追波中에서 航行하는 船舶의 復原性能에 관한 基礎的 研究

尹 順 東*·孫 景 浩**

A Fundamental Study on the Transverse Stability of Ships in Following Seas

Soon-Dong Yoon · Kyoung-Ho Son

〈目　次〉

Abstract

When a ship is running in following seas, the encounter frequency is reduced to a very low one. In that case broaching, surf-riding and capsizing phenomena are most likely to occur due to wave exciting forces acting on a ship in following seas.

In this paper, the emphasis is mainly laid upon transverse stability of ships in following seas, which is related to capsizing phenomenon. The authors take the case that ship speed is equal to the wave celerity, i.e., the encounter frequency is zero. Hydrostatic force and moment due to Froude-Krylov hypothesis are calculated by line intergral method. Transverse stability is evaluated from hydrostatic force and moment.

Through the application of present calculation method to box-shaped vessel, it is confirmed that the transverse stability of a vessel can be reduced to critical level at wave crest.

I. 序　論

고속으로 항행하는 콘테이너선 또는 어선 등이 추파를 받으면, 파도와 선체의 만남주파수(encounter frequency)가 낮아져서 장주기의 대진폭을 갖는 선체운동이 유발된다. 그 대표적인 예로서 Surf-riding 現象 및 轉覆(Capsizing) 現

* 正會員, 木浦海洋專門大學
** 〃 , 韓國海洋大學

象 등으로 특히 파장이 선체길이와 비슷한 추파를 만났을 때에 현저하다는 사실을 Motora,[1] Hamamoto[2] 等이 제시하였다.

追波中의 이러한 現象이 어떤 海象에서, 어떤 原因으로 발생하여, 船舶의 復原性能에 어느 정도의 영향을 주는지는 아직 명확하게 알려져 있지 않다.

필자들은 Froude-krylov 假說을 이용하여[3] 追波特有의 問題들을 해석하고, 이러한 이론으로 追波中 復原性能을 구하는 理論式을 도출하였다.

적용대상으로 箱子型船舶을 취하여, 이론식에 의한 추파중 선체의 자세변화와 복원성능의 변동량을 구하고, 그 경향을 분석한다.

Ⅱ. 追波中에서의 船體運動特性

일반적으로 船體와 波와의 만남주파수가 船體의 고유주파수보다 아주 크면 응답이 미소하고, 반대로 船體의 고유주파수가 만남주파수보다도 아주 크면 응답은 만남주파수에 비례한다.

또한 만남주파수(ω_e)가 선박의 고유주파수 부근이면 응답은 최대가 된다.

선박이 파도의 진행방향과 동일방향으로 속도 U로 항행하며, 파도의 전파속도를 C, 파장을 λ라고 하고, 만남주기를 T_e라고 하면 만남주파수(ω_e)는 (1)식으로 표시된다.

$$\omega_e=\frac{2\pi}{T_e}=\frac{2\pi}{\lambda/|C-U|}=\frac{2\pi}{\lambda}|C-U| \cdots(1)$$

무저항 운동방정식과 Reach와 속력과의 관계를 이용하면, 선박의 횡동요 고유주파수(ω_ϕ), 종동요 고유주파수(ω_θ) 및 선수동요 응답주파수(ω_Ψ)는 (2)식이 된다.

$$\left.\begin{aligned}\omega_\phi&=\sqrt{\frac{W\overline{GM}}{I_x+J_x}}\\ \omega_\theta&=\sqrt{\frac{W\overline{GM_L}}{I_y+J_y}}\\ \omega_\Psi&=U/\text{Reach}\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots(2)$$

(2)식을 개략적으로 계산하기 위한 근사값으로 (3)식을 가정한다.

$$\left.\begin{aligned}&\overline{GM_L}\simeq L,\ \overline{GM}\simeq 0.05B\\ &I_x+J_x\simeq\left(\frac{W}{g}\right)(0.4B)^2\\ &I_y+J_y\simeq 2\left(\frac{W}{g}\right)(0.25L)^2\\ &L/B\simeq 6.4,\ \text{Reach}\simeq\frac{3}{2}L\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots(3)$$

단, $\overline{GM_L}$: 종메타센터높이

$\overline{GM}$: 횡메타센터높이

L : 선박의 길이

B : 선폭

I_x, J_x : 횡방향의 관성모우멘트, 횡방향의 부가관성모우멘트

I_y, J_y : 종방향의 관성모우멘트, 종방향의 부가관성모우멘트

W : 선체의 배수량

g : 중력가속도

(1)식과 (2)식을 $\omega'=\omega\sqrt{L/g}$로 무차원화하면 각각의 주파수들은 개략적으로 다음 (4)식이 된다.

$$\left.\begin{aligned}\omega_e'&=\sqrt{\frac{2\pi L}{\lambda}}\left|1-\left(\frac{U}{C}\right)\right|\\ \omega_\theta'&=2\sqrt{2}\\ \omega_\phi'&=\sqrt{2}\\ \omega_\Psi'&=\frac{2}{3}(U/\sqrt{gL})\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots(4)$$

(4)식을 이용하여 ω_e'를 종축에, $\left(\frac{U}{C}\right)$를 횡축으로 취하여 $L/\lambda=1$에 대하여 나타낸 것이 Fig. 1이다.

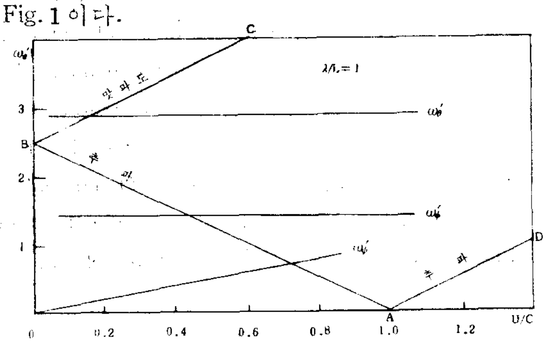

Fig. 1. Region of the ship's natural frequency & encounter frequency

Fig. 1에서 AB와 AD는 추파(following seas)를 나타내고, BC는 맞파도(heading seas)를 나타낸다.

