
 論 文

大韓造船學會誌
 第23卷 第4號 1986年 12月
 Journal of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 23, No. 4, December 1986

최소수선면적 쌍등선(SWATH)의 운동특성해석

이 상 무* · 김 영 환* · 홍 도 진*

Motion Prediction of the Small-Waterplane-Area Twin-Hull Ship

by

Sang-Moo Lee* · Young-Whan Kim* · Do-Chun Hong*

Abstract

Recently, the SWATH concept hull form which is capable of high speed navigation with small oscillatory motions in waves, was developed from the catamaran type hull forms.

This paper describes a method to predict motion responses of a SWATH ship in regular waves using the strip theory. The 2-dimensional hydrodynamic problem was solved using the improved Green integral equation which is free from the irregular frequencies.

The effects of the viscous drag which is dominant in heave damping of the SWATH ship are taken into account. Further, the effects of the stationary stabilizing fins which is important in high speed performance of the SWATH ship are included in the equation of motions.

It seems that the motion responses calculated by the present method show better agreement with experimental results than other existing numerical results.

1. 서 언

쌍등선의 개념은 오래 전부터 발전되어 왔다. 석유 시추선으로 널리 쓰이는 반잠수식 시추선은 주요선체가 2개, 3개 등 복잡한 형상으로 발전되고 있으며, 운송수단으로는 SWATH(small waterplane area twin hull)선이 개발되어다. 이와 같은 쌍등선의 개념이 도입된 것은 같은 배수량을 가지는 단등선형에 비하여 내항성능이 우수하기 때문이다. SWATH의 장점은 주로 수선면적이 작기 때문에 상하동요나 종동요의 복원력이 작고 그로 인하여 고유주기가 길어지며, 주요 선체가 깊이 잠겨있어서 파랑강제력이 작기 때문에 발생한다.

쌍등선의 운동특성에 관한 연구는 최근 몇년 사이에 많이 행하여졌고 여러 문헌에 찾아 볼 수 있다. 일례로 문헌[1. Lee C.M.]에서는 strip theory를 이용한 운동 program을 개발하였다. 문헌 [1]에서는 점성항력의 비선형성과 전진속도에 의한 점성양력효과를 등가선형법으로 고려하였다. 그들은 Frank close-fit 방법을 사용하여 선체의 횡단면에 대한 부가질량과 감쇠계수를 추정하고 연성 운동방정식의 해를 구하여 규칙파중에서의 SWATH선체의 운동응답을 계산하였다. 일반적으로 전진속도가 느릴 때에 상하동요의 이론계산결과와 실험결과와 잘 맞지만 종동요는 넓은 주파수범위에서 2배정도 크게 예측되었으며, 전진속도가 빠를 때에는 실험결과와 잘 일치하는 것으로 보고되었다.

본 논문에서는 2차원횡단면에 대한 동유체력계수를

接受日字: 1986年 5月 6日, 再接受日字: 1986年 6月 20日

* 정회원, 한국기계연구소 대덕선박분소

improved Green integral method[2. D.C. Hong]를 사용하여 추정하였다. Strip이론을 적용하여 포텐셜유동에 의한 쌍동선체의 운동방정식계수와 파랑강제력을 구하였다. 문헌[1]에 보인 비선형점성항력과 점성양력 효과를 등가선형법으로 적용하여 점성효과에 의한 운동방정식 계수와 파랑강제력을 구하였다. 또 SWATH의 운동안정성을 향상시키기 위하여 취부되는 안정핀의 효과를 근사식으로 포함시켰다. 횡동요공진시에 중요한 변수인 점성감쇠력을 추정하는데 있어서는 상하동요의 영향을 고려하였다.

2. 운동방정식과 유체력

2.1. 포텐셜유동에 의한 유체력

선체의 운동이 선형적이고 조화적이라고 가정한다. 운동방정식이 정식화되는 기준좌표(x, y, z)는 Cartesian 우수좌표계로서 선체의 정적 평형위치에 고정되어 있으며 좌표의 원점은 교란되지 않은 자유표면에 위치하고 O_xy평면은 자유표면과 일치한다. 수직상방을 양의 z, 선미를 양의 x, 우현을 양의 y방향이며 O_{xz}평면은 선체의 길이방향 대칭면을 포함한다. 좌표계는 Fig. 1과 같다.

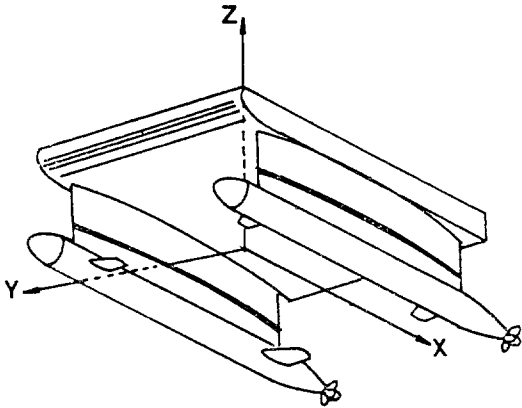


Fig. 1 Configuration of a SWATH ship

운동응답이 선형적이고 조화적이라는 가정으로부터 6자유도 연성선형미분방정식은

$$\sum_{k=1}^6 [(M_{jk} + A_{jk})\ddot{\eta}_k + B_{jk}\dot{\eta}_k + C_{jk}\eta_k] = F_j e^{-i\omega_e t}; \quad j=1, 2, \dots, 6 \quad (1)$$

으로 쓸 수 있다. 여기에 점차 j와 k는 1일때 전후동요, 2일때 좌우동요, 3일때 상하동요, 4일때 횡동요, 5일때 종동요, 6일때 선수동요를 나타낸다. M_{jk}는 선

체의 질량행렬의 일반형이고, A_{jk}와 B_{jk}는 각각 부가질량과 감쇠계수를 나타내고, F_j는 파랑강제력의 복소수 진폭을 의미하며, ω_e는 만남 원진동수, η_k는 6자유도 운동변위를 나타낸다. $\dot{\eta}_k$ 는 속도 $\ddot{\eta}_k$ 는 가속도이다.

