
 論 文

大韓造船學會誌
 第26卷 第1號 1989年 3月
 Journal of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 26, No. 1, March 1989

추파중에서 항행하는 선박의 복원성능에 관한 연구

손 경 호*, 윤 순 동**

A Study on Transverse Stability of Ships in Following Seas

by

K. H. Son* and S. D. Yun**

요 약

본 연구에서는 추파중에서 항행하는 선박의 전복현상과 관련된 횡복원성 문제를 다루었다.

추파중에서 항행하는 선박의 복원력 변동량을 이론적으로 규명하기 위해서, Froude-Krylov 가설과 파랑중에서의 정적 평형조건 등을 이용한 이론계산법을 정식화하였다. 그리고 본 이론계산법에 따라서 고속화물선 선형과 어선 선형에 대해서 복원력 변동량을 계산하였으며, 동일한 파랑조건하에서 실시된 Hamamoto의 모형실험 결과와 비교하였다.

상기 이론계산 결과 및 모형실험 결과로부터 추파의 파정에 선체중심이 위치하였을 때 복원력이 평수중에 비해서 절반이하로 감소되며, 이때 전복의 위험이 있다는 것을 확인할 수 있었다.

Abstract

When a ship is travelling in following seas, the encounter frequency is reduced to be very low. In that case surf-riding, broaching-to and capsizing phenomena are most likely to occur.

In the present paper, the emphasis is laid upon the transverse stability of ships in following seas, which is related to capsizing phenomenon.

The authors intend to clarify the mechanism of the stability variation in following seas. In order to predict that variation, the theoretical calculation method and computer programming are developed. The theoretical calculation is based on Froude-Krylov Hypothesis and static equilibrium condition in waves.

Through the application of present calculation method to cargo vessel and fishing boat, it is verified that the transverse stability in following seas with crest amidships can be reduced to a half extent in comparison with calm water stability. On the other hand, the present calculation results are compared with existing experimental data.

1. 서 론

고마력의 엔진이 탑재된 최근의 컨테이너선 또는 어

선 등은 비교적 고속으로 항행하는 경향이 있다. 이러한 선박이 추파를 받으면서 항행할 때에는 파도와 선체의 단남주파수가 낮아지므로, 장주기의 대진폭을 갖는 선체운동이 유발되기 쉽다. 그 대표적인 예로서

본 논문은 대한조선학회 1988년도 춘계연구발표회에서 발표된 논문임.

접수일자: 1988년 7월 5일, 재접수일자: 1988년 8월 12일

* 정회원, 한국해양대학

** 목포해양전문대학

surf-riding 현상[1], broaching 현상[2] 및 전복현상[3],[4] 등을 들 수 있다. 이러한 현상은 추파중에서 파도와 선체의 상대적 위치관계에 따라 선체물수부에 작용하는 파랑의력이 현저하게 변동되기 때문이라 생각된다.

추파중에서의 전복현상과 관련된 복원성능에 관한 연구는 Grim[5]에 의해서 처음으로 실시되었으며, 그 후 Kerwin[6], Paulling[7] 및 Hamamoto[8] 등에 의해서 체계적으로 정리되었다. 이들 연구결과에 의하면, 파장이 선체길이와 거의 비슷한 추파의 봉우리에 선체중심이 위치하였을 때 복원력은 크게 감소되는 것으로 규명되었다.

이러한 복원력 감소현상을 정성적뿐만 아니라 정량적으로 정확하게 추정하는 것은 선박의 안전운항을 위해서 필요하며, 또한 선박설계시 이에 대한 고려가 충분히 검토되어야 한다. 최근 세계해사기구(International Maritime Organization)의 안전분과위원회에서도 추파중에서의 안전성 확보 문제와 관련된 복원성기준 설정에 관한 검토가 활발히 이루어지고 있다[9],[10].

최근 Hamamoto는 추파중에서의 복원성능에 관한 연구[8]에서, 조파관을 이용한 구속모형실험을 실시하였으며, 아울러 이론계산에 의한 복원력변동량 추정법을 개발한 바 있다. 그는 이론계산에서 선체에 의해 교란되지 아니한 입사파의 변동압력을 선체표면에 대해서 적분하는 방법, 즉 Froude-Krylov 가설을 적용하였으며, 선체형상의 수식표현으로서는, 이웃한 두 offsets점 사이를 2차함수로 근사시켜 선체횡단면을 나타냈다. 이 방법은 상당히 정밀한 계산법으로 알려져 있으나, 실제로 많은 data 처리가 요구되며 선도가 완성되기 전의 초기설계 단계에서는 계산이 곤란한 점이 있다.

본 연구에서는 상기 연구자들의 연구를 토대로 하여 추파중에서 복원력이 변동하는 원인을 이론적으로 고찰, 규명하고자 하였으며, Froude-Krylov 가설을 적용한 유체력 계산법의 정식화 및 Lewis form 사상법을 이용한 선적분법 등을 도입하여 추파중에서의 선체자세변화 및 복원성능 추정법을 논하였다. 그리고 본 이론계산법을 적용시켜 소형 트롤러선 및 고속 화물선형에 대해서 추파중의 자세변화 및 복원성능을 계산하였으며, 이 계산결과를 Hamamoto의 계산치 및 실험자료 등[8],[11]과 비교, 검토하였다.

2. 이론 해석

2.1. 유체력 계산을 위한 정식화

실제의 현상은 대단히 복잡하지만, 추파중에서 파면에 선체중심이 위치하였을 때의 유체력 계산 및 복원력 평가를 이론적으로 해석하기 위해서 다음 사항을 가정한다.

