B_8 \\ C_0 \dot{\phi}_3 &= C_1 \phi_1 + C_2 \phi_2 + C_3 \phi_3 + C_4 \beta_0 \\ &+ C_5 \phi_0 + C_6 \phi_1 + C_7 \alpha + C_8 \\ &+ C_9 \dot{\phi}_1 + C_{10} \dot{\phi}_2 + C_{11} \dot{\beta}_0 \\ D_0 \dot{\beta}_0 &= D_1 \phi_1 + D_4 \beta_0 + D_5 \phi_0 + D_6 \phi_1 \\ &+ D_7 \alpha + D_8 \end{aligned} \quad (20)$$

여기서 계수 $A_0, A_1, \dots, B_0, B_1, \dots, C_0, C_1, \dots, D_0, D_1, \dots$ 은 식(17)의 유체력미계수 등으로 구성된다.

운동변수 $\phi_1, \phi_2, \dots, \alpha$ 가 초기평형상태(정상직진상태)로부터 미소교란 $\Delta \phi_1, \Delta \phi_2, \dots, \Delta \alpha$ 의 변화가 일어났다고 가정하면 식(20)으로부터 다음 관계식을 얻는다.

$$\frac{d}{dt}(\Delta\phi_1) = a_1\Delta\phi_1 + a_4\Delta\beta_0 + a_5\Delta\phi_0 + a_6\Delta\psi_1 + a_7\Delta\alpha$$

$$\frac{d}{dt}(\Delta\phi_2) = b_1\Delta\phi_1 + b_2\Delta\phi_2 + b_3\Delta\phi_3 + b_4\Delta\beta_0 + b_5\Delta\phi_0 + b_6\Delta\psi_1 + b_7\Delta\alpha$$

$$\frac{d}{dt}(\Delta\phi_3) = c_1\Delta\phi_1 + c_2\Delta\phi_2 + c_3\Delta\phi_3 + c_4\Delta\beta_0 + c_5\Delta\phi_0 + c_6\Delta\psi_1 + c_7\Delta\alpha$$

$$\frac{d}{dt}(\Delta\beta_0) = d_1\Delta\phi_1 + d_4\Delta\beta_0 + d_5\Delta\phi_0 + d_6\Delta\psi_1 + d_7\Delta\alpha$$

$$\frac{d}{dt}(\Delta\phi_0) = \Delta\phi_1, \quad \frac{d}{dt}(\Delta\psi_1) = \Delta\phi_2,$$

$$\frac{d}{dt}(\Delta\alpha) = \Delta\phi_3 \quad (21)$$

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

$$\begin{aligned} a_i &= A_i/A_0, \quad b_i = B_i/B_0, \\ d_i &= D_i/D_0 \quad (\text{단, } i = 1 \sim 7) \\ c_1 &= C_1/C_0 + a_1 C_9/C_0 + b_1 C_{10}/C_0 + d_1 C_{11}/C_0 \\ c_2 &= C_2/C_0 + b_2 C_{10}/C_0 \\ c_3 &= C_3/C_0 + b_3 C_{10}/C_0 \\ c_i &= C_i/C_0 + a_i C_9/C_0 + b_i C_{10}/C_0 + d_i C_{11}/C_0 \quad (\text{단, } i = 4 \sim 7) \end{aligned} \quad (22)$$

식(21)의 고유치를 λ 라 하면 특성방정식은 다음과 같이 표시된다.

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

또는

$$\lambda^7 + P_1\lambda^6 + P_2\lambda^5 + P_3\lambda^4 + P_4\lambda^3 + P_5\lambda^2 + P_6\lambda + P_7 = 0 \quad (24)$$

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

식(24)의 대수방정식의 해를 구하여 λ 의 실수부가 양(+)의 값을 가지면 예선·피예선계는 침로불안정하다. 일반적으로 예선은 거의 직진운동을 하므로 예선·피예선계가 침로불안정하다는 것은 피예선이 침로불안정하다는 것을 의미한다.