선체가 길이방향으로 변하는 정도는 선체의 횡단면을 따라 변하는 정도에 비해서 작다고 하여 세장체로 가정하고, 선체주위의 유체의 교란이 작아서 선체의 전진속도에 기인하는 정상포텐셜과 선체의 운동에 의한 비정상포텐셜은 선형중첩이 가능하다고 가정한다. 포텐셜유동에 의한 부가질량과 감쇠계수의 계산 방법은 여러 문헌에 찾아 볼 수 있으므로 유도과정은 생략한다. 문헌[7, Salvesen, Tuck, Faltinsen]의 strip이론에 의하면 식(1)의 부가질량과 감쇠계수는

$$A_{jk} = Re \left[\frac{1}{\omega_e^2} \int_L dx \int_{c(x)} \left(n_j - \frac{U}{i\omega_e} n_3 \delta_{j5} + \frac{U}{i\omega_e} n_2 \delta_{j6} \right) P_k dl \right] \quad (2)$$

$$B_{jk} = Im \left[\frac{1}{\omega_e} \int_L dx \int_{c(x)} \left(n_j - \frac{U}{i\omega_e} n_3 \delta_{j5} + \frac{U}{i\omega_e} n_2 \delta_{j6} \right) P_k dl \right] \quad (3)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기에 U는 전진속도, δ_{jk}는 kronecker delta function이다.

또한

$$\begin{aligned} n_1 &= \sin\alpha \frac{dy}{dx} - \cos\alpha \frac{dz}{dx} \\ n_2 &= -\sin\alpha \\ n_3 &= \cos\alpha \\ n_4 &= y \cos\alpha + z \sin\alpha = y n_3 - z n_2 \\ n_5 &= -x \cos\alpha = -x n_3 \\ n_6 &= -x \sin\alpha = x n_2 \end{aligned} \quad (4)$$

로서 선체의 6자유도 단위 운동벡터와 선체내부로 향하는 법선벡터의 방향여현을 나타낸다. α는 선체표면에서 tan(Δz/Δy)를 의미한다. 또한 P_k는 6자유도 단위 운동에 의해 선체의 2차원 횡단면에 유기되는 압력을 나타낸다. ∫_{c(x)} dl은 선체의 횡단면에 대한 선적분을 나타내고 ∫_L dx는 선체의 길이방향적분을 나타낸다. 면적분을 두개의 선적분으로 분리시켰는 바 실제적인 입장에서 보면 전진속도가 영일 때는 용인될 수 있지만 전진속도가 있을 때에는 전진속도에 의한 유체입자의 길이방향 교란 때문에 2차원단면에 대하여 적분하는 것은 문제가 된다.

규칙파에 의해 선체에 작용하는 파랑강제력은

$$F_j = \int_L dx \int_{c(x)} \left[\rho i \omega_n \phi_l + \frac{1}{\omega_e} \left(P_j - \frac{U}{i\omega_e} P_3 \delta_{j5} \right) \right]$$

$$+ \frac{U}{i\omega_e} P_2 \delta_{j6} \left. \frac{\partial \phi_x}{\partial n} \right] dl \quad (5)$$

이 된다. 여기에 ρ 는 물의 밀도, ω 는 파도의 원진동수를 나타내며 입사파의 속도포텐셜은

$$\phi_I = \frac{-ig\zeta_0}{\omega} \exp\{K(z - ix\cos\mu + iysin\mu)\} \quad (6)$$

으로 주어진다. 여기에 ζ_0 는 파진폭을 나타내고 $K = \omega^2/g$ 으로 파수이며 μ 는 파만남각으로서 선미를 기준으로 하여 좌현에서 울때를 양으로 정하였다. 또한 법선 방향미분은

$$\frac{\partial \phi_I}{\partial n} = K(in_2 sin\mu + n_3)\phi_I \quad (7)$$

이 되게 된다. 만남 원진동수와 파의 원진동수는

$$\omega_e = \omega - \frac{\omega^2 U}{g} \cos\mu \quad (8)$$

의 관계를 가지고 있다.

자유수면에 떠 있는 선체에 대한 정유체력에 의한 선형복원력 계수중에 영이 아닌 것은

$$C_{33} = \rho g A_w$$

$$C_{35} = C_{53} = \rho g M_w$$

$$C_{44} = \rho g I_{w4} - Mg\overline{BG} = \rho g \overline{GM}_T$$

$$C_{55} = \rho g I_{w5} - Mg\overline{BG} = \rho g \overline{GM}_L$$

로 주어진다. 여기에 A_w 는 수선면적이고 M_w 는 y 축에 대한 수선면적 모멘트이며, I_{w4} 와 I_{w5} 는 각각 x 축과 y 축에 대한 수선면적 관성계수이다. \overline{BG} 는 부심과 무게중심사이의 수직방향거리이고, \overline{GM}_T 는 무게중심에서 횡메타센타높이이며, \overline{GM}_L 은 무게중심과 종메타센타의 수직거리이다. 안정권이 복원력계수에 주는 효과는 후절에서 고려한다.

2.2. 2차원 단면에 작용하는 유체력

단동선형에 대한 이차원 유체력을 계산하는 방법에는 mapping을 이용하는 multiple expansion법과 Lewis form method, 선체표면에 소오스를 분포하는 Frank close-fit method, finite element method등이 잘 알려져 있다. 쌍동선형의 유체력 계산에 이용가능한 방법은 Frank close-fit method나 FEM 등이 될 수 있다. 본 논문에서는 문헌[2]에 의한 improved Green integral method를 적용하여 쌍동선체에 대한 이차원 유체력을 구하였다.

2차원 부유체가 무한수심중에 잠겨 있다고 하자. 유체를 비압축성, 비점성 및 비회전성이고 자유표면에서는 표면장력을 무시할 수 있다고 가정하면 포텐셜유동으로 유체의 유동을 해석할 수 있게 된다. 또한 운동변위와 속도가 작다고 가정하면 선형화된 자유표면 조건 및 물체표면에서의 경계조건을 사용할 수 있게

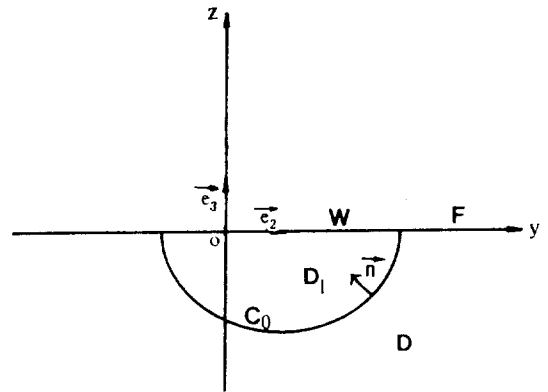


Fig. 2 Cross sectional coordinate system

된다.