- (i) 추파중에서는 만남주파수가 대단히 낮아지므로 그 극한으로서 만남주파수 영을 가정한다. 즉, 준정적 상태로 간주한다.
- (ii) 유체는 비점성, 비압축성 그리고 유체입자의 운동은 비회전으로 가정하고, 선형파이론에 의한 2차원 규칙파의 속도포텐셜을 적용한다.
- (iii) 유체력 계산에 있어서, 특별히 단서를 붙이지 않는 한 선체는 수선면 부근에서 wall side라 간주한다. 한편, 수선면 부근에서의 현측 flare 형상의 영향은 별도로 고려한다.
- (iv) 선체 각 횡단면에서의 2차원 유체력을 계산하고, 이들을 선미에서 선수까지 적분하여 3차원 선체에 작용하는 유체력으로 간주한다. 즉, strip method를 적용한다.

Fig. 1과 같이 정지 수선면에서 파도의 전파방향을 X축으로 하는 공간좌표계를 $O-XYZ$, 정지 수선면에

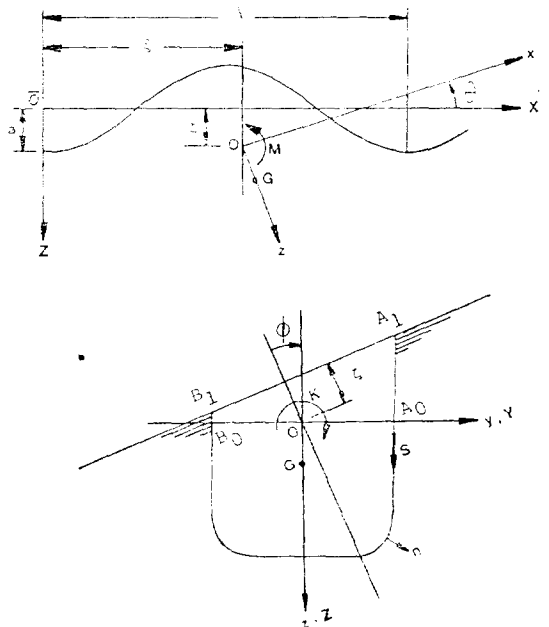


Fig. 1 Co-ordinate system and sign definition

추과중에서 항행하는 선박의 복원성능에 관한 연구

서 선수방향을 x 축으로 하는 선체고정좌표계를 $O-xyz$ 라 한다. 선체의 무게중심 G 는 그림에서와 같이 수선면 아래에 있는 것을 양(+)의 방향으로 한다. λ 는 파장, ξ 는 초기위치로부터 선체중심까지의 거리를 말한다. 그리고 각 파면에서의 선체중심위치는 ξ/λ 의 기호를 사용한다. 즉, $\xi/\lambda=0\sim 0.5$ 는 오르막 파면, $\xi/\lambda=0.5$ 는 파정, $\xi/\lambda=0.5\sim 1.0$ 은 내리막 파면 그리고 $\xi/\lambda=0$ 또는 1.0 은 파저에 각각 선체중심이 위치하고 있다는 것을 의미한다. 선체 자세변화를 나타내는 변수로서는, 침하량을 ζ , 종경사각을 θ 로 표시한다. 그리고 횡경사각은 ϕ 로 표시한다.

Fig. 1의 공간좌표계 $\bar{O}-XYZ$ 에서, X 축의 양(+)의 방향으로 전파하는 2차원 규칙파의 속도포텐셜 Φ 는 다음과 같이 표시된다.

$$\Phi = -ace^{-kz} \sin(kX - \omega t) \tag{1}$$

여기서 t : 시간 c : 파의 전파속도 k : 파수(= $2\pi/\lambda$)
 ω : 파의 원주파수
 a : 파의 진폭(= $H/2$ 단, H 는 파고)

식 (1)로부터 파면 Z_w 및 압력 P 는 다음과 같이 유도된다.

$$Z_w = a \cos(kX - \omega t) \tag{2}$$

$$P = \rho g Z - \rho g a e^{-kz} \cdot \cos(kX - \omega t) \tag{3}$$

여기서 ρ : 유체의 밀도 g : 중력가속도
 한편, 일반적으로 선체는 세장형이고 θ 와 ϕ 는 미소하다고 가정하면, $\bar{O}-XYZ$ 와 $O-xyz$ 의 양좌표계 사이의 관계는 다음과 같다.

$$X = \xi + x + Ut \tag{4}$$

$$Z = \zeta - x\theta + y\phi + z \tag{5}$$

여기서 U : 선박의 전진속도
 파도와 선체의 만남주파수 w_e 는 가정에 의해 다음과 같이 표시된다.

$$w_e = |w - kU| = 0 \tag{6}$$

식 (4), (5), (6)을 식 (2), (3)에 대입하면 선체고정좌표로 표시한 파면과 압력의 식이 다음과 같이 유도된다.

$$z_w = -(\zeta - x\theta) - y\phi + a \cos k(\xi + x) \tag{7}$$

$$P = \rho g (\zeta - x\theta + y\phi + z) - \rho g a e^{-k(\zeta - x\theta + y\phi + z)} \times \cos k(\xi + x) \tag{8}$$

식 (8)의 우변을 정수압 P_s 와 Froude-Krylov가설에 기인하는 입사파의 변동압력(파압) P_{FK} 로 나누어서 생각하면 다음과 같다.

$$P_s = \rho g (\zeta - x\theta + y\phi + z) \tag{9}$$

$$P_{FK} = -\rho g a e^{-k(\zeta - x\theta + y\phi + z)} \cos k(\xi + x) \tag{10}$$

압력 P 로부터 선체에 작용하는 유체력은 다음과 같이

계산된다.

$$F_w = - \iint_A P n dA \tag{11}$$

$$M_w = - \iint_A r \times P n dA \tag{12}$$

여기서 F_w, M_w 는 각각 유체력 및 유체력모멘트로서 $F_w = (X, Y, Z), M_w = (K, M, N)$ 으로 나타낸다. 그리고 dA 는 물수부 선체표면의 면적요소, n 는 dA 에 세운 외향 단위법선벡터로서 $n = (n_x, n_y, n_z), r$ 는 선체고정좌표의 원점 O 로부터 dA 까지의 위치벡터로서 $r = (x, y, z)$ 이다. 식 (11), (12)의 적분을 수행함으로써 선체에 작용하는 유체력 및 모멘트를 구할 수 있다.