2.4 손상선박의 최종홀수

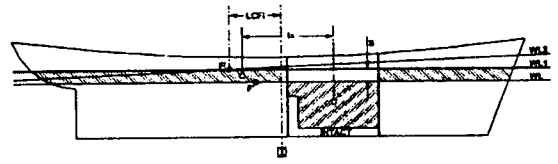


Fig. 2 Sinkage and trim by lost buoyancy method

Fig. 2에서 홀수 WL 로 떠 있던 선박이 어떤 구획실이 침수되어 최종 평형 상태에서 홀수 WL_2 가 되었다고 하자. 침수가 진행되는 동안 제 1단계에서 홀수 WL_1 으로 평행침하만 일어나고, 제 2단계에서 홀수 WL_2 로 트림이 발생한 것으로 간주한다.

제 1단계에서의 평행침하량을 S , 제 2단계에서의 선미트림량을 t 라 하면, 손상후의 최종홀수 df, da 는 다음과 같이 구해진다 [13].

$$\begin{aligned} df &= df_0 + S - t \times (0.5 - LCF_1'/L) \\ da &= da_0 + S + t \times (0.5 + LCF_1'/L) \end{aligned} \quad (25)$$

여기서 df_0, da_0 는 손상전의 선수, 선미 홀수, LCF_1' 는 홀수 WL_1 의 비손상 수선면의 부면심 위치이다.

3. 수치계산 및 고찰

제 2장에서 언급한 방법에 따라 풍압력하에서

피예항중인 손상선박의 침로안정성을 수치계산에 의해 검토한다.

본 연구에서 계산의 대상으로 한 공시선의 주요 목은 Table 1과 같다. 예선은 블라드풀(bollard pull) 35톤 규모의 항만 출입항 보조 업무용 터그보트이고, 피예선은 중형규모의 벌크선(bulk carrier)이다. 피예선은 손상선박을 가상하고 있으므로, 이 선박의 화물창 배치를 나타내는 측면 형상을 Fig. 3에 나타낸다. 단, Fig. 3에서 화물창 격벽 위치를 표시하는 수치는 수선간장 3m 모형선에 대한 것이다. 피예선의 손상전 만재 및 공선 상태에서의 흘수 및 침수율 등은 Table 2와 같다. 그리고 피예선의 손상상태를 나타내는 손상번호를 Table 3과 같이 정의한다. Fig. 4는 비손상시 공선상태로 있던 3m 급 모형선에 대한 각 손상상태에서의 최종흘수의 계산치와 실험결과를 나타내고 있다. Fig. 4는 모든 손상상태에서의 실험결과는 아니지만, 2.4절에서 언급한 손상시의 최종흘수 계산법에 따른 계산치가 실험결과를 잘 뒷받침하고 있다는 것을 알 수 있다.

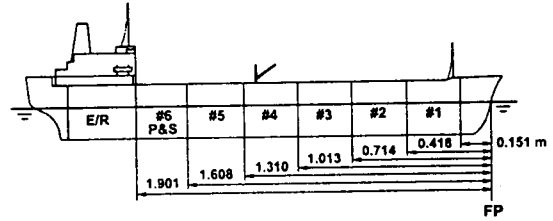


Fig. 3 Profile and hold arrangement of towed ship(numerical value is expressed in model size, $L = 3m$)

Table 2 Loading condition of towed ship before damage

	Full load	Ballast
Draft		
fore df (m)	7.50	3.71
aft da (m)	8.50	4.41
Permeability		
volume μ	0.5	0.95
surface μ_s	0.5	0.97