Fig. 2와 같이 교란되지 않는 자유표면 F 상에 y 축을 잡고 z 축을 F 에 수직상방으로 취한다. C_0 를 물체의 평형위치에서의 점수면, D 를 유체영역이라 하고, \bar{e}_2 을 y 방향의 단위벡터, \bar{e}_3 을 z 방향의 단위벡터, $\bar{e}_1 = \bar{e}_2 \times \bar{e}_3$ 라 하자. 또한 \bar{e}_1 을 x 방향의 단위벡터라 하면 \bar{e}_1 은 횡단면에 수직하다. \bar{n} 은 C_0 에서 D_1 으로 향하는 법선벡터라 하면 $y = -\infty$ 에서 부유체에 입사하는 입사파에 의하여 부유체가 3자유도 운동을 하는 경우 C_0 상의 한 점 M 의 속도는 다음식으로 나타낸다.

$$V_e(M) = Re \frac{d}{dt} \{ [\gamma_{02}\bar{e}_2 + \gamma_{03}\bar{e}_3 + \gamma_{04}\bar{e}_4 \times GM] e^{-i\omega t} \} \quad (10)$$

여기에

γ_{02} : 좌우동요의 변위진폭

γ_{03} : 상하동요의 변위진폭

γ_{04} : 횡동요의 각변위진폭

G : 횡동요의 회전중심

이며 ω 는 강제조화운동의 진동수를 의미한다.

운동진폭 γ_{02} , γ_{03} , γ_{04} 가 파장 λ 및 물체의 특성길이 L 에 비해 미소한 경우에 속도포텐셜 ϕ 는 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$\phi = Re \{ (\phi_2 + \phi_3 + \phi_4) e^{-i\omega t} \} \quad (11)$$

여기에 ϕ_2 , ϕ_3 , ϕ_4 는 각각 좌우동요, 상하동요, 횡동요의 속도포텐셜을 나타낸다. 이 속도포텐셜은

$$\nabla^2 \phi_j = 0 \quad \text{유체영역}$$

$$-K\phi_j + \frac{\partial \phi_j}{\partial y} = 0 \quad \text{자유수면}$$

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n} = -i\omega_n \phi_j \quad \text{물체표면}$$

$$\lim_{z \rightarrow \infty} \frac{\partial \phi_j}{\partial z} = 0 \quad \text{해저조건}$$

$$\lim_{y \rightarrow \infty} \left(iK \phi_j \pm \frac{\partial \phi_j}{\partial z} \right) = 0 \quad \text{방사조건} \quad (12)$$

와 같은 조건을 만족시켜야 한다. 또한

$$n_j = \begin{cases} -\bar{e}_j \cdot \bar{n} & j=2, 3 \\ -(\bar{e}_j \times GP) \cdot \bar{n} & j=4 \end{cases} \quad (13)$$

는 방향여현을 의미한다.

전후동요 및 종동요, 선수동요에 대한 속도포텐셜은 세장체라는 가정으로부터 물체표면에서의 방향여현을

$$n_1 = \sin \alpha \frac{dy}{dz} - \cos \alpha \frac{dx}{dz}$$

$$n_5 = -x n_3$$

$$n_6 = x n_2 \quad (14)$$

라 놓고, (12)의 해를 구하여 ϕ_1, ϕ_5, ϕ_6 를 근사시켰다. 자유수면이 있고 수심이 무한한 유체중에 pulsating source가 점 M 에 있다고 할 때, 점 P 에서의 속도포텐셜은

$$G(P, M) = \frac{1}{2\pi} Re \{ \ln(\zeta_P - \zeta_M) + \ln(\zeta_P - \bar{\zeta}_M) \}$$

$$+ [1 - \delta(z_P - 0) \cdot \delta(z_M - 0)] \cdot H(z_P, z_M : K) \quad (15)$$

$$H(\zeta_P, \zeta_M : K) = -iRe \{ e^{-iK(\zeta_P - \bar{\zeta}_M)} \}$$

$$+ \frac{K}{\pi} \int Im \{ J[-iK(\zeta_P - \bar{\zeta}_M)] \} d\bar{\zeta}_M$$

으로 쓸 수 있다. 여기에 $\zeta = y + iz$ 이며 J 는 다음과 같이 정의된 함수이다.

$$J(\zeta) = \begin{cases} e^{i\zeta} [E_1(\zeta) + i\pi] & Im(\zeta) > 0 \\ e^{i\bar{\zeta}} [E_1(\zeta) - i\pi] & Im(\zeta) < 0 \end{cases} \quad 0 < |A_{r\delta}\zeta| < \pi \quad (16)$$

여기에 $E_1(\zeta)$ 는 exponential integral로서

$$E_1(\zeta) = \int_{\zeta}^{\infty} \frac{e^{-t}}{t} dt \quad (17)$$

로 정의된다.

식 (15)와 같이 변형된 Green 함수는 D.C. Hong[2]에 의해 도입되었다. 이 Green 함수를 이용하여 유체영역 D 와 수선면 W 에 Green 정리를 적용하면

$$-\frac{\phi_j(P)}{2} + \int_{C_0 U W} \phi_j(M) \frac{\partial G(P, M)}{\partial n_M} dl_M$$

$$= \int_{C_0 U W} \frac{\partial \phi_j(M)}{\partial n} G(P, M) dl \quad P \in C_0 U W \quad (18)$$

와 같은 형태의 적분방정식이 얻어진다. 여기에 가상적인 수선면 W 에 경계조건

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n} = 0 \quad (19)$$

을 적용하고 선체표면 C 에서는 전진속도영향을 고려하여

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n} = n_j + \frac{Un_3}{i\omega_\epsilon} \delta_{j5} - \frac{Un_2}{i\omega_\epsilon} \delta_{j6} \quad (20)$$

을 적용하면 식(18)은 $\phi_j(M)$ 을 구하는 적분방정식이 된다. 이 때에 ω 는 ω_ϵ 로 대체한다. 식(18)은 선체횡단면에 $\frac{\partial \phi_j(M)}{\partial n_M}$ 의 세기를 가지는 소오스와, $\phi_j(N)$ 이란 세기를 가지는 더블릿을 분포하였을 때의 관계식을 나타낸다. 여기서 더블릿의 세기가 곧 유체의 속도포텐셜이 된다.