2.2. 선체자세

2.2.1. 정수압 및 Froude-Krylov가설에 기인하는 유체력

선체에 작용하는 상하방향 유체력은 Z , 종경사모멘트는 M 으로 표시된다. 선체 각 횡단면에 작용하는 2차원 유체력 및 모멘트 $(\frac{dZ}{dx}), (\frac{dM}{dx})$ 는 식 (8), (11), (12)로부터 다음과 같이 계산된다. 정수압과 Froude-Krylov 가설에 기인하는 유체력은 Z 와 M 에 각각 하첨자 1을 붙여 표시한다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{dZ_1}{dx}\right) &= - \int_C (P_s + P_{FK}) n_z dS \\ &= - \int_{-B/2}^{B/2} (P_s + P_{FK}) dy \end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{dM_1}{dx}\right) &= - \int_C (P_s + P_{FK}) (zn_x - xn_z) dS \\ &\approx -x \cdot \left(\frac{dZ_1}{dx}\right) \end{aligned} \tag{14}$$

여기서 \int_C 는 선적분을 의미하며, dS 는 Fig. 1과 같이 적분경로의 선요소를 의미한다. 그리고 S 의 방향은 우현에서 좌현으로 향하는 것을 양(+)으로 한다. B 는 각 단면에서의 선폭을 의미한다. 식 (14)의 $(\frac{dM_1}{dx})$ 는 결국 $(\frac{dZ_1}{dx})$ 의 계산에 귀착된다. $(\frac{dZ_1}{dx})$ 는 구체적으로 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{dZ_1}{dx}\right) &= -\rho g A(x) - \rho g (\zeta - x\theta) \cdot B(x) \\ &\quad + 2\rho g a e^{-k(\zeta - x\theta)} \cdot J_1 \cdot \cos k(\xi + x) \end{aligned} \tag{15}$$

여기서

$$J_1 = \int_0^{B/2} e^{-kz} dy \quad (\text{부록1 참조}) \tag{16}$$

2.2.2. Diffraction 유체력

무한수심의 경우 2차원 규칙파의 유체입자는 원운동을 한다. 원운동 속도는 속도포텐셜을 나타내는 식 (1)을 미분함으로써 구해진다. 이 속도성분에 의해서 선체에는 동유체력이 작용하게 되는데 이 힘을 diffrac-

ction유체력이라 부르고, 본절에서 이 힘의 계산법을 논한다.

추파중에서 선체 자세변화 즉, θ 및 ζ 에 영향을 미치는 것은 유체입자의 수직방향 속도성분이며, 본 연구에서 가정한 $w_x=0$ 인 경우에 수직방향 속도성분은 선체고정좌표로 표시하면 다음과 같다.

$$u_z = wae^{-kz} \cdot \sin k(\xi+x) \quad (17)$$

여기서 $z_s = A(x)/B(x)$ 로서 대표 부파면까지의 깊이를 의미한다. 단, $A(x)$ 는 x 단면에서의 횡단면적, $B(x)$ 는 선폭을 나타낸다.

선체 각 횡단면에서의 선체형상을 근사적으로 폭 $B(x)$ 홀수 z_s 및 길이 dx 인 미소직육면체라 가정하고, 속도 u_z 의 유체흐름이 미소직사각형관 즉, 폭 $B(x)$ 및 길이 dx 인 선체에 수직으로 부딪힐 경우 상하방향으로 작용하는 유체력 $\left(\frac{dZ_2}{dx}\right)$ 및 종경사모우멘트 $\left(\frac{dM_2}{dx}\right)$ 는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\left(\frac{dZ_2}{dx}\right) = \frac{1}{2} \rho u_z |u_z| B(x) \cdot C_D \quad (18)$$

$$\left(\frac{dM_2}{dx}\right) = -x \cdot \left(\frac{dZ_2}{dx}\right) \quad (19)$$

여기서 C_D 는 항력계수로서 실험자료에 의하면 대략 2.0의 값을 취한다[12].

2.2.3. 선체 자세변화

추파중의 각 파면에서 선체가 정적 평형상태를 유지하기 위해서는 다음 관계식을 만족하여야 한다. 즉, 선체에 작용하는 상하방향 유체력 Z 및 종경사모우멘트 M 는 선체중량 W 와 평형을 유지하여야 한다.

$$\int_L \left\{ \left(\frac{dZ_1}{dx}\right) + \left(\frac{dZ_2}{dx}\right) \right\} dx + W \cdot \cos\phi = 0 \quad (20)$$

$$\int_L x \cdot \left\{ \left(\frac{dZ_1}{dx}\right) + \left(\frac{dZ_2}{dx}\right) \right\} dx = 0 \quad (21)$$

식 (15), (18)을 식 (20)에 대입하면 다음 관계식을 얻는다.

$$D_Z \zeta + E_Z \theta + F_Z = 0 \quad (22)$$

여기서

$$\left. \begin{aligned} D_Z &= - \int_L B(x) dx, \quad E_Z = \int_L x \cdot B(x) dx \\ F_Z &= 2a \int_L J_1 \cdot \cos k(\xi+x) dx + \frac{1}{2} ka^2 C_D \\ &\quad \times \int_L B(x) e^{-2kz} \cdot \sin k(\xi+x) \cdot |\sin k \\ &\quad \times (\xi+x)| dx \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

같은 방법에 의해 식 (21)은 다음과 같이 정리된다.

$$D_M \zeta + E_M \theta + F_M = 0 \quad (24)$$

여기서

$$\left. \begin{aligned} D_M &= - \int_L x \cdot B(x) dx, \quad E_M = \int_L x^2 \cdot B(x) dx \\ F_M &= 2a \int_L J_1 \cdot x \cdot \cos k(\xi+x) dx + \frac{1}{2} ka^2 C_D \\ &\quad \times \int_L x \cdot B(x) e^{-2kz} \cdot \sin k(\xi+x) \cdot |\sin k \\ &\quad \times (\xi+x)| dx \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

연립방정식인 식 (22), (24)를 ζ, θ 에 관해 풀면 추파중 각 파면상에서의 선체침하량과 종경사각을 얻게 된다.