A점은 파도의 전파속도(C)와 선박의 항행속도(U)가 동일한 준 정적인 극한점으로 파도와 선체가 병진하는 상태를 나타낸다.

맞파도의 영역에서는 종동요 고유주파수와 만나게 되고, 추파영역에서는 횡동요 고유주파수와 선수동요 응답주파수가 만나게 된다.

따라서 추파중에서는 횡동요와 선수동요가 현저하게 발생할 가능성이 높다[1]. 한편 추파중에서는 Surf-riding 현상에 의해서 선박이 파도와 병진하는 상태가 일정시간 지속되는 경우가 있으며, 이러한 상황에서는 파도와 선체의 상대적 위치관계에 따라서 수선면적, 선체침하부의 형상이 바뀌어서 횡복원력은 현저하게 변동된다[2].

본 연구에서는 파도와 선체가 병진하는 상태에서의 선체자세변화 및 횡복원력의 이론계산법을 개발하고자 한다.

Ⅲ. 理論計算法

3·1 定式化

추파중 선박의 운동을 定式化하기 위하여 다음과 같이 假定한다.

① 流體는 비점성·비압축성이고, 유체입자의 유동은 비회전이며, 파도는 일정방향에서 오는 규칙파이며 미소진폭파이다.

② 流體力은 선체 각 횡단면에 작용하는 2차원 유체력을 구하여, 선체길이 방향으로 적분한 값을 3차원 유체력이라고 간주한다.

③ 선체는 등속으로 직진하고, 波와 船體와의 만남주파수(ω_e)와 만남각(χ)이 零으로서 파도와 선체는 같은 방향으로 병진한다.

좌표계로서 정지수면에서 파도의 진행방향을 X축으로 하는 공간고정좌표계($\bar{0}-XYZ$)와 정지수면에서 선수방향을 x축으로 하는 선체고정좌표계($0-xyz$)를 취한다.

선체의 무게중심(G)은 수선면 아래에 있는 것을 양(+)으로 하고, 횡방향은 우현을 양(+)으로 하고, 각 파면에서의 선체중심위치는 ξ/λ의 값으로서 나타낸다.

$\xi/\lambda=0\sim0.5$는 오르막파면, $\xi/\lambda=0.5$는 파정, $\xi/\lambda=0.5\sim1.0$은 내리막파면, 그리고 $\xi/\lambda=0$ 또는 1.0은 파저에 각각 선체중심(重心)이 있음을 나타낸다.

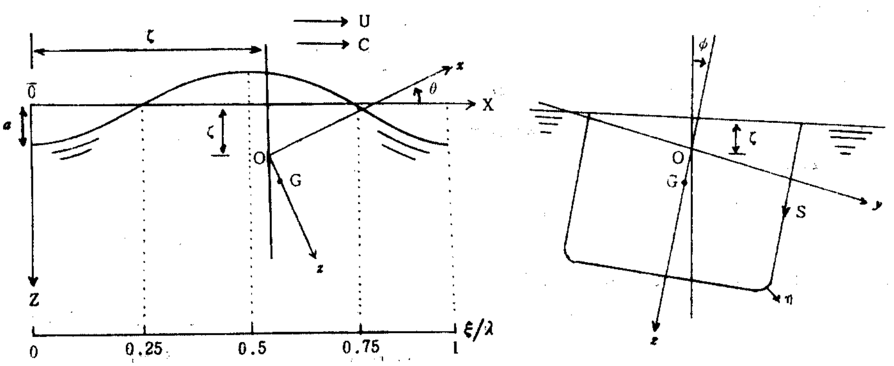

Fig. 2. Coordinate systems

선체의 자세변화를 나타내는 변수로서 침하량을 ζ, 종경사각을 θ로서 나타내고, 침하량 ζ는 수선면 하방을 양(+)으로 하고, 종경사각 θ는 선수상승을 양(+)으로 한다.

파의 진폭을 a, 파의 전파속도를 c, 파수를 $k=2\pi/\lambda$라고 하면 2차원 규칙파의 속도퍼텐셜(Φ)은

$$\Phi=-ace^{-kZ}\sin(kX-\omega t) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (5)$$

로서 표시한다.

파표면의 압력은 零인 경계조건을 이용하면

표면파의 식(Z_w)은 (6)식으로 나타내고

$$Z_w=\frac{1}{g}\left.\frac{\partial\Phi}{\partial t}\right|_{z=0}=a\cos(kX-\omega t) \quad \cdots\cdots\cdots(6)$$

파랑중의 수압(P)은 (7)식으로 나타낸다.

$$\begin{aligned}P&=\varphi gZ-\varphi\frac{\partial\Phi}{\partial t}\\&=\text{靜水壓}(P_S)+\text{動壓}(P_{FK}) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(7)\end{aligned}$$

단, φ : 물의 밀도, g : 중력가속도

시각 $t=0$일 때에 선체고정좌표계의 원점 0 (정지상태에서의 선체무게 중심을 지나는 수직선과 수선면과의 교점)의 위치를 ξ라고 하면 공간고정좌표($\overline{0}-XYZ$)와 선체고정좌표($0-xyz$)의 관계는 (8)식이 된다.

$$\left.\begin{aligned}X&=\xi+x\cos\theta\\&\quad+(y\sin\phi+z\cos\phi)\sin\theta+Ut\\Z&=\zeta-x\sin\theta\\&\quad+(y\sin\phi+z\cos\phi)\cos\theta\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots(8)$$

종경사각 θ와 횡요각 ϕ가 미소하고, 선체를 세장체라고 하면 (8)식은 (9)식으로 나타낼 수 있다.

$$\left.\begin{aligned}X&\simeq\xi+x+Ut\\Z&\simeq\zeta-x\theta+y\phi+z\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(9)$$

추파(만남각 $\chi=0$)중에서 만남주파수(ω_e)가 $\omega_e=k|C-U|=0$일 때에 파면을 선체고정좌표로 표시하여 보면 (10)식이 된다.