식(18)의 해로부터 선체의 단위운동에 의해서 선체표면에 유기되는 압력은

$$P_k = -i\epsilon \omega \phi_k \quad (21)$$

가 된다. 식(21)을 식(2)와 식(3)에 적용하여 부가질량과 감쇠계수를 구하게 되고 식(5)에 적용하여 파랑 강제력을 구한다.

2. 3. 점성감쇠력

반잠수식 쌍동선(SWATH)형상은 수직평면내에서 운동을 할 때 표면파를 크게 생성하지 않는다. 이것은 SWATH선형이 전후동요, 상하동요, 종동요를 할 때 조파감쇠력이 일반적 선형에 비하여 작다는 것을 의미한다. 점성효과를 무시하고 운동응답을 계산하면, 공진진동수에서 선형계의 비감쇠 운동응답을 나타내어 운동진폭이 매우 크게 예측된다. 실험결과와 차이는 이유는 점성감쇠력에 있는 것으로 알려져 있으며 이에 대하여는 보다 합리적이면서 현실적인 추정법이 필요하게 된다[1].

규칙파중에서 일정한 속도를 전진하면서 조화적으로 움직이는 선체에 대하여 수직면상에서 유체의 점성효과에 의해 받는 힘은

$$F_v = \frac{1}{2} \rho A_P (U^2 a_\alpha + C_D w |w|) \quad (22)$$

라 하자. 여기에 침차 v 는 수직방향을 의미하고 A_P 는 선체를 수평면에 투영하였을 때의 투영면이고, a_α 와 C_D 는 각각 점성양력계수와 cross-flow항력계수이다. 또한 w 는 선체의 유체에 대한 상대속도로서

$$w = \dot{\eta}_3 - x\dot{\eta}_5 + y\dot{\eta}_4 - \dot{\zeta}_v(x, +b, -d)$$

으로 나타낼 수 있으며, 유체의 입사각 α 는

$$\alpha = -\eta_5 + \frac{w}{U} \quad (23)$$

로 놓을 수 있다. 또한 ζ_v 는 입사파에 의한 유체입자의 수직방향속도이고, b 는 증양중단면에서 쌍동체의 중심까지의 횡방향거리이고, d 는 선체의 최대폭과 수선면 사이의 거리를 나타낸다.

식(22)는 입사파에 의한 산탄파의 영향을 무시하고

값이 작다고 가정하여 세워 놓은 경험식이다. 포텐셜 열유동의 경우와 유사하게 식(22)을 strip개념에 적용하면 쌍동선체에 유기되는 수직방향력은

$$F_v = -\frac{\rho}{2} U^2 \int B_m(x) \sum_{i=1}^2 (a_0 \alpha_i(x) + C_D(\alpha_i + \eta_5) |\alpha_i + \eta_5|) dx \quad (24)$$

가 된다. 여기에 $B_m(x)$ 는 수평면에 투영된 선체단면의 최대폭을 의미하며 1과 2는 각각 우현과 좌현에서 최대폭에 유입되는 유체의 입사각이다. 새로운 기호를

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= \dot{z}_{1S} + \dot{z}_{1P} \\ \dot{z}_{1S} &= \dot{\eta}_3 - x\dot{\eta}_5 + y\dot{\eta}_4 - \dot{\zeta}_v(x, +b, -d_1(x)) \\ \dot{z}_{1P} &= \dot{\eta}_3 - x\dot{\eta}_5 + y\dot{\eta}_4 - \dot{\zeta}_v(x, -b, -d_1(x)) \end{aligned}$$

와 같이 정의하면 수직방향력 F_v 는

$$F_v = -\frac{\rho}{2} \int_L B_m(x) [-2a_0 U^2 \eta_5 + a_0 U \dot{z}_1 + C_D(\dot{z}_{1S} |\dot{z}_{1S}| + \dot{z}_{1P} |\dot{z}_{1P}|)] dx \quad (25)$$

이 된다. 또한

$$\dot{z}_r = \dot{z}_{1S} - \dot{z}_{1P}$$

이라 놓으면 수직방향력에 의해 유기되는 횡동요 모우멘트는

$$M_R = -\frac{\rho}{2} \int B_m(x) b(x) [a_0 U \dot{z}_r + C_D(\dot{z}_{1S} |\dot{z}_{1S}| - \dot{z}_{1P} |\dot{z}_{1P}|)] dx \quad (26)$$

이다. 여기에 $b(x)$ 는 중앙중단면에서 최대폭이 되는 단면의 중심까지의 횡방향거리이다. 점성력에 의한 종동요 모우멘트는

$$M_p = \frac{\rho}{2} \int_L x B_m(x) [-2a_0 U^2 \eta_5 + a_0 U \dot{z}_1 + C_D(\dot{z}_{1S} |\dot{z}_{1S}| + \dot{z}_{1P} |\dot{z}_{1P}|)] dx \quad (27)$$

와 같이 된다. 입사파에 의해 유기되는 유체입자의 속도는 식(6)으로 부터

$$\begin{aligned} \dot{\zeta}_v(x, y, z, t) &= -i\omega \zeta_0 \exp(Kz - iKx \cos \mu) \\ &\quad + iK y \sin \mu e^{-i\omega t} \end{aligned} \quad (28)$$

이다. 식(22)~식(27)에서 cross-flow 항력은 비선형이다. 따라서 선형운동방정식에 대입할 수 없으며, 조화적 운동 $x = x_0 \cos \omega t$ 가 주어지면,

$$\dot{x} |\dot{x}| = -\frac{8}{3\pi} \omega x_0 \dot{x} \quad (29)$$

로 선형화하여 근사시킬 수 있다. 이와 같은 등가 감쇠계수를 적용하기 위하여 운동진폭을 먼저 알아야 하는데, 운동진폭을 먼저 가정하고 운동방정식의 해를 구하고 구하여진 운동진폭을 다시 운동방정식에 고려하여 타당한 정도로 운동진폭이 수렴될 때까지 iteration 하였다.