2.3. 복원능력

2.3.1. 정수압 및 Froude-Krylov 가설에 기인하는 유체력

선체 각 횡단면에 작용하는 2차원 횡방향유체력 $\left(\frac{dY}{dx}\right)$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{dY}{dx}\right) &= - \int_C (P_S + P_{FK}) n_y dS \\ &= - \left[\int_0^d + \int_d^0 \right] (P_S + P_{FK}) dz \end{aligned} \quad (26)$$

여기에서 \int_C 는 선적분을, d 는 홀수를 의미한다.

$\left(\frac{dY}{dx}\right)$ 는 구체적으로 다음과 같이 계산된다.

$$\left(\frac{dY}{dx}\right) = - \int_C \rho g \phi A(x) + \rho g a e^{-k(\zeta-x\theta)} \cdot J_2 \cdot \cos k(\xi+x) \quad (27)$$

여기서

$$J_2 = \left[\int_0^d + \int_d^0 \right] e^{-k(z+y\phi)} dz \quad (\text{부록1 참조}) \quad (28)$$

한편, 선체 각 횡단면에 작용하는 2차원 횡경사모우멘트(Fig. 1에서 O 점 주위의 모우멘트) $\left(\frac{dK_1}{dx}\right)$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{dK_1}{dx}\right) &= - \int_C (P_S + P_{FK}) (y n_z - z n_y) dS \\ &= - \int_{-B/2}^{B/2} (P_S + P_{FK}) y dy \\ &\quad + \left[\int_0^d + \int_d^0 \right] (P_S + P_{FK}) z dz \end{aligned} \quad (29)$$

$\left(\frac{dK_1}{dx}\right)$ 는 구체적으로 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{dK_1}{dx}\right) &= - \int_C \rho g \phi A(x) \cdot B M(x) + \rho g \phi A(x) \cdot O B(x) \\ &\quad + \rho g a e^{-k(\zeta-x\theta)} J_3 \cdot \cos k(\xi+x) \\ &\quad - \rho g a e^{-k(\zeta-x\theta)} J_4 \cdot \cos k(\xi+x) \end{aligned} \quad (30)$$

여기서

$$J_3 = \int_{-B/2}^{B/2} e^{-k(z+y\phi)} \cdot y dy \quad (\text{부록1 참조}) \quad (31)$$

$$J_4 = \left[\int_0^d + \int_d^0 \right] e^{-k(z+y\phi)} \cdot z dz \quad (\text{부록1 참조}) \quad (32)$$

2.3.2. 현측 Flare 형상에 기인하는 유체력

일반적으로 선박은 선수미 부근에서 현측외판이 수선면과 경사진 형상 즉, flare를 가지고 있다. 지금까지 물수부 선체표면에 대한 압력적분을 수행할 때 flare의 영향을 무시하여 수선면 근처에서 wall side라 간주하였다. flare는 횡방향유체력 Y에는 거의 영향을 미치지 아니하지만 횡경사모멘트 K에는 크게 영향을 미친다는 것이 Paulling[7]에 의해서 지적되었다. 본절에서는 현측 flare 형상에 기인하는 횡경사모멘트의 계산법을 논한다.

선체 각 횡단면에서 우현 및 좌현의 선측외판이 경지수선면과 각각 A₀, B₀에서 만나며, 임의의 운동상태에서 우현 및 좌현의 선측외판이 파도의 외형과 각각 A₁, B₁에서 만난다고 가정한다. 그러면 A₀, B₀의 y좌표는 각각 B/2, -B/2, z좌표는 각각 0, 0이다. 그리고 A₁, B₁의 y좌표는 각각 y_s, -y_p, z좌표는 z_{ws}, z_{wp}라 한다.

파면의 z좌표는 선체고정좌표로 표시할 때 식 (7)로 주어졌다. z_{ws}, z_{wp}는 각각 식 (7)의 y대신에 y_s, -y_p를 대입하면 다음 식으로 표시된다.

$$\begin{aligned} z_{ws} &= -(\zeta - x\theta) - y_s \phi + a \cos k(\xi + x) \\ z_{wp} &= -(\zeta - x\theta) + y_p \phi + a \cos k(\xi + x) \end{aligned} \quad (33)$$

한편, 선측외판이 경지수선면과 각도 α를 이루며 직선적으로 변화한다고 가정하면, z_{ws} 및 z_{wp}는 다음 식으로도 표현된다.

$$\begin{aligned} z_{ws} &= -(y_s - B/2) \tan \alpha \\ z_{wp} &= (B/2 - y_p) \tan \alpha \end{aligned} \quad (34)$$

선체 각 횡단면에서 flare형상에 기인하는 횡경사모멘트 $\left(\frac{dK_2}{dx}\right)$ 는 다음 식으로 표시된다.

$$\left(\frac{dK_2}{dx}\right) = - \left[\int_{B/2}^{y_s} + \int_{-y_p}^{-B/2} \right] (P_s + P_{FK}) y \cdot dy \quad (35)$$

횡경사각 φ가 미소하다는 가정하에 식 (33), (34)로부터 y_s, y_p를 구해 식 (35)에 대입하여 적분을 수행하면 $\left(\frac{dK_2}{dx}\right)$ 는 구체적으로 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{dK_2}{dx}\right) &\simeq \frac{1}{2} \rho g \phi B^2(x) \cdot \gamma \cdot \{ -(\zeta - x\theta) + a \cos k \\ &\quad \times (\xi + x) \} \end{aligned} \quad (36)$$

여기서 γ=1/tan α이다.