$$\begin{aligned}z_w&=-\zeta+x\theta-y\phi+Z_w\\&=-\zeta+x\theta-y\phi+a\cos k(\xi+x) \quad \cdots\cdots(10)\end{aligned}$$

(9)식을 (7)식에 대입하면 파랑중의 靜水壓(P_S)과 動壓(P_{FK})은 (11)식으로 나타낸다.

$$\left.\begin{aligned}P_S&=\varphi g(\zeta-x\theta+y\phi+z)\\P_{FK}&=-\varphi gae^{-k(\zeta-x\theta+y\phi+z)}\cos k(\xi+x)\end{aligned}\right\} \quad (11)$$

선체표면의 압력에 의한 선체표면에 작용하는 힘($\boldsymbol{F}_w$)과 모우멘트($\boldsymbol{M}_w$)는 (12)식으로 구한다.

$$\left.\begin{aligned}\boldsymbol{F}_w&=-\iint P\boldsymbol{n}dA\\\boldsymbol{M}_w&=-\iint \boldsymbol{r}\times P\boldsymbol{n}dA\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(12)$$

단, $\boldsymbol{F}_w=(X, Y, Z)$, $\boldsymbol{M}_w=(K, M, N)$

$\boldsymbol{n}$: 외향단위 법선벡터

$\boldsymbol{r}$: (x, y, z)

n_x, n_y, n_z : $\boldsymbol{n}$의 방향여현

dA : 몰수부 선체표면의 면적요소

3·2 波와 並進하는 선체의 자세

선체에 작용하는 연직력(Z)과 종경사 모우멘트(M)로서 선체의 자세변화를 구할 수 있다.

2차원 횡단면에 작용하는 연직력$\left(\frac{dZ}{dx}\right)$은 線積分을 이용하여 (13)식으로 구한다.

$$\begin{aligned}\left(\frac{dZ}{dx}\right)&=-\int_C(P_S+P_{FK})n_ZdS\\&=-\int_{-B/2}^{B/2}(P_S+P_{FK})dy \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(13)\end{aligned}$$

(13)식에서 dS는 선적분 경로의 선요소를 의미하며, S의 방향은 Fig. 2와 같이 우현에서 좌현으로 향한다.

2차원 횡단면에 작용하는 종경사 모우멘트 $\left(\frac{dM}{dx}\right)$는 (14)식으로 표시된다.

$$\begin{aligned}\left(\frac{dM}{dx}\right)&=-\int_C(P_S+P_{FK})(zn_x-xn_z)dS\\&\simeq\int_{-B/2}^{B/2}(P_S+P_{FK})xdy\\&=-x\left(\frac{dZ}{dx}\right) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(14)\end{aligned}$$

파와 병진하는 선체가 정적평형상태를 유지하려면 연직력은 선체중량의 연직성분과 평형이며, 모우멘트는 零이어야 한다.

선체 각 횡단면에서의 횡방향 2차원 유체력을 $\left(\frac{dY}{dx}\right)$라고 하면, 선체가 정적평형 상태이기 위한 조건은 (15)식으로 표시된다.

$$\left.\begin{aligned}&\int_L\left\{\left(\frac{dZ}{dx}\right)\cos\phi+\left(\frac{dY}{dx}\right)\sin\phi\right\}dx+W\\&=0\\&-\int_L\left\{\left(\frac{dZ}{dx}\right)\cos\phi+\left(\frac{dY}{dx}\right)\sin\phi\right\}x\cdot dx\\&=0\end{aligned}\right\} \quad (15)$$

횡경사시 수평방향의 힘은 평형이어야 하므로 (16)식을 만족하여야 한다.

$$\left(\frac{dZ}{dx}\right)\sin\phi=\left(\frac{dY}{dx}\right)\cos\phi \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(16)$$

(16)식을 (15)식에 대입하면 (17)식과 같은 조건식이 구해진다.

$$\left.\begin{aligned}&\int_L\left(\frac{dZ}{dx}\right)dx+W\cos\phi=0\\&\int_L\left(\frac{dZ}{dx}\right)xdx=0\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(17)$$

(11), (13)식을 이용하여 (17)식을 정리하면 (18)식과 같은 관계식이 얻어진다.

$$\left.\begin{aligned} &-\int_L Bdx\cdot\zeta+\int_L xBdx\cdot\theta+ \\ &a\int_L J_c\cos kxdx\cos k\xi- \\ &a\int_L J_c\sin kxdx\sin k\xi=0 \\ &-\int_L xBdx\cdot\zeta+\int_L x^2Bdx\cdot\theta+ \\ &a\int_L xJ_c\cos kxdx\cos k\xi- \\ &a\int_L J_c x\sin kxdx\sin k\xi=0 \end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots(18)$$

(18)식을 간단히 정리하면 침하량(ζ)과 종경사(θ)에 대한 정적평형조건식 (19)가 된다.

$$\left.\begin{aligned} &D_Z\zeta+E_Z\theta+F_Z=0 \\ &D_M\zeta+E_M\theta+F_M=0 \end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(19)$$

$$\left.\begin{aligned} \text{단, }\ &D_Z=-\int_L Bdx,\quad E_Z=\int_L xBdx \\ &F_Z=A_0\cos k\xi+A_0'\sin k\xi \\ &D_M=-\int_L xBdx,\quad E_M=\int_L x^2Bdx \\ &F_M=A_1\cos k\xi+A_1'\sin k\xi \\ &A_0=a\int_L J_C\cdot\cos kxdx \\ &A_0'=-a\int_L J_C\cdot\sin kxdx \\ &A_1=a\int_L J_C\cdot\cos kxdx \\ &A_1'=-a\int_L x\cdot J_C\cdot\sin kxdx \\ &J_C=2\int_0^{B/2}e^{-kz}dy \end{aligned}\right\}\cdots\cdots(20)$$

(19)식의 해를 구하면 추파중 각 파면상에서의 선체침하량(ζ)과 종경사(θ)를 구할 수 있다.