2.4. 안정핀의 효과

SWATH형상은 수선면적이 작기 때문에 고속 항해시에 종방향 평면내의 운동이 불안정할 수 있다. 이론적 및 실험적 연구결과에 의하면 쌍동선체의 안쪽에 수평핀을 부착시킬 때 안정성이 매우 향상되고 최대 운동진폭 또한 크게 줄어 드는 것으로 알려졌다.

안정핀을 선체의 후방에 취부시켰을 때 안정성이 좋아지고, 전방에 면적이 작은 안정핀을 취부시켰을 때는 상하동요의 성능도 함께 향상시킬 수 있는 것으로 알려져 있다. 최대 운동진폭은 안정핀의 감쇠효과에 의해 크게 줄어든다.

안정핀은 양력면으로서 유체중에서 움직일 때 받음각이 있으면 양력을 발생한다. SWATH선에 취부된 안정핀은 핀에 유입되는 유체입자의 상대속도와 종경사에 의해 수직방향의 받음각을 받게 된다. 종경사각도는 종동요 운동응답으로 쉽게 계산될 수 있으나 유체입자의 상대 속도성분은 입사파 및 산란파, 전진속도 등의 영향을 받으므로 추정하기가 어렵다. 여기서는 받음각이 작다고 가정하고 선체의 운동과 입사파에 의한 유체입자의 속도영향만을 고려하기로 한다.

스팬이 S 이고 코오드가 C_{in} 얇은 양력면의 압력중심이 $x=l$ 에 위치하고 있다고 하면, 받음각이 작을 때 양력면이 받는 양력 L 은

$$L(t) = \frac{\rho}{2} U^2 A^{(f)} C_{L\alpha} \alpha(t) \quad (30)$$

로 쓸 수 있다. 여기에 $A^{(f)}$ 는 양력면의 면적이고 $C_{L\alpha}$ 는 양력곡선의 기울기이다. $C_{L\alpha}$ 는 실험적으로 측정할 수도 있고 경험식으로 추정할 수 있다[2]. 또한 받음각은

$$\alpha(t) = -\eta_5(t) + \frac{\{(\dot{\eta}_3 - l\dot{\eta}_5 + b_1\dot{\eta}_4 - \dot{\zeta}_v(l, b, -d_1, t))\}}{U} \quad (31)$$

와 같이 주어지게 된다.

양력면이 수직으로 움직일 때, cross-flow항력과 부가 질량 효과가 있으며, cross-flow항력 $D(t)$ 는

$$D(t) = \frac{\rho}{2} A^{(f)} C_D^{(f)} (\dot{\eta}_3 - l\dot{\eta}_5 + b_1\dot{\eta}_4 - \dot{\zeta}_v) |\dot{\eta}_3 - l\dot{\eta}_5 + b_1\dot{\eta}_4 - \dot{\zeta}_v| \quad (32)$$

와 같이 표현된다. 여기에 C_D 는 항력계수이며, 부가 질량력 $I(t)$ 는

$$I(t) = -(m^{(f)} + a_{33}^{(f)}) (\ddot{\eta}_3 - \ddot{\eta}_5 + b_1\ddot{\eta}_4) \quad (33)$$

와 같이 쓸 수 있다. 여기에 $m^{(f)}$ 는 안정핀의 질량이고 $a_{33}^{(f)}$ 는 안정핀의 부가질량이다. 쌍동선에 N 쌍의 핀이 부착되었다면 상하동요력 $F_v^{(f)}$ 와 종동요 모우멘트 $M_R^{(f)}$ 와 횡동요 모우멘트 $M_p^{(f)}$ 은 $2N$ 개의 핀에 의해

아래와 같이 얻어지게 된다.

$$\begin{aligned}
 F_v^{(f)} &= I(t) + L(t) + D(t) \\
 &= -\sum_{j=1}^N [2(m_j^{(f)} + a_{33j}^{(f)}) (\dot{\eta}_3 - l_j \dot{\eta}_5) \\
 &\quad - \frac{\rho}{2} U^2 A_j^{(f)} C_{L\alpha j} \left\{ -2\gamma_5 + 2 \frac{\dot{\eta}_3 - l_j \dot{\eta}_5}{U} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{\zeta_v(b_{1j}) + \zeta_v(-b_{1j})}{U} \right\} \\
 &\quad - \frac{\rho}{2} A_j^{(f)} C_{D_j}^{(f)} \{ (\dot{\eta}_3 - l_j \dot{\eta}_5 + b_{1j} \dot{\eta}_4 \\
 &\quad - \zeta_v(b_{1j})) | \dot{\eta}_3 - l_j \dot{\eta}_5 + b_{1j} \dot{\eta}_4 - \zeta_v(b_{1j}) | \\
 &\quad + (\dot{\eta}_3 - l_j \dot{\eta}_5 - b_{1j} \dot{\eta}_4 - \zeta_v(-b_{1j})) | \dot{\eta}_3 - l_j \dot{\eta}_5 \\
 &\quad - b_{1j} \dot{\eta}_4 - \zeta_v(-b_{1j}) | \}] \quad (34)
 \end{aligned}$$

