

쌍동선의 운동 및 파랑하중 해석

구자삼* · 조효제** · 이승철***

Analysis of Motions and Wave Loads of Twin-Hull Ships in Waves

Ja-Sam Goo* · Hyo-Jae Jo** · Seung-Chul Lee***

Key Words : Three-Dimensional Potential Theory(3차원 포텐셜 이론), Dynamic Structural Response(동적구조응답), Twin-Hull Ship(쌍동선), Motion Response(운동응답), Wave Load(파랑하중)

Abstract

A three-dimensional linearised potential theory is presented for the prediction of motions and dynamic structural responses of twin-hull ships travelling with forward speed in regular waves. Comparisons between theoretical and experimental results are shown for the motion responses and lateral wave loads of an ASR(anti-submarine rescue) catamaran. In general, good agreement between theory and experiment is found except for some discrepancies that are believed to be caused by neglect of forward speed effects on free surface.

1. 서론

새로운 해상 수송 시스템으로서 초고속선을 생각해 볼때 쌍동선형은 안전성이나 내항성능 및 저항추진 성능의 관점에서 대표적인 선박의 하나로 생각된다. 쌍동선은 넓은 갑판면적과 큰 횡방향 안전성을 지니고, 통상의 활주정보다 항로에서 고속을 유지할 수 있으며, SWATH선은 수선면적이 작기 때문에 상하동요와 종동요의 복원력이 작고

고유주기가 길기 때문에 통상의 해상에서 파와의 공진을 피할 수 있다¹⁾.

쌍동선의 문제에 대하여 통상 이용되고 있는 계산법은 스트립 방법^{2)~4)} 이고, 그 2차원 유체력은 횡단면내의 쌍동간의 유체역학적 상호간섭을 고려한 특이점분포법에 의해 구해진다. 이 2차원 계산법에서는 파의 에너지가 3차원적으로 확산하는 현상을 설명할 수 없기 때문에 전진속도가 없는 경우에도 저주파수 영역이나 쌍동간에 큰 파가 발

* 부경대학교 조선해양시스템공학과
** 한국해양대학교 해양시스템공학부
*** 부경대학교 대학원

생하는 동조 주파수 근처에서는 유체역학적 간섭을 과대하게 추정해 버린다. 더우기 전진속도가 있는 경우에는 각 동체에 의해 생긴 파는 3차원성이 강하고 후방으로 전파되기 때문에 속도가 증가함에 따라 쌍동선의 유체역학적 간섭은 적어진다. 쌍동선에 대한 스트립 방법은 이와같은 전진속도의 영향을 합리적으로 고려할 수 없다. 한편 고속 쌍동선을 대상으로 하는 세장선 이론에 의한 연구⁵⁾, Thin-ship theory에 의한 연구⁶⁾ 등이 있고, 최근 선속의 영향을 합리적으로 도입하기 위해 전진속도가 있는 경우의 3차원 특이점분포법을 쌍동선에 적용하여 파랑하중을 구하는 연구⁷⁾, 고주파수 가정을 도입한 3차원 특이점분포법에 의한 연구⁸⁾ 등이 발표되고 있다.

본 연구에서는 미소진폭파중에서 전진하고 있는 쌍동선에 대하여 고주파수 가정을 도입한 3차원 특이점분포법^{9),10)}을 적용하여 쌍동선의 유체역학적인 상호간섭을 고려한 운동 및 파랑하중을 구하는 이론적 해석법을 임의의 운동기준점에 대한 표현식으로 일반화했다. 또한 Chan⁸⁾은 Tuck의 정리^{11),12)}에 나타나는 선적분항을 무시하고 있으나 본 연구에서는 직접수치적분에 의해 선적분항의 영향을 고려했다. 그리고, 본 계산결과와 Wahab¹³⁾의 실험치 및 Chan⁸⁾의 계산치를 비교·검토하여 본 방법의 타당성을 검증했다.

2. 이 론 해 석

기본가정으로서 유체는 이상유체인 것으로 한다. 또, 선체의 운동과 입사파의 유체운동은 미소진폭의 주기운동을 하는 것으로 하고, 각각의 정상상태를 논하기로 한다. 또한 자유표면은 모든 방향으로 무한히 펼쳐져 있는 것으로 하고, 수심이 유한인 경우에는 수심을 일정으로 한다.