3·3 追波中에서의 復原性

Fig. 3과 같이 선체횡단면의 중심선과 정지수면과 만나는 점을 0, 정횡방향을 y축, 연직하방을 z축으로 선체고정좌표를 취한다.

정수중의 복원아암을 $\overline{GZ}$라고 하면, 정적평형조건을 이용하여 y축 방향의 유체력(Y) 및 0점 주위의 유체력 모우멘트(K)는 선체중량과 평형이어야 하므로 (21)식이 된다.

$$K+Y\cdot\overline{OG}+W\overline{GZ}=0 \cdots\cdots\cdots\cdots(21)$$

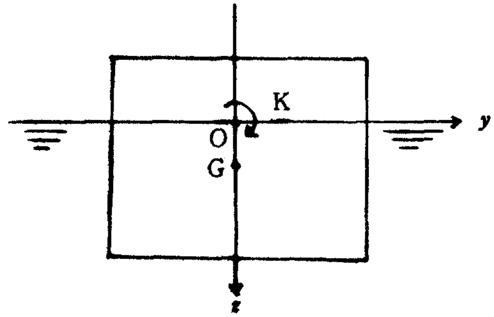

Fig. 3. sign definition for roll moment

(21)식으로부터 정수중의 복원아암 $\overline{GZ}$에 관하여 정리하여 (22)식을 얻는다. 단, ∇ : 선박의 체적을 나타낸다.

$$\overline{GZ}=-\frac{1}{\rho g\nabla}(K+Y\cdot\overline{OG})\cdots\cdots\cdots\cdots(22)$$

(22)식은 파랑중에서도 만족되어야 하므로 이 식에 파랑중의 유체력 Y와 파랑중의 유체력 모우멘트 K를 대입하면 파랑중의 복원아암($\overline{GZ}^*$)이 구해진다.

2차원 횡단면에 작용하는 횡방향 유체력$\left(\frac{dY}{dx}\right)$은

$$\begin{aligned} \left(\frac{dY}{dx}\right)&=-\int_C(P_S+P_{FK})n_y dS \\ &=-\int_C(P_S+P_{FK})dz \\ &=-\left[\int_{ZST}^{d}+\int_d^{ZPO}\right](P_S+P_{FK})dz \\ &\simeq-\left[\int_0^d+\int_d^0\right]P_S dz-\left[\int_0^d+\int_d^0\right]P_{FK}dz \\ &=\left(\frac{dY}{dx}\right)_S+\left(\frac{dY}{dx}\right)_{FK} \cdots\cdots\cdots(23) \end{aligned}$$

단, 첨자 S는 정수압에 의한 유체력, 첨자 FK는 Froude-krylov 유체력을 의미한다.
Z_{ST}는 선체자세 변화로 인한 수면의 침하량이며, Z_{PO}는 선체자세 변화로 인한 파면의 상승량을 나타낸다.

전선체에 작용하는 횡력(Y)은 2차원 횡단면에 작용하는 유체력$\left(\frac{dY}{dx}\right)$을 선체길이 방향으로 적분하여 얻어진다.

$$Y=\int_L\left(\frac{dY}{dx}\right)dx\cdots\cdots\cdots\cdots(24)$$

2차원 횡단면에 작용하는 횡경사 모우멘트 $\left(\frac{dK}{dx}\right)$는

$$\left(\frac{dK}{dx}\right)=-\int_C (P_S+P_{FK})\{yn_z-zn_y\}dS$$
$$=\int_C (P_S+P_{FK})(ydy+zdz)$$
$$=-\int_{-B/2}^{B/2}(P_S+P_{FK})ydy$$
$$+\left[\int_{ZST}^{d}+\int_{d}^{ZPO}\right](P_S+P_{FK})zdz$$
$$\simeq-\int_{-B/2}^{B/2}(P_S+P_{FK})ydy$$
$$+\left[\int_0^d+\int_d^0\right](P_S+P_{FK})zdz$$
$$=\left(\frac{dK_1}{dx}\right)+\left(\frac{dK_2}{dx}\right)\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(25)$$

으로 계산된다. (25)식을 세분하여

$$\left(\frac{dK_1}{dx}\right)=-\int_{-B/2}^{B/2}P_S ydy-\int_{-B/2}^{B/2}P_{FK}ydy$$
$$=\left(\frac{dK_1}{dx}\right)_S+\left(\frac{dK_1}{dx}\right)_{FK}\cdots\cdots\cdots\cdots(26)$$
$$\left(\frac{dK_2}{dx}\right)=\left[\int_0^d+\int_d^0\right]P_S zdz+\left[\int_0^d+\int_d^0\right]P_{FK}\cdot zdz$$
$$=\left(\frac{dK_2}{dx}\right)_S+\left(\frac{dK_2}{dx}\right)_{FK}\cdots\cdots\cdots\cdots(27)$$

로서 분리할 수 있다.

전 선체에 작용하는 횡경사 모우멘트(K)는 2차원 횡단면에 작용하는 횡경사 모우멘트$\left(\frac{dK}{dx}\right)$를 선체길이 방향으로 적분하여 구해진다.

$$K=\int_L\left(\frac{dK}{dx}\right)dx\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(28)$$

추파중에서 복원성능의 변동은 (22)식을 이용하여 (29)식으로 구할 수 있다.

$$\overline{GZ}^*=-\frac{1}{\varphi g\nabla}(K+Y\cdot\overline{OG})\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(29)$$

K 및 Y에 관한 (23)~(28)식을 (29)식에 대입하여

$$\overline{GZ}^*=-\frac{1}{\varphi g\nabla}\int_L\left[\left(\frac{dK_1}{dx}\right)_S+\left(\frac{dK_2}{dx}\right)_S+\overline{OG}\left(\frac{dY}{dx}\right)_S\right]dx$$
$$-\frac{1}{\varphi g\nabla}\int_L\left[\left(\frac{dK_1}{dx}\right)_{FK}+\left(\frac{dK_2}{dx}\right)_{FK}+\overline{OG}\left(\frac{dY}{dx}\right)_{FK}\right]dx$$
$$=\overline{GZ}^{\text{부록 1 참조)}}-\frac{1}{\varphi g\nabla}\int_L\left[\left(\frac{dK_1}{dx}\right)_{FK}+\left(\frac{dK_2}{dx}\right)_{FK}+\overline{OG}\left(\frac{dY}{dx}\right)_{FK}\right]dx\cdots(30)$$

으로서 복원아암을 계산한다.