여기에 $\zeta(b_{1j})$ 는 $\zeta_v(l_j, b_{1j}, -d_{1j})$ 를 의미한다. 또한 중
 동요 모우멘트는

$$M_p^{(f)} = -\sum_{j=1}^N l_j f_j$$

로 나타낼 수 있으며, f_j 는 식(34)의 내괄호안에 주어
 진 식이다. 횡동요 모우멘트는

$$\begin{aligned}
 M_R^{(f)} &= -\sum_{j=1}^N [2b_{1j}^2 (m_j^{(f)} + a_{33j}^{(f)}) \dot{\eta}_4 \\
 &\quad - \frac{\rho}{2} U A_j^{(f)} C_{L\alpha j} \{ b_{1j} (2b_{1j} \dot{\eta}_4 \\
 &\quad - \zeta_v(b_{1j}) + \zeta_v(-b_{1j})) \} \\
 &\quad - \frac{\rho}{2} A_j^{(f)} C_{D_j}^{(f)} \{ b_{1j} (b_{1j} \dot{\eta}_4 - \zeta_v(b_{1j})) | \dot{\eta}_3 \\
 &\quad - l_j \dot{\eta}_5 + b_{1j} \dot{\eta}_4 - \zeta_v(b_{1j}) | + b_{1j} (b_{1j} \dot{\eta}_4 \\
 &\quad + \zeta_v(-b_{1j})) | \dot{\eta}_3 - l_j \dot{\eta}_5 - b_{1j} \dot{\eta}_4 - \zeta_v(-b_{1j}) | \}] \quad (35)
 \end{aligned}$$

로 나타낼 수 있다. 여기에 절대값으로 나타낸 유체의
 상대속도는 우현편과 좌현편에서 비슷한 정도라고 보
 고 상하동요와 중동요가 횡동요에 기여하는 모우멘트
 는 상쇄된다고 가정하였다.

3. 계산결과 및 고찰

계산결과의 정도비교를 위하여 2차원 쌍동 반원단면
 에 대한 부가질량과 감쇠계수를 계산하였다. Fig. 3에
 는 문헌[4]에서 발표된 실험결과와 계산결과를 같이
 도식하였다. Kobus[3]의 Green integral method에서
 나타나는 irregular frequency 현상이 제거되었으며 문
 헌[4]와 비슷한 결과가 얻어졌다.

SWATH선체의 운동계산은 NSRDC에서 실험결과를
 발표한 SWATH 6A선형에 대하여 계산을 수행하였다
 [1, 5]. SWATH에 대한 제원은 Table 1과 같다. 이 선

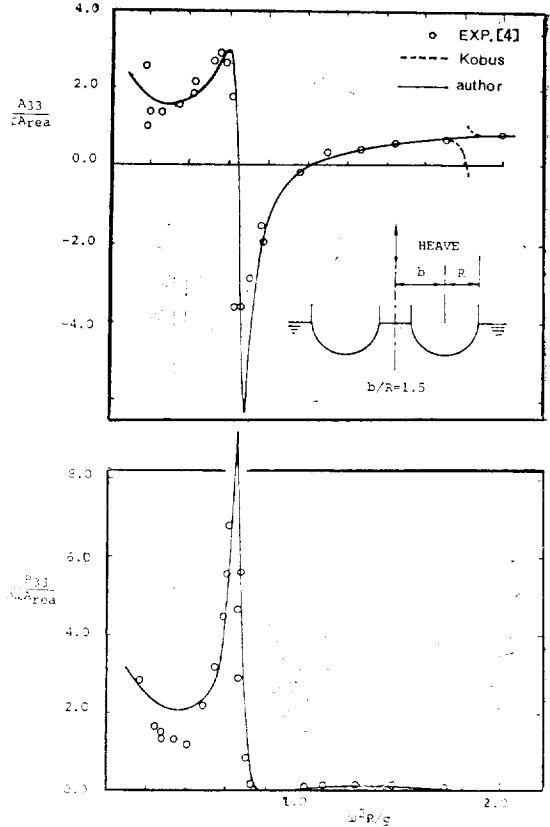


Fig. 3 Heave added mass and damping of twin semicircular cylinders

Table 1 Particulars of SWATH6A

Parameter	
Displacement, long tons in s.w.	2,802
Length at the Waterline, m	52.5
Length of Main Hull, m	73.2
Beam of Each Hull at the Waterline, m	2.2
Hull Spacing Between the Centerlines, m	22.9
Draft at the Midship, m	8.1
Bridging Structure Clearance from Waterline, m	6.1
Maximum Diameter of Main Hull, m	4.6
Longitudinal Center of Gravity Aft of Main Hull Nose, m	35.5
Vertical Center of Gravity above Baseline, m	10.4
Transverse GM, m	2.9
Longitudinal GM, m	6.8
Gyradius for Pitch, m	16.9
Gyradius for Roll, m	10.2
Waterplane Area, m ²	193.2

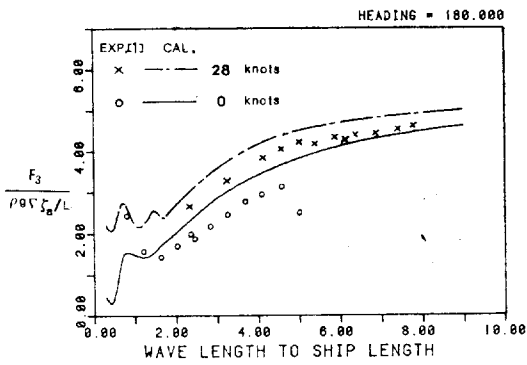


Fig. 4 Heave exciting force at 0 kts and 28 kts in regular head waves

제에는 주요 선체의 선수에서 17.15m되는 위치에 코오드 2.59m×스팬 3.11m의 전방편이 부착되고, 선수에서 62.24m되는 위치에 코오드 4.48m×스팬 5.36m의 후방편이 부착되었다. 계산의 정도비교를 위해서 문헌 [1]에서의 같은 선체의 양력계수 $a_0=0.07$ 를 적용하고, 원형주상체의 점성항력계수 $C_D=0.5$ 를 적용하였다. 안정핀의 양력계수는 근사식[1]을 적용하여 전방편에 대하여 $C_{La}=4.38$, 후방편에 대하여 $C_{La}=3.2$ 를 사용하였고, 핀의 상하운동에 대한 항력계수는 $C_D=1.2$ 를 적용하였다. 이와 같은 여러가지 계수들은 실험적, 이론적으로 결정되어야 하며, 계산조건에 따라 다른 값을 사용해야 할 것이다.