2.3.3. 복원력변화

추파중의 각 파면에서 선체가 미소각도 φ만큼 횡경사된 상태에서 정적평형을 유지하기 위해서는 다음 관계식을 만족하여야 한다(부록2 참조).

$$K + Y \cdot OG + W \cdot GM^* \cdot \phi = 0 \quad (37)$$

여기서 Y, K는 선체에 작용하는 횡방향유체력과 횡경사모멘트, W는 선체중량, OG는 좌표원점 O로부터 무게중심 G까지의 높이, GM*는 추파중에서의 외전상의 메타센터높이다. 식 (61)로부터

$$GM^* = -\frac{1}{\rho g V \phi} (K + Y \cdot OG) \quad (38)$$

여기서 ρ: 유체의 밀도 g: 중력가속도 V: 배수용적 앞 절에서 구한 유체력 Y, K를 식 (38)에 대입하면 GM*는 다음 식으로 표시된다.

$$\begin{aligned} GM^* &= -\frac{1}{\rho g V \phi} \left\{ \int_L \left(\frac{dK_1}{dx}\right) dx + \int_L \left(\frac{dK_2}{dx}\right) dx \right. \\ &\quad \left. + OG \int_L \left(\frac{dY}{dx}\right) dx \right\} \end{aligned} \quad (39)$$

한편, 정수압에 기인하는 유체력은 다음 관계식이 성립됨을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} -\rho g \phi A(x) \cdot BM + \rho g \phi A(x) \cdot OB - \rho g \phi A(x) \cdot OG &= \\ -\rho g \phi A(x) \cdot GM \end{aligned} \quad (40)$$

여기서 GM*는 정수중에서의 메타센터높이, BM는 중심, 메타센터간의 높이 그리고 OB는 좌표원점 O로부터 중심까지의 높이이다.

따라서, 식 (27), (30), (36), (39) 및 (40)으로부터 파랑중에서의 메타센터 높이 GM*는 다음 식으로 표시된다.

$$\begin{aligned} GM^* &= GM - \frac{a}{V \phi} \int_L e^{-k(\zeta - x\theta)} (J_2 \cdot OG + J_3 - J_4) \\ &\quad \times \cos k(\xi + x) dx \\ &\quad - \frac{1}{2V} \int_L B^2(x) \cdot \gamma \cdot \{ \zeta + x\theta + a \cos k \\ &\quad \times (\xi + x) dx \} \end{aligned} \quad (41)$$

3. 수치계산 및 고찰

제 2 장에서 논한 이론해석에 따라서 소형 트롤어선과 고속 화물선 선형에 대해 계산을 수행하였다. 그리고 계산된 결과를 비슷한 선형의 어선에 대한 Hamamoto의 실험치 및 계산치 [8]과 비교하였으며, 동일 선형의 고속 화물선에 대해서도 실험치 [11]과 비교하였다.

본 계산에 이용한 선박의 주요치수를 Table 1에, 개략적인 선도를 Fig. 2, 3에 나타내었다.

어선선형에 대한 계산치 및 실험치를 Fig. 4, 5, 6, 7, 8, 9에, 화물선선형에 대한 계산치 및 실험치를 Fig. 10, 11, 12에 나타내었다. 그림에서 횡축은 파와 선체와의 상대위치 ξ/λ를 나타내고 있다. 예를 들면 ξ/λ가 0.5인 경우, 선체중심이 파정에 위치하고 있음을 뜻한

다. 그리고 종축은 선체 자세변화 ζ, θ 및 메타센터 높이가 GM^* 를 나타내고 있다. 종축에서 ζ 는 파진폭 a 로서, θ 는 $2\pi a/\lambda$ 로서 그리고 GM^* 는 경수중의 GM 으로서 각각 무차원화하여 나타내었다. 본 이론해석에 의한 계산결과, 실험치 또는 Hamamoto의 계산치와 대체적 경향은 일치하고 있으나 정량적으로는 어느 정도 차가 보인다. 특히 GM^* 의 경우, 파정부 근에서는 실험치 또는 Hamamoto의 계산치와 거의 일치하지만, 파저부근에서는 Hamamoto의 계산치보다 상당히 작은

값으로 평가되었다. 이러한 경향은 화물선 선형에서도 마찬가지로인 듯하다. Fig. 13은 화물선 선형에 대해서 λ/L 을 파라미터로 하여, 본 이론해석법에 따라서 계산한 결과를 나타낸 것이다. 이 그림에서 파장이 선체길이와 비슷한 경우, 특히 파정에 선체중심이 위치하였을 때 복원력이 경수중에 비해 절반이하로 감소됨을 확인할 수 있다. 그리고 λ/L 이 1.0보다 점점 커짐에 따라 복원력 감소현상은 완화됨을 알 수 있다.

Table 1 Principal dimensions of ships and models

Items		Fishing boat		Cargo vessel	
		Ship	Model	Ship	Model
Length between perpendiculars	$L_{pp}(m)$	27.90	2.00	175.00	3.00
Breadth moulded	$B(m)$	6.30	0.4516	25.40	0.435
Draught	$d(m)$	2.25	0.1613	8.50	0.1457
Displacement volume	$V(m^3)$	278.53	0.1026	21222.00	0.1069
Height of buoyancy above base line	$KB(m)$	1.28	0.092	4.615	0.0791
Height of metacenter above base line	$KM(m)$	3.01	0.2156	10.39	0.1781
Metacentric height	$GM(m)$	0.28	0.02	1.17	0.02
Block coefficient	C_B	0.6868		0.559	
Midship section coefficient	C_M	0.9695		0.966	
Breadth-draught ratio	B/d	2.80		2.99	
Length-breadth ratio	L/B	4.43		6.89	