Ⅳ. 箱子型船舶에 대한 數學的인 解

상자형 선박의 크기를 $(L\times B\times d)$라고 하고, $e^{-k(\zeta-x\theta+y\phi+z)}\simeq e^{-kZs}$라고 가정하고, 단, 여기서 $Z_s=A_{(x)}/B_{(x)}$로서 대표파면까지의 깊이를 의미한다.

(18)식을 이용하고 상자형 선박의 계수값을 대입하여 침하량(ζ) 및 종경사(θ)를 구하면 (31), (32)식이 된다.

$$\zeta\cdot LB=ae^{-kZs}\int_L B(x)\cos k(\xi+x)dx$$
$$=ae^{-kZs}\cdot B\frac{1}{k}\Big[\sin k(\xi+x)\Big]_{-L/2}^{L/2}$$
$$=ae^{-kZs}\cdot B\frac{1}{k}\left(2\sin\frac{\pi L}{\lambda}\cos k\xi\right)$$

즉, $\zeta=ae^{-kZs}\left(\frac{\lambda}{\pi L}\right)\sin\frac{\pi L}{\lambda}\cos k\xi\cdots\cdots\cdots\cdots(31)$

$$-\theta\cdot\frac{1}{12}B\cdot L^3=ae^{-kZs}\int_L xB_{(x)}\cos k(\xi+x)dx$$
$$=ae^{-kZs}\left\{\left[\frac{x}{k}\sin k(\xi+x)\right]_{-L/2}^{L/2}-\frac{1}{k}\int_{-L/2}^{L/2}\sin k(\xi+x)dx\right\}$$
$$=ae^{-kZs}\cdot B\left(\frac{\lambda L}{2\pi}\sin k\xi\cos\frac{\pi L}{\lambda}-\frac{\lambda^2}{2\pi^2}\sin k\xi\sin\frac{\pi L}{\lambda}\right)$$

즉, $\theta=\frac{6a}{L}e^{-kZs}\left(\frac{\lambda}{\pi L}\right)\left\{\left(\frac{\lambda}{\pi L}\right)\sin\frac{\pi L}{\lambda}-\cos\frac{\pi L}{\lambda}\right\}\sin k\xi\cdots\cdots\cdots\cdots(32)$

상자형 선박의 복원력을 구하는 식을 얻기 위하여 먼저 $\left(\frac{dK_1}{dx}\right)_{FK}$, $\left(\frac{dK_2}{dx}\right)_{FK}$ 및 $\left(\frac{dY}{dx}\right)_{FK}$를 구하면 (33), (34), (35)식이 된다.

$$\left(\frac{dK_1}{dx}\right)_{FK}=-\int_{-B/2}^{B/2}P_{FK}ydy$$
$$=\varphi ga\cos k(\xi+x)\int_{-B/2}^{B/2}e^{-k(Z+\zeta-x\theta+y\phi)}ydy$$
$$=\varphi ga\cos k(\xi+x)\int_{-B/2}^{B/2}e^{-kz}[1-k(\zeta-x\theta+y\phi)]ydy$$
$$=\varphi ga\cos k(\xi+x)\left\{\int_{-B/2}^{B/2}e^{-kz}\right.$$

$$(1-k\zeta+kx\theta)ydy-\int_{-B/2}^{B/2}e^{-Zs}\cdot ky^2\phi dy\Big\}$$

$$=\varphi ga\cos k(\xi+x)\Big\{-\phi e^{-kZs}\cdot\frac{1}{3}\big[y^3\big]_{-B/2}^{B/2}\Big\}$$

$$=-\frac{1}{12}\varphi gae^{-kZs}\cdot k\phi B_{(x)}^3\cos k(\xi+x)\cdots(33)$$

$$\left(\frac{dK_2}{dx}\right)_{FK}=\Big[\int_o^d+\int_d^o\Big]P_{FK}zdz$$

$$=-\varphi ga\cos k(\xi+x)\Big[\int_o^d+\int_d^o\Big]e^{-k(z+\zeta-x\theta+y\phi)}dz$$

$$=-\varphi ga\cos k(\xi+x)\Big[\int_o^d+\int_d^o\Big]e^{-kz}$$

$$[1-k(\zeta-x\theta+y\phi)]dz\simeq 0\cdots\cdots\cdots(34)$$

$$\left(\frac{dY}{dx}\right)_{FK}=-\Big[\int_o^d+\int_d^o\Big]P_{FK}dz$$

$$=\varphi ga\cos k(\xi+x)\Big[\int_o^d+\int_d^o\Big]e^{-k(z+\zeta-x\theta+y\phi)}dz$$

$$=\varphi ga\cos k(\xi+x)\Big[\int_o^d+\int_d^o\Big]e^{-kz}$$

$$[1-k(\zeta-x\theta+y\phi)]dz$$

$$=0\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(35)$$

(29)식에 (33), (34), (35)식을 대입함으로서 추파중 상자형 선박의 복원아암($\overline{GZ}^*$)을 구하는 (36)식이 된다.

$$\overline{GZ}^*=\overline{GZ}-\frac{1}{\varphi g\nabla}\Big[\int_L\Big\{\left(\frac{dK_1}{dx}\right)_{FK}+\left(\frac{dK_2}{dx}\right)_{FK}+\overline{OG}\left(\frac{dY}{dx}\right)_{FK}\Big\}\Big]dx$$

$$=\overline{GZ}+\frac{ak\phi}{\nabla}e^{-kZs}\int_L\frac{1}{12}B_{(x)}^3\cos k(\xi+x)dx$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(36)$$

횡경사각이 미소하면 $\overline{GZ}^*\simeq\overline{GM}^*\cdot\phi$인 관계를 (36)식에 대입하여 추파중 상자형선박의 복원력($\overline{GM}^*$)을 구하는 (37)식이 얻어진다.