Table 1 Principal dimensions of tow and towed vessels

Items	Tug boat	Towed Ship
Hull		
Length overall L_{OA} (m)	30.3	175.0
Length bet. perpen. L (m)	26.0	167.0
Breath B (m)	8.3	22.6
Depth D (m)	3.7	13.4
Mean draft d (m)	2.6	8.0
Block coefficient C_B	0.6	0.76
Rudder		
Height H_R (m)	1.38	5.69
Area ratio A_R/Ld	0.020 (1/49.7)	0.0154 (1/64.85)
Aspect ratio Λ	1.4	1.57
Propeller		
Diameter D (m)	1.10	4.60
Pitch ratio P/D	0.86	0.77

Table 3 Definition of damage numbers of towed ship

Damage No.	Damaged hold
-1	#6 port
1	#6 star.
2	#5
3	#4
4	#3
5	#2
6	#1
7	#6 port & star.
8	#6 port & #5
9	#6 star. & #5
10	#5 & #4
11	#4 & #3
12	#3 & #2
13	#2 & #1

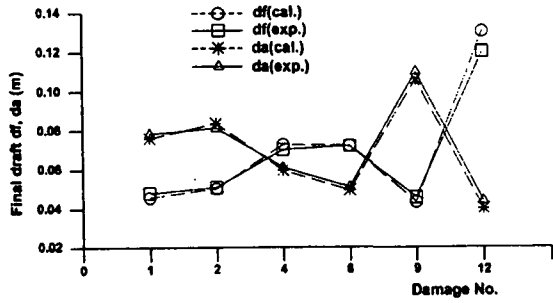
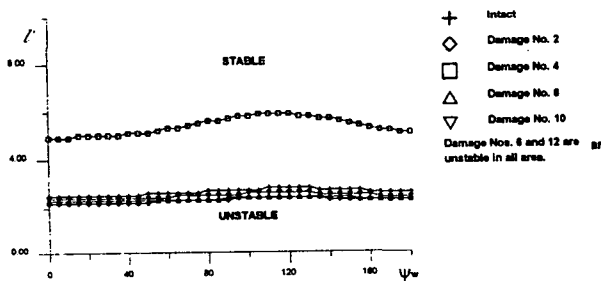
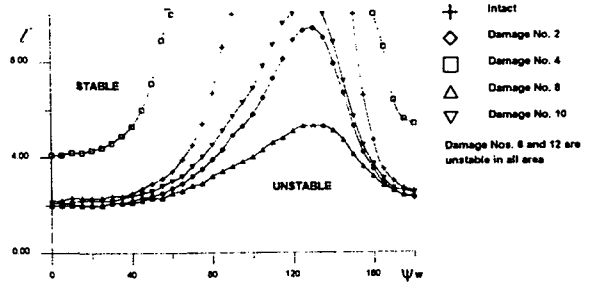


Fig. 4 Final drafts of towed ship after damage (ballast condition in model size, $L=3m$)

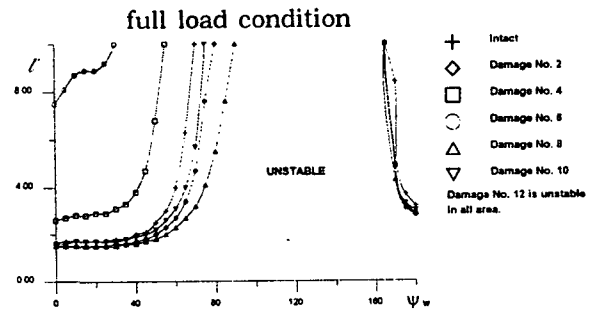
다음으로 각 손상상태에서의 침로안정성의 계산 결과를 Figs. 5 (a)~(e)와 Figs. 6 (a)~(e)에 나타낸다. Fig. 5는 손상전 만재상태, Fig. 6은 손상전 공선상태에서의 계산결과이다. 모든 경우에 예항선속은 3 knot를, 예항점의 위치는 $a_0' = 0.1, f_1' = 0.5$ 를 상정하였으며, 해상상태를 나타내는 Beaufort 등급에 따라 각각 계산을 수행하였다. 계산순서는 다음과 같다. 먼저 각 손상상태에 따른 최종흘수를 계산하고 이 흘수에 대응하는 유체력미계수, 타력계수 (rudder force coefficients) 및 풍압면적을 구하고, 각 풍향에 따른 특성방정식의 해를 구하여 안정성 여부를 판별한다. Fig. 5와 Fig. 6에서 횡축은 절대풍향 ψ_w 를, 종축은 예항선의 길이의 무차원치 l' 를 나타내고 있으며, 각 손상상태에 대한 곡선들은 침로안정과 침로불안정의 경계선을 나타내고 있다. 각 곡선의 상부가 안정영역, 하부가 불안정영역이다. 계산결과를 보면 일반적으로 약한 풍속에