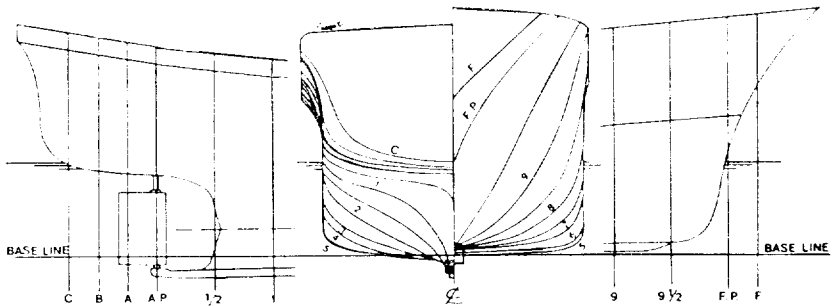


Fig. 2 Body plan and hull end profiles of fishing boat

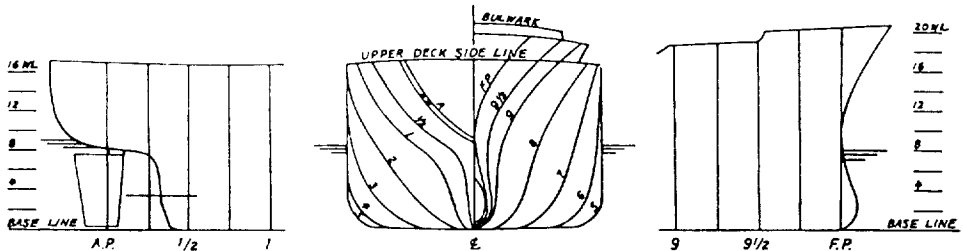


Fig. 3 Body plan and hull end profiles of cargo vessel

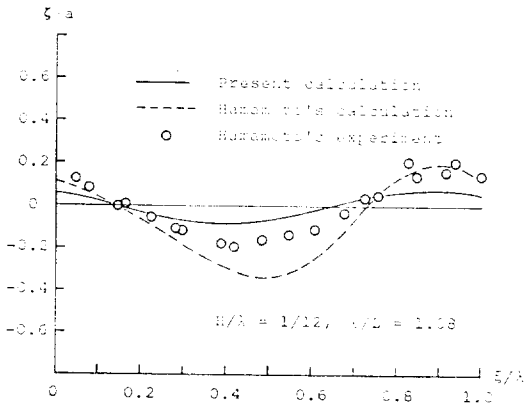


Fig. 4 Variation of sinkage of fishing ship due to relative position of ship to wave

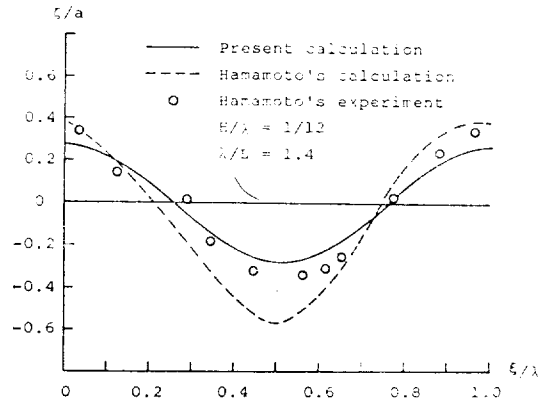


Fig. 7 Variation of sinkage of fishing ship due to relative position of ship to wave

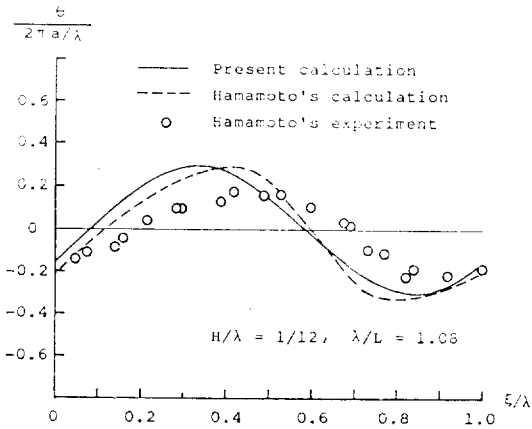


Fig. 5 Variation of trim of fishing ship due to relative position of ship to wave

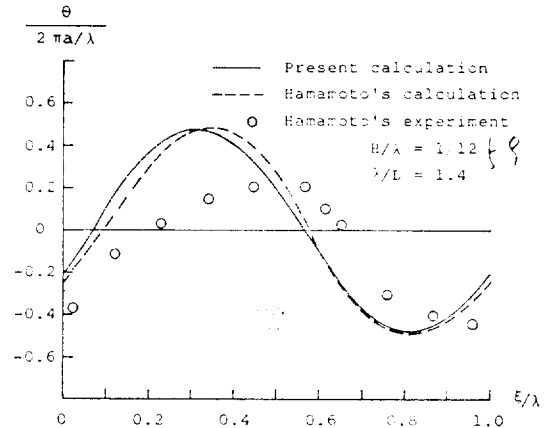


Fig. 8 Variation of trim of fishing ship due to relative position of ship to wave

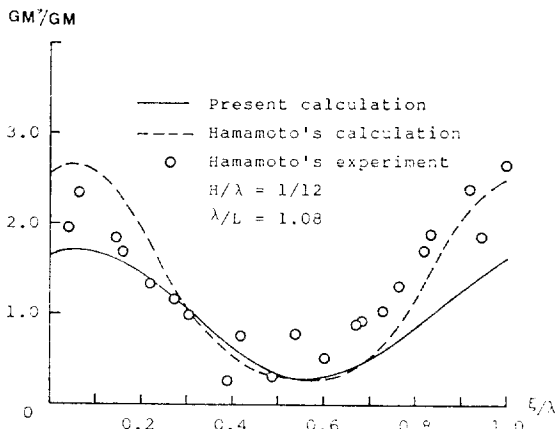


Fig. 6 Variation of metacentric height of fishing ship due to relative position of ship to wave