$$\overline{GM}^*=\overline{GM}+\frac{ake^{-kZs}}{\nabla}\int_L\frac{1}{12}B^3_{(x)}\cos k(\xi+x)dx$$

$$=\overline{GM}+\frac{1}{\nabla}ake^{-kZs}\cdot\frac{1}{12}B^3\cdot\frac{1}{k}\times\Big[\sin k(\xi+x)\Big]_{-L/2}^{L/2}$$

$$=\overline{GM}+\frac{1}{\nabla}ae^{-kZs}\cdot\frac{1}{12}B^3\left(2\sin\frac{\pi L}{\lambda}\cos k\xi\right)$$

즉, $$\overline{GM}^*=\overline{GM}+\left(\frac{2a}{L}\right)e^{-kZs}\cdot\overline{BM}\sin\frac{\pi L}{\lambda}\cos k\xi$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(37)$$

상자형 선박에 대한 이론식으로 자세 및 복원성능의 변동량을 계산하는데 사용한 상자형 선박의 요목은 표 1과 같다.

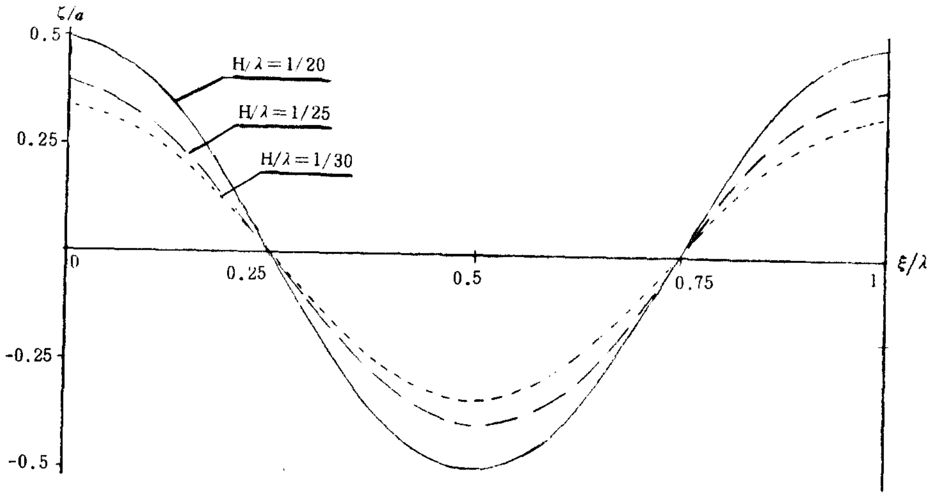

Fig. 4. Sinkage due to wave height

표 1 상자형 선박요목

선박의 길이 (L)	λ/L	L/B	B/d	2a/λ	$\overline{GM}$
2(m)	2	5	2.5	1/20	0.04B

다음 Fig. (4)~Fig. (10)은 추파중 상자형 선박의 자세 및 복원성능의 변동량을 나타내고 있다.

침하량(ζ)은 파의 진폭(a)으로 무차원화하고, 종경사(θ)는 최대파 경사각(Ⓗ)으로 무차원화하

고, 추파중 복원력($\overline{GM^*}$)은 정수중 복원력($\overline{GM}$)으로 무차원화하여 도시한다.

Fig.4, Fig.5는 침하량(ξ)의 파고 및 파장에 대한 변화, Fig.6, Fig.7은 종경사(Θ)의 파고 및 파장에 대한 변화, Fig.8~Fig.10은 복원력과 파고, 파장 및 선폭과의 관계를 보여준다.