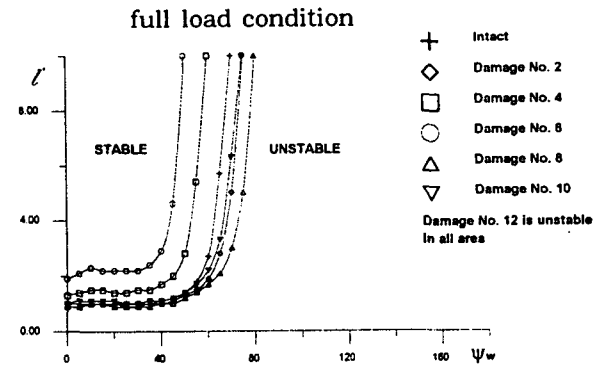
(a) Beaufort No.1 ($V_w = 0.95 m/sec$), full load condition



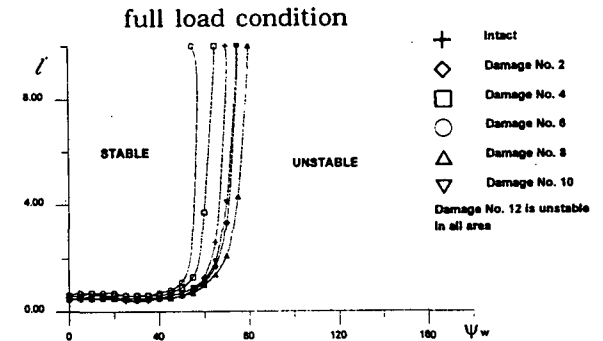
(b) Beaufort No.3 ($V_w = 4.45 m/sec$), full load condition