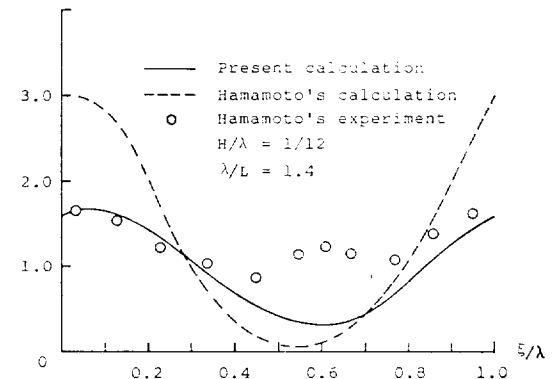


Fig. 9 Variation of metacentric height of fishing ship due to relative position of ship to wave

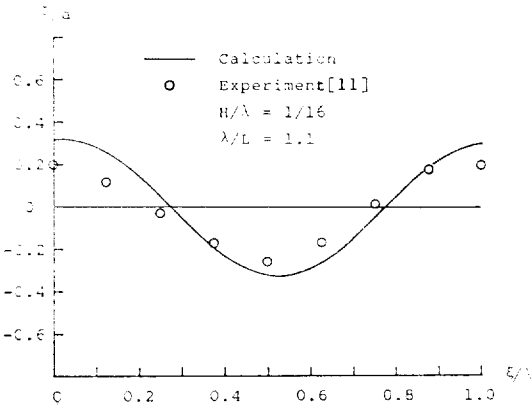


Fig. 10 Variation of sinkage of cargo ship due to relative position of ship to wave

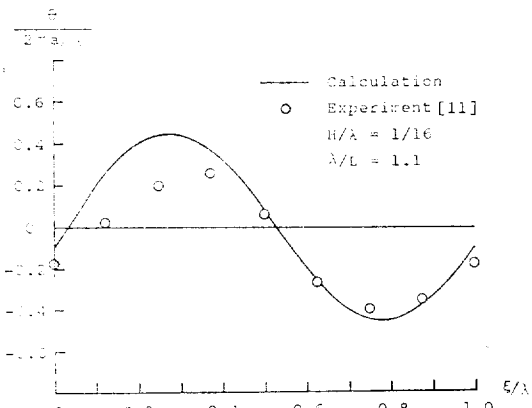


Fig. 11 Variation of trim of cargo ship due to relative position of ship to wave

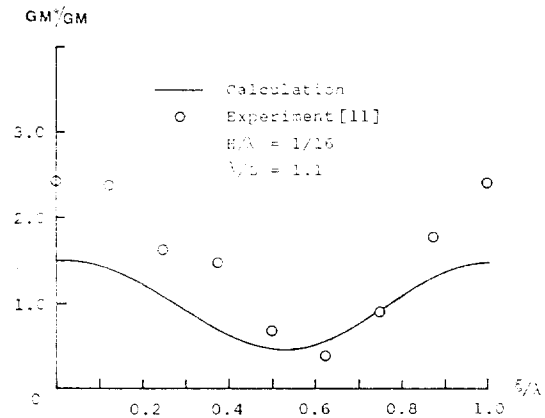


Fig. 12 Variation of metacentric height of cargo ship due to relative position of ship to wave

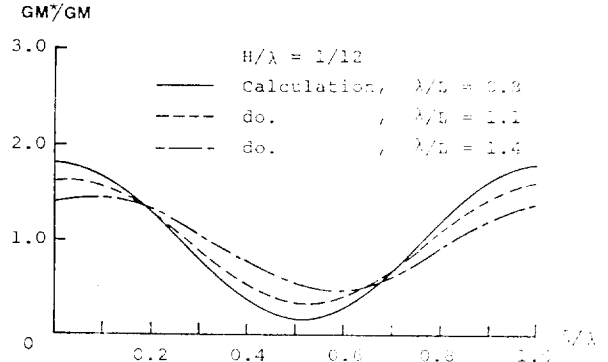


Fig. 13 Variation of metacentric height of cargo ship due to relative position of ship to wave

4. 결 론

추파중에서의 복원력 변동량을 이론적으로 평가하기 위해서, 만남추파수 영인 준정적 상태에서 Froude-Krylov 가설을 이용하여 계산법을 확립하였다. 본 연구에서 제안된 계산법에 의해서 소각도경사시의 복원력을 정성적으로는 충분히 평가가 가능하나, 정량적으로는 약간의 문제가 있는 듯하다. 그러나 본 계산법에 의해서도 추파중의 복원력이 어느 정도 추정 가능케 되었으며, 초기설계단계에서 활용될 수 있을 것이다. 그리고 추파중에서 선체중심이 파정에 위치하였을 때 복원력이 평수중에 비해서 절반이하로 감소되며, 이때 전복의 위험이 있다는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구는 계속해서, 추파중에서의 불안정 횡동요 문제 및 broaching 현상과의 연계관계 등의 과제로 확장되어야 할 것이다.

끝으로 본 연구는 한국과학재단의 연구비 지원에 의해 수행되었음을 밝히며, 상기 재단에 심심한 사의를 표합니다.

참 고 문 헌

- [1] Umeda, N., "On the Surf-riding of a Ship", *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 152, 1982(in Japanese).
- [2] Renilson M.R., "The Broaching of Ships in Following Seas", Ph.D. Thesis, University of Glasgow, 1981.
- [3] Paulling, J.R., "Ship's Capsizing in Heavy Seas", *Journal of SNAK*, Vol. 26, No. 1, March 1989

The Correlation of Theory and Experiments”, International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, University of Strachclyde, Glasow, 1975.