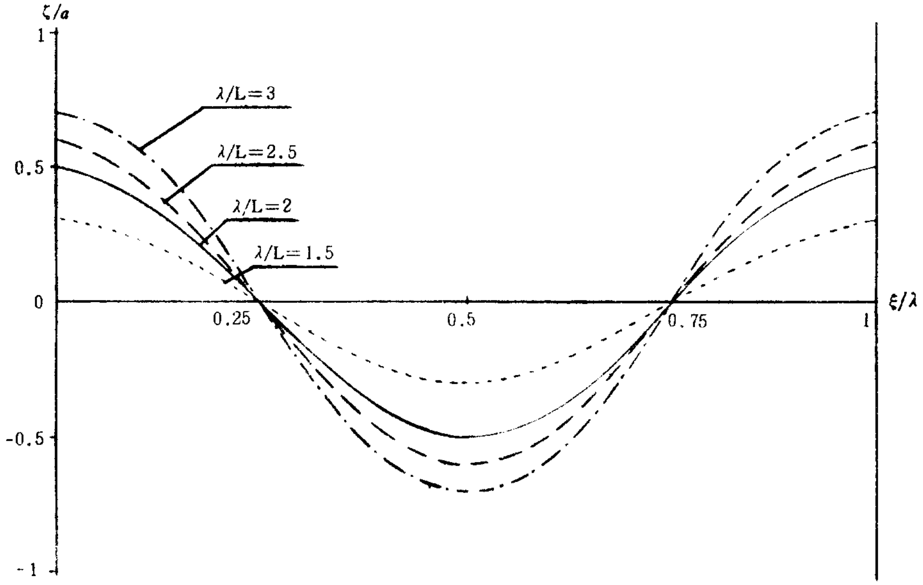

Fig. 5. Sinkage due to wave length

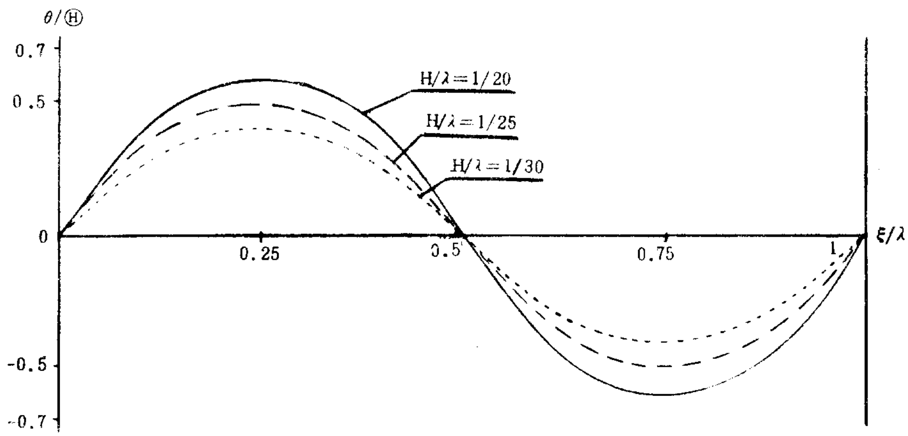

Fig. 6. Trim due to wave height

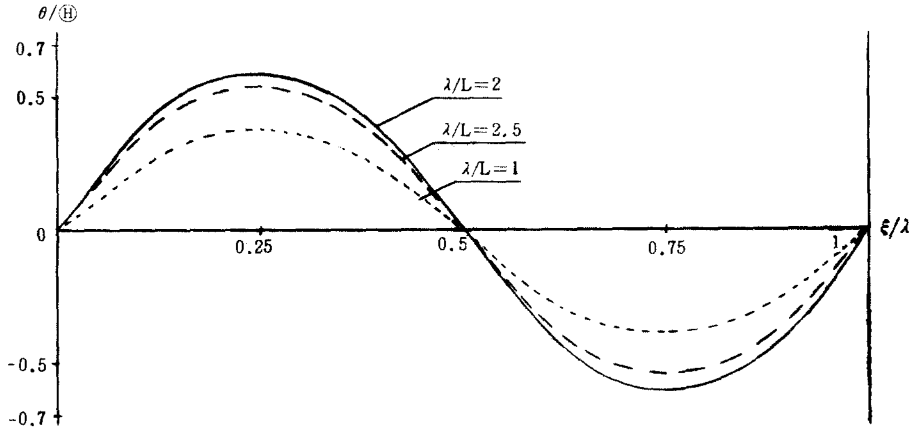

Fig. 7. Trim due to wave length

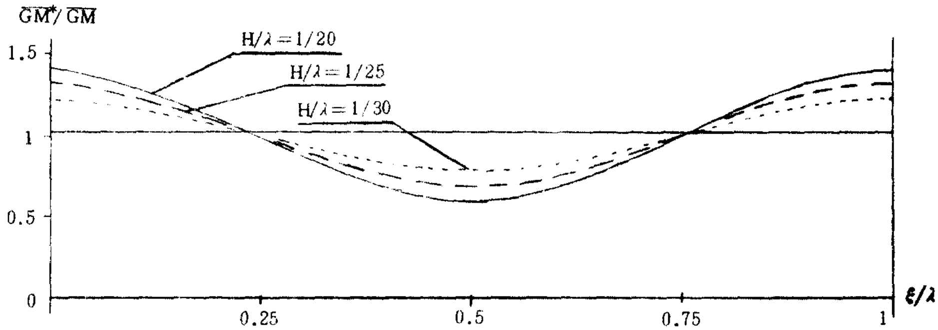

Fig. 8. Metacentric height due to wave height

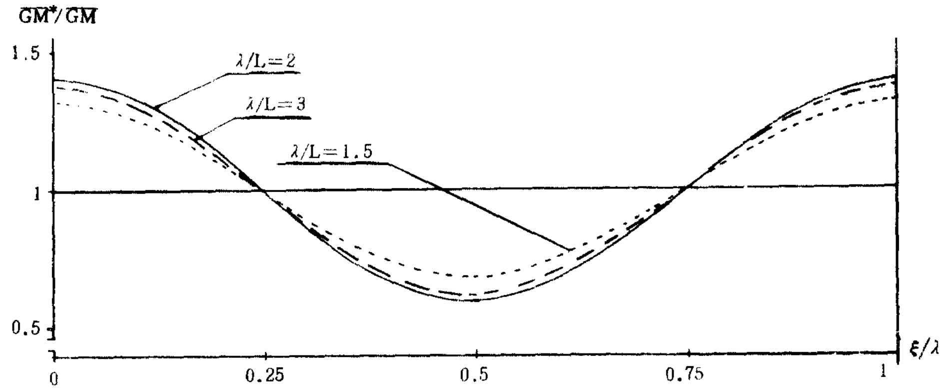

Fig. 9. Metacentric height due to wave length

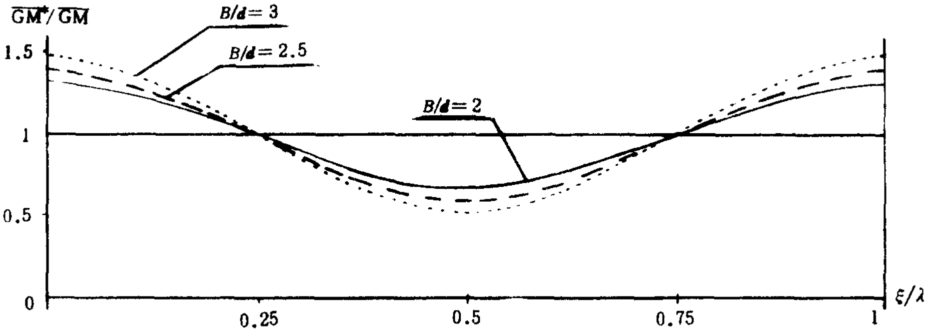

Fig. 10. Relationship between Metacentric height and hull breadth

V. 結　論

이상과 같은 분석결과 추파중의 상자형 선박에 대하여 다음과 같은 결론을 얻는다.

(1) 침하량(ξ)은 파고 및 파장에 비례한다.

(2) 종경사(θ)는 파고에 비례하고, $\lambda/L=2$일 때에 최대(최대파경사의 약 60%)가 된다.

(3) 복원력의 변화량은 파고와 선폭에 비례하고, 최대치는 정수중 복원력의 약 40% 증감이 된다.