(c) Beaufort No.5 ($V_w = 9.40 m/sec$), full load condition

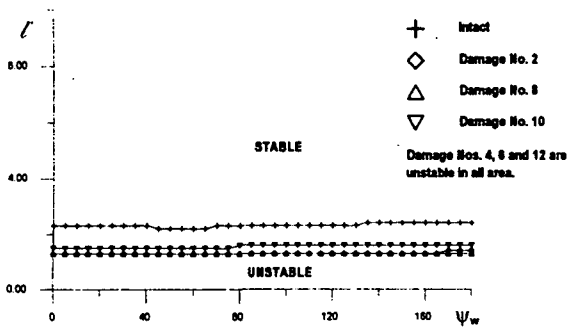


(d) Beaufort No.7 ($V_w = 15.55 m/sec$), full load condition

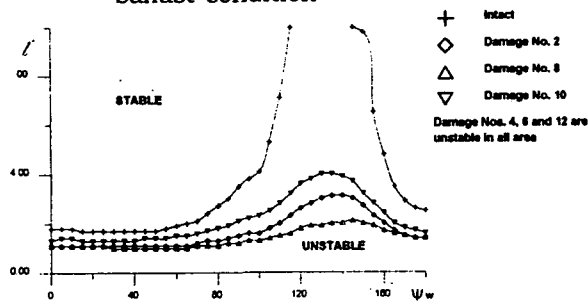


(e) Beaufort No.9 ($V_w = 22.65 m/sec$), full load condition

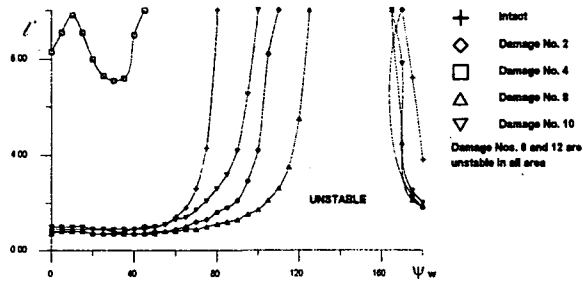
Fig. 5 Course stability of towed ship as function of towrope length and wind direction (full load condition)



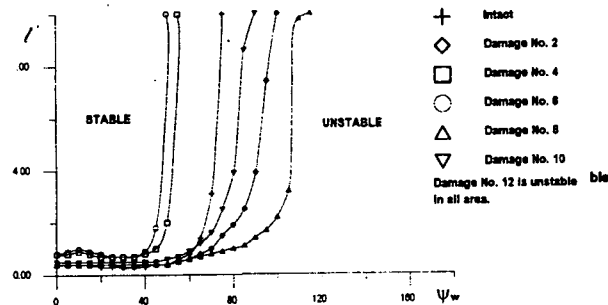
(a) Beaufort No.1 ($V_w = 0.95$ m/sec).
ballast condition



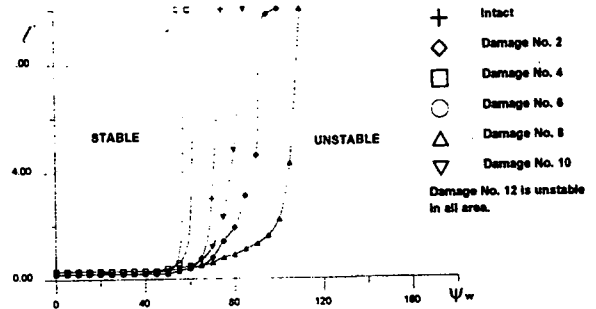
(b) Beaufort No.3 ($V_w = 4.45$ m/sec).
ballast condition



(c) Beaufort No.5 ($V_w = 9.40$ m/sec).
ballast condition



(d) Beaufort No.7 ($V_w = 15.55$ m/sec).
ballast condition



(e) Beaufort No.9 ($V_w = 22.65$ m/sec).
ballast condition

Fig. 6 Course stability of towed ship as function of towrope length and wind direction(ballast condition)

서는 횡풍의 경우, 강한 풍속에서는 횡풍과 추사 풍의 경우 불안정영역이 확대된다는 것을 알 수 있다. 그리고 이러한 경향은 손상상태에 따른 최종흘수 변화에 따라 변화한다는 것을 알 수 있다. 한편, 피예선의 선체고유의 침로안정성과 풍압력하에서의 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) s_l 과 유체력미계수 사이의 관계는 다음과 같다 [14].

$$s_l = \frac{N_r' HR}{Y_r' HR - (m' + m_x')} - \frac{N_{\beta}' HR}{Y_{\beta}' HR} \quad (26)$$

$$Y_{\beta HR}' = Y_{\beta}' + C_{FY}$$

$$Y_r' HR = Y_r' + C_{FY}$$

$$N_{\beta}' HR = N_{\beta}' - \frac{1}{2} C_{FY}$$

$$N_r' HR = N_r' - \frac{1}{2} C_{FY} \quad (27)$$

여기서 γ 와 C_F 는 각각 식(9)와 식(18)에서 정의한 정류계수와 타력계수이다. 식(26), (27)에 따라 계산한 결과는 예선의 경우에는 s_l 의 값이 대략 0.5로서 침로안정하며, 피예선의 경우에는 Table 4와 같다. Table 4를 보면 비손상시에는 침로안정하지만, 손상상태에 따라 침로불안정하게 되는 경우가 있다. 이러한 피예선의 각 손상상태에 따른 선체고유의 침로안정성의 경향과 Figs. 5~6에서의 침로안정성과는 밀접한 상관관계가 있음을 알 수 있다. 즉, 손상선박의 최종흘수에서의 선체고유의 침로안정성이 나빠질수록 풍압력하에서 피예항중일 때의 침로안정성이 나빠지는 경향을 보이고 있다.