- [4] 김재근, 황중홍, “중파중에서 어선의 전복사고 회피방법에 관한 고찰”, 학술원 논문집 자연과학편, 제16집, 1977.
- [5] Grim, O., “Das Schiff in Von Achtern Auflauender See”, Jahrbuch S.T.G. Vol. 45, 1951.
- [6] Kerwin, J.E., “Note on Rolling in Longitudinal Waves”, Inter. Ship. Progress, Vol. 2, No. 16, 1955.
- [7] Paulling, J.R., “The Transverse Stability of a Ship in Following Seaway”, *Jour. of Ship Research*, Vol. 4, 1961.
- [8] Hamamoto, M. et al., “Transverse Stability of

a Ship in Following Sea”, *Jour. of the Kansai Society of Naval Architects of Japan*, No. 185, 1985 (in Japanese).

- [9] Jens, J.L.E. et al., “IMO Activities in Respect of International Requirements for the Stability of Ships”, *Stability*, 82 Symposium, The Society of Naval Architects of Japan, 1982.
- [10] 일본 운수성 해상기술안전국, “IMO의 제31회 복원성, 어선 안전소위원회 회의 보고”, 선의 과학, Vol. 39, 1986 (in Japanese).
- [11] Son, K.H., “The Unstable Behaviour of Ships Due to Coupling of Manoeuvring and Rolling”, Ph.D. Thesis, University of Osaka, 1983(in Japanese).
- [12] Motora, S. et al., “선체 및 해양구조물의 운동학”, 성산당서점, 1982 (in Japanese).

부 록 1 : 수치선적분법

정수면 이하의 선체횡단면을 Lewis form으로 사상한 한쪽 현에 대해서, 그림과 같이 N 분할하여 각 점의 좌표를 (y_n, z_n) 이라 한다. 그리고 (y_n, z_n) 과 (y_{n+1}, z_{n+1}) 의 사이를 직선 근사하면 직선의 방정식은 다음과 같다. 단, $n=1, 2, \dots, N, N+1$ 이다.

$$y = p_n z + q_n \left. \begin{aligned} p_n &= \frac{y_{n+1} - y_n}{z_{n+1} - z_n}, & q_n &= \frac{y_n z_{n+1} - z_n y_{n+1}}{z_{n+1} - z_n} \end{aligned} \right\} \text{(A.1)}$$

$$z = p'_n y + q'_n \left. \begin{aligned} p'_n &= \frac{z_{n+1} - z_n}{y_{n+1} - y_n}, & q'_n &= \frac{z_n y_{n+1} - y_n z_{n+1}}{y_{n+1} - y_n} \end{aligned} \right\} \text{(A.2)}$$

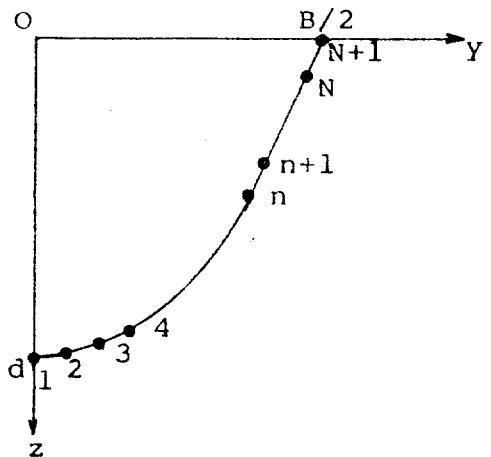
식 (A.1), (A.2)로부터, 본문에서의 J_1, J_2, J_3, J_4 는 다음과 같이 선적분이 수행된다.

$$J_1 = \int_0^{B/2} e^{-kz} dy \approx \sum_{n=1}^N e^{-k(p_n y + q_n)} \Delta y \quad \text{(A.3)}$$

$$J_2 = \left[\int_0^d + \int_d^0 \right] e^{-k(z-y\phi)} dz \approx 2 \sum_{n=1}^N e^{-kz} \sinh\{k(p_n z + q_n)\phi\} \Delta z \quad \text{(A.4)}$$

$$J_3 = \int_{-B/2}^{B/2} e^{-k(z+y\phi)} \cdot y \, dy \approx -2 \sum_{n=1}^N e^{-k(p_n y + q_n)} \sinh(ky\phi) y \cdot \Delta y \quad \text{(A.5)}$$

$$J_4 = \left[\int_0^d + \int_d^0 \right] e^{-k(z-y\phi)} z \, dz$$



$$\approx 2 \sum_{n=1}^N e^{-kz} \sinh\{k(p_n z + q_n)\phi\} z \cdot \Delta z \quad \text{(A.6)}$$

한편, 식 (A.3), (A.4), (A.5), (A.6)에서의 $y, z, \Delta y, \Delta z$ 는 다음과 같다.

$$y = \frac{1}{2} (y_{n+1} + y_n) \quad \text{(A.7)}$$

$$z = \frac{1}{2} (z_{n+1} + z_n) \quad \text{(A.8)}$$

$$\Delta y = y_{n+1} - y_n \quad \text{(A.9)}$$

$$\Delta z = z_{n+1} - z_n \quad \text{(A.10)}$$

부 록 2

Fig. 1에서 검력계(dynamometer)의 중심을 O 라 하고, 검력계로부터 측정된 횡방향유체력을 Y , 횡경사 모우멘트를 K 라 하면

$$K = -Yz_1 \quad (\text{A. 11})$$

여기서 z_1 은 Y 의 작용점의 z 좌표이다.

한편, 무게중심 G 주위의 횡경사모우멘트를 K_G 라 하면

$$\begin{aligned} K_G &= -Y(z_1 - OG) \\ &= K + Y \cdot OG \end{aligned} \quad (\text{A. 12})$$

따라서 미소각도 ϕ 만큼 횡경사시 무게중심 G 에서의 평형조건은

$$K_G + W \cdot GM^* \cdot \phi = 0 \quad (\text{A. 13})$$

즉,

$$K + Y \cdot OG + W \cdot GM^* \cdot \phi = 0 \quad (37)$$