Fig. 4에는 상하동요 파강제력을 실험결과와 비교하였다. 파장/배길이를 횡축으로 하고 상하동요 강제력

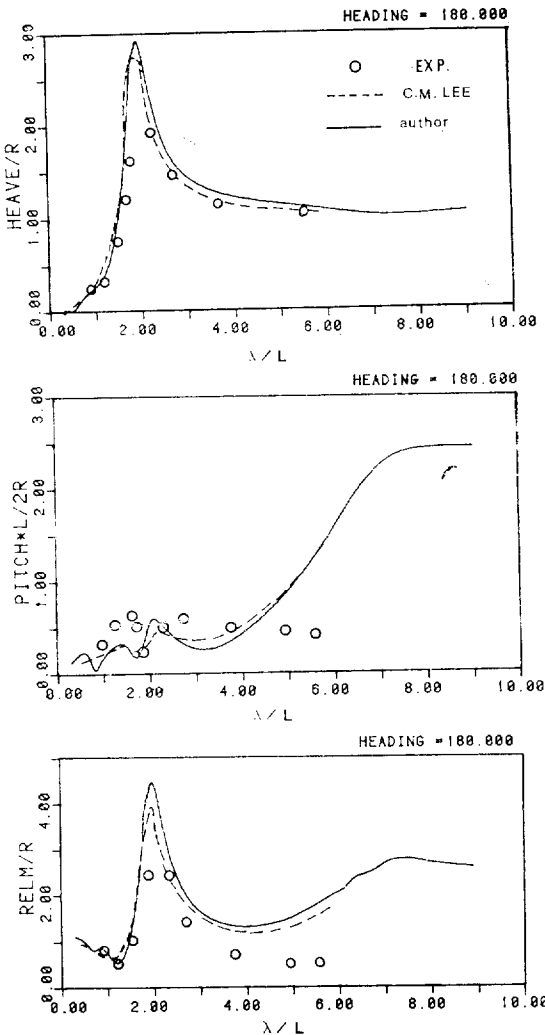


Fig. 5 Heave, pitch and relative bow motion at 0 kts in regular head waves

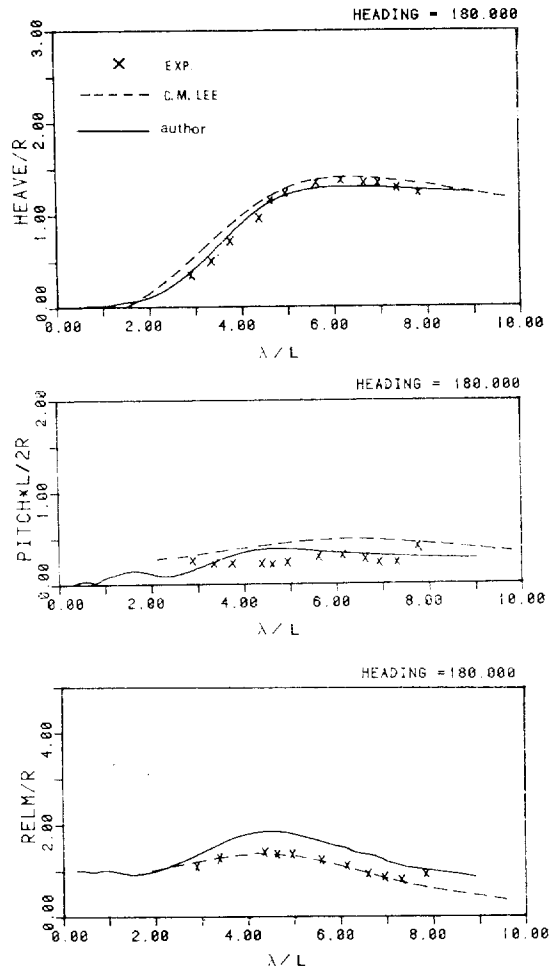


Fig. 6 Heave, pitch and relative bow motion at 28 kts in regular head waves

을 중축으로 잡고 이론계산결과와 문헌[1]에서 발췌한 실험결과를 함께 도시하였다. 개략적 경향은 일치하고 있으나, 정량적으로는 차이를 보이고 있으며 3차원적인 상동선형상에 strip이론을 적용하는데 따른 계산방법상에 원인이 있을 것으로 사료된다. 포텐셜이론에 의한 상하동요 강제력은 선수파중에 전진할 때 보다 정지시에 크게 계산되었으나 안정권의 양력효과를 고려하였을 때에 전진시의 파랑강제력이 크게 계산되었다.

Fig. 5에 선수규칙파중 정지상태에서의 상하동요, 중동요, 선수상대운동을 도시하였다. 상하동요는 계산결과와 실험결과가 잘 일치하고 있다. 중동요는 이론계산 결과까지 대체로 비슷한 양상을 보이고 있으나, 파

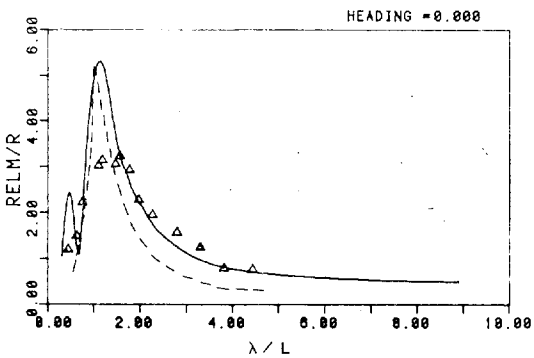
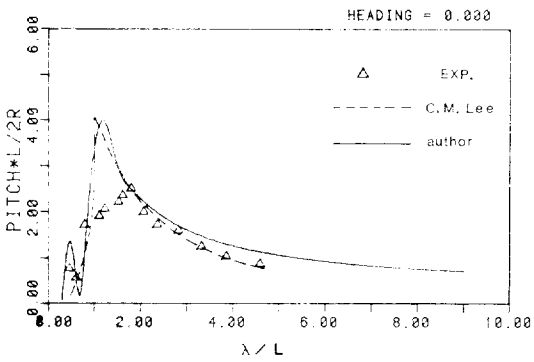
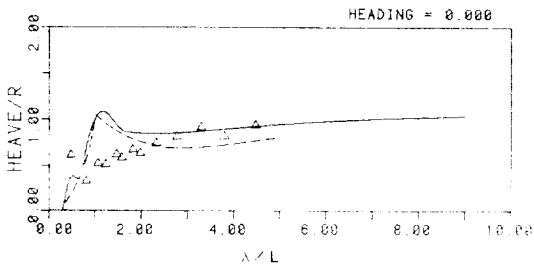


Fig. 7 Heave, pitch and relative bow motion at 20 kts in regular following waves

장이 길 때에는 실험결과와 다르게 나타나고 있다. 선체가 정지하여 있을 때에 공진운동응답은 주로 점성감쇠력에 지배된다. 상하동요와 중동요의 공진응답이 실험치보다 크게 계산되는 것으로 미루어 보아 선체의 점성항력계수가 보다 커야 될 것이라고 판단되나, 이에 대하여는 실험적 연구가 선행되어야 된다.