Table 4 Inherent course stability lever of towed ship according to damage condition

	Full load	Ballast
Intact	0.165	0.091
Damage No. 2	0.295	0.222
4	0.062	-0.110
6	-0.040	-0.268
8	0.439	0.403
10	0.315	0.247
12	-0.222	-1.659

4. 결 론

외력으로서 풍압력만을 고려했을 때 예선·피예선계의 침로안정성 평가를 위한 특성방정식을 도출하였으며, 특히 피예선이 손상선박일 때 손상상태, 해상상태, 예항사의 길이 및 풍향 등에 따른 침로안정성을 수치계산하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 예선·피예선계의 침로안정성은 피예선 단일 선체 고유의 침로안정성과 밀접한 상관관계가 있다. 즉, 피예선의 선형 유체력 미계수가 예선·피예선계의 침로안정성에 지배적 영향을 나타내고 있다.
- 2) 피예선이 손상선박인 경우 손상후 최종평형

흘수에서의 선체고유의 침로안정성이 나빠질수록 풍압력하에서의 침로안정성도 나빠지는 경향을 보인다.

- 3) 피예선의 침로안정성에 미치는 바람의 영향은, 풍속이 강할수록 풍향에 따른 침로안정·불안정영역의 변화가 현저하며, 특히 횡풍과 추사풍의 경우 불안정영역이 확대된다. 아울러 이러한 경향은 손상상태에 따른 최종평형흘수 변화에 따라서도 변화한다.
- 4) 예항사의 길이가 침로안정성에 미치는 영향은, 풍속이 약한 경우에는 예항사의 길이를 연장함으로써 안정화가 가능하지만, 풍속이 강한 경우에는 횡풍, 추사풍을 제외한 일부 영역에서만 안정화가 가능하고 기타 영역에서는 불가능하다.

후 기

“이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 대학부설연구소 연구비 지원에 의하여 연구되었음 (과제명 : 손상된 선박의 구난기술 및 안전예항에 관한 연구)”

참 고 문 헌

- [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 동유체력

- 의 수학모델”, 대한조선학회논문집, 제29권, 제3호, 1992.
- [6] 이호영 등, “초기설계단계에서 선박조종 성능 추정에 대한 정도향상 연구”, 대한조선학회논문집, 제35권, 제1호, 1998.
- [7] 이승건 등, “초기설계시 선박의 선미형상을 고려한 조종성능 추정에 관한 연구”, 대한조선학회논문집, 제36권, 제2호, 1999.
- [8] Inoue, S., et al., “Hydrodynamic Derivatives on Ship Manoeuvring”, International Shipbuilding Progress, Vol. 28, No. 321, 1981.
- [9] Jinnaka, T., et al., “Some Treatments on the Calculation of Turning of Ships”, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.111, 1962(in Japanese).
- [10] Lewis, E. V., “Principles of Naval Architecture”, 2nd Revision, Vol. II, Published by SNAME, page 158, 1988.
- [11] 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).
- [12] Isherwood, R. M., “Wind Resistance of Merchant Ships”, Transaction of the Royal Institution of Naval Architects, Vol. 115, 1973.
- [13] 손경호 등, “MARPOL 73/78에 의한 탱커선형의 손상시 복원성 평가법에 관한 연구”, 대한조선학회 1998년도 춘계학술대회논문집, 1998.
- [14] 손경호 등, “타의 스펠길이에 따른 면적변화가 침로 안정성에 미치는 영향에 관한 연구”, 대한조선학회논문집, 제33권, 제4호, 1996.