(4) 대표적인 황천조선법인 Scudding 시에 추파중 복원력 증감 때문에 안전성을 재고해야 한다.

위와 같은 분석결과에도 불구하고 앞으로 실제선박에 대한 계산법을 얻기 위한 유체력 계산법의 연구가 계속되어야 할 것으로 본다.

參 考 文 献

① 元良誠三外：ブローチング現象発生機構に関する考察，日本造船學會論文集 第150號，p. 222(1981)

② 浜本剛實外：追波中の船の復原力變動に關する研究 關西造船協會誌 第185號，p. 49(1982)

③ 孫景浩外：追波中에서 航行하는 船體에 作用하는 波强制力에 關한 研究，大韓造船學會誌 第21卷，p. 27(1984)

④ 柏木正：追波中を斜航する船體に働く流体力に關する研究，大阪大學 學位論文，p. 4(1980)

⑤ 森田知治：船舶復原論，海文堂，p. 154(1985)

附 錄 1

정수압과 $\overline{GZ}$ 와의 관계

① $\left(\frac{dY}{dx}\right)_s = -\left[\int_o^d + \int_d^o\right] P_s dz = -\left[\int_o^d + \int_d^o\right] \left\{\varphi g(\zeta - x\theta + y\phi + z)\right\} dz$

$$= -\int_o^d \varphi g(\zeta - \theta + y\phi + z)\,dz + \int_o^d \varphi g(\zeta - x\theta + y\phi + z)\,dz = -2d\cdot y\cdot\varphi g\phi$$

$$= -\varphi g\phi A_{(x)}$$

② $\left(\frac{dK_1}{dx}\right)_s = -\int_{-B/2}^{B/2} \varphi g(\zeta - x\theta + y\phi + z)\,y\,dy = -\varphi g\phi \frac{B^3}{12}$

③ $\left(\frac{dK_2}{dx}\right)_s = \left[\int_o^d + \int_d^o\right] P_s\cdot z dz$

$$= \left[\int_o^d + \int_d^o\right] \varphi g(\zeta - x\theta + y\phi + z)\,z dz$$

$$= \varphi g\phi\left[\int_o^d + \int_d^o\right] yzdz = \varphi g\phi B\,\frac{d^2}{2}$$

$$= \varphi g\phi A\,\overline{OB}$$

따라서

$$-\frac{1}{\varphi g\nabla}\left\{\int_{-L/2}^{L/2} [②+③+\overline{OG}\cdot①]\,dx\right.$$

$$= -\frac{1}{\varphi g\nabla}\int_{-L/2}^{L/2}\left(-\varphi g\phi\frac{B^3}{12} + \phi g\phi A\overline{OB} - \varphi g\phi A\overline{OG}\right)dx$$

$$= -\frac{1}{\varphi g\nabla}\int_{-L/2}^{L/2}(-\varphi g\phi A_{(x)}\overline{GM})\,dx = \overline{GM}\cdot\phi$$

$$\simeq \overline{GZ}$$

附 錄 2

ⓐ $$\left(\frac{dY}{dx}\right)_{FK}=-\left[\int_o^d+\int_d^o\right]P_{FK}dz$$

$$=\varphi gae^{-k(\zeta-x\theta)}\left[\int_o^d+\int_d^o\right]e^{-k(z+y\theta)}dz\cdot\cos k(\xi+x)$$

단, $I_c=\left[\int_o^d+\int_d^o\right]e^{-k(z+y\theta)}\cdot dz$ 이라고 하면

$$\left(\frac{dY}{dx}\right)_{FK}=\varphi gae^{-k(\zeta-x\theta)}\cdot I_c\cdot\cos kx\cos k\xi-\varphi gae^{-k(\zeta-x\theta)}\cdot I_c\cdot\sin kx\sin k\xi$$

$$=A_1\cos k\xi+A_1{}'\sin k\xi$$

단, $$\begin{cases}A_1=\varphi gae^{-k(\zeta-x\theta)}\cdot I_c\cdot\cos kx\\ A_1{}'=-\varphi gae^{-k(\zeta-x\theta)}\cdot I_c\cdot\sin kx\end{cases}$$

ⓑ $$\left(\frac{dK_1}{dx}\right)_{FK}=-\int_{-B/2}^{B/2}P_{FK}\cdot ydy$$

$$=\varphi gae^{-k(\zeta-x\theta)}\int_{-B/2}^{B/2}e^{-k(z+y\theta)}\cdot ydy\cos k(\xi+x)$$

단, $J_{cy}=\int_{-B/2}^{B/2}e^{-k(z+y\theta)}\cdot y\cdot dy$ 이라고 두면

$$\left(\frac{dK_1}{dx}\right)_{FK}=A_2\cos k\xi+A_2{}'\sin k\xi$$

단, $$\begin{pmatrix}A_2\\ A_2{}'\end{pmatrix}=\varphi gae^{-k(\zeta-x\theta)}\cdot J_{cy}\cdot\begin{Bmatrix}\cos kx\\ -\sin kx\end{Bmatrix}$$

ⓒ $$\left(\frac{dK_2}{dx}\right)_{FK}=\left[\int_o^d+\int_d^o\right]P_{FK}\cdot zdz$$

$$=\varphi gae^{-k(\zeta-x\theta)}\left[\int_o^d+\int_d^o\right]e^{-k(z+y\theta)}z\cdot dz\cos k(\xi+x)$$

단, $I_{cz}=\left[\int_o^d+\int_d^o\right]e^{-k(z+y\theta)}\cdot zdz$ 이라면

$$\left(\frac{dK_2}{dx}\right)_{FK}=-\varphi gae^{-k(\zeta-x\theta)}\cdot I_{cz}\cos k(\xi+x)$$

$$=A_3\cos k\xi+A_3{}'\sin k\xi$$

단, $$\begin{pmatrix}A_3\\ A_3{}'\end{pmatrix}=-\varphi gae^{-k(\zeta-x\theta)}\cdot I_{cz}\begin{Bmatrix}\cos kx\\ -\sin kx\end{Bmatrix}$$