Fig. 6에는 선속 28노트, 선수규칙파중에서의 운동응답을 보였다. 이론계산결과와 실험결과와의 상관 관계가 크게 나타나고 있다. 상하동요의 운동응답곡선이 정지시와는 달리 날카로운 극대값을 나타내지 않고 있으며, 중동요 운동응답 또한 매우 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 선체가 전진할 때 안정권에 유입되는 유체입자의 상대속도가 빨라지면서 안정권에 의한 양력이 증가하고 그에 따라 감쇠력이 증가하기 때문에 상하동요 운동응답의 극대값이 줄어드는 것으로 생각된다. 중동요의 운동응답은 극대값을 보이지 않고 있으며, 만남진동수가 증가되어서 중동요 공진진동수와 만나지 않기 때문이다.

Fig. 7에는 선속 20노트, 선미규칙파중에서의 운동응답을 보였다. 상하동요와 중동요의 공진주기 근처에

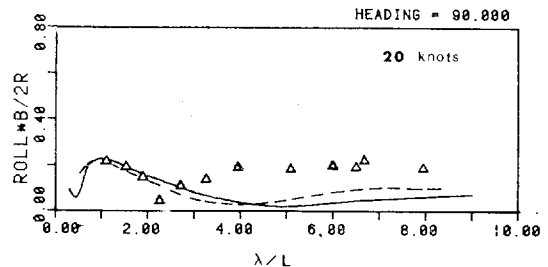
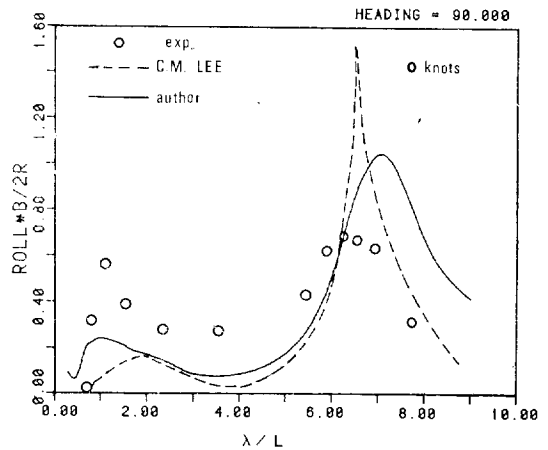


Fig. 8 Roll motion at 0 kts and 20 kts in regular beam waves

서 이론계산값은 실험값과 차이를 보이고 있으며 공진 주기에서 멀어지면서 좋은 일치율을 보이고 있다. 선수상대운동의 이론계산값은 문헌[1]의 이론계산값보다 실험치에 가깝게 계산되고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 8에는 선속 0노트, 선속 20노트의 횡규칙파중 상태에서의 운동응답을 도시하였다. $\lambda/L=1$ 근처에서는 subharmonic resonance 영향으로 실험결과가 계산결과보다 크게 나타나고 있다[5]. 선속 0노트의 운동응답의 극대값이 문헌[1]의 이론계산결과와 다르게 날카로운 공진응답으로 나타나지 않고 감쇠정도가 큰 시스템의 응답으로 계산되었다. 이는 점성감쇠력을 계산하는데 상하동요의 영향을 같이 고려하여 넣었기 때문으로 사료된다. 선속 20 knots에서는 감쇠력이 큰 시스템의 운동응답으로 얻어지고 있다.

4. 결 론

이상의 결과로부터 얻어진 결론을 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 쌍동선체의 2차원 단면에 대한 부가질량과 감쇠계수는 improved Green integral method로 효과적으로 추정할 수 있고 추정결과는 실험결과와 비교적 잘 맞는다.
2. 횡동요를 보다 정확히 해석하기 위해서는 상하동요의 영향을 점성감쇠력계산에 포함하여야 한다.
3. 앞으로 불규칙파중의 운동응답, 상부갑판에 작용하는 충격하중, 안정핀의 제어문제에 관하여 보다 깊이 연구되어야 할 것이다.

5. 후 기

본 논문은 한국기계연구소에서 과학기술처의 '85년

일반출연연구사업의 일환으로 수행된 "Catamaran형 해양구조물의 운동해석을 위한 전용전산 program개발[6]" 과제의 결과임을 밝혀둔다.

참 고 문 헌

- [1] C.M. Lee, "Theoretical Prediction of Motion of Small-Waterplane-Area, Twin-Hull (SWATH) Ship in Waves", NSRDC Report 76-0046, USA, 1976.
- [2] D.C. Hong, "Discrétisation du Contour d'une tranche de navire en vue de la résolution numérique du problème de radiation-diffraction", ENSM, Rapport 8422, France, 1984.
- [3] J.M. Kobus, "Application de la méthode des singularités au problème des flotteurs cylindriques soumis à des oscillations harmoniques forcées de faible amplitude", these de Docteurs-Ingenieur, Université de Nantes, France, 1976.
- [4] C.M. Lee, N.O. Jones and R.M. Curphey, "Prediction of Motion and Hydrodynamic Loads of Catamarans", Marine Technology, Oct. 1973.
- [5] J.A. Kalio, "Seaworthiness Characteristics of a 2,900 ton Small Waterplane Area Twin Hull (SWATH)", NSRDC, Report SPD-620-03, USA, 1976.
- [6] 홍도철, 김영환, 이상무, "Catamaran 형 해양구조물의 운동해석을 위한 전용전산 program개발", 한국기계연구소 연구보고서 UCE244-649. D 1985.
- [7] N. Salvesen, E.O. Tuck and O. Faltinsen, "Ship Motions and Sea Loads", *Trans. of SNAME*, Vol. 78, 1970.