선체는 자유표면에서 조우 주파수 ω 로 운동하면서 평균 수평속도 U 로 이동하는 것으로 하며, 좌표계로서는 Fig. 1에 보는 바와 같이 선체와 같은 방향과 속도로 이동하는 우수계의 기준좌표계 $o-xyz$ 를 취하고, xy 평면은 평균수면에 두고, z 축은 연직상방으로 향하고 있는 것으로 한다.

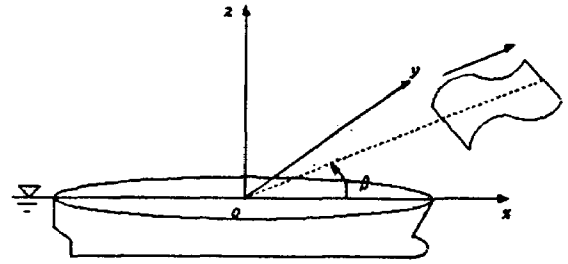


Fig. 1 Coordinate system

입사파는 x 축의 음의 방향에서 양의 방향으로, x 축과 β 의 각을 이루며 진행하는 것으로 한다.

임의의 운동기준점 (x_m, y_m, z_m) 의 각 축방향의 병진운동 및 각 축둘레의 회전운동을 Fig. 2와 같이 정의한다.

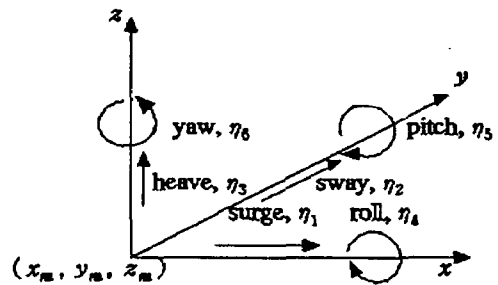


Fig. 2 Definition of motions

또한 Fig. 3과 같이 유체 영역의 경계를 다음과 같이 나타낸다.

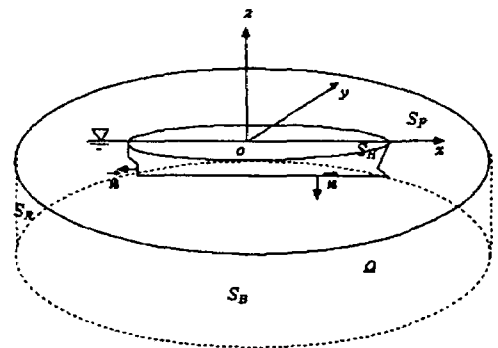


Fig. 3 Boundary surface and fluid region

$$S = S_H + S_F + S_B + S_R$$

여기서, S_H 는 선체의 침수표면, S_F 는 자유표면,

S_B 는 해지면, S_R 는 무한 원방의 경계면, Ω 는 유장이다.

비회전 완전유체의 유체운동은 다음 식으로 정의되는 속도포텐셜에 의해 기술할 수 있다.

$$\vec{V} = \nabla \phi(x, y, z, t) \quad (1)$$

단, \vec{V} 는 유체의 속도 벡터이다.

이 속도포텐셜은 정상포텐셜과 비정상 포텐셜로 나눌 수 있고, 비정상 포텐셜은 입사파의 속도포텐셜과 구속된 선체에 의한 입사파의 산란을 나타내는 산란 포텐셜 및 선체의 운동에 의해 발생하는 방사 포텐셜의 합으로서 생각할 수 있다.

더욱이, 방사 포텐셜은 그 자유도에 따라 6성분으로 나눌 수 있다. 이 경우에 유장 전체의 속도포텐셜은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi(x, y, z, t) = -Ux + \phi_s(x, y, z) + \tilde{\phi}(x, y, z, t) \quad (2)$$

$$\tilde{\phi} = [\phi_I + \phi_D + \sum_{k=1}^6 -i\omega \eta_k \phi_k] e^{-i\omega t} \quad (3)$$

여기서, ϕ_s 는 선체의 전진운동에 기인하는 정상교란 속도포텐셜로서 본 연구에서는 정상교란 포텐셜을 무시할 수 있는 선체형상인 것으로 가정한다. 또, $\tilde{\phi}$ 는 파에 의한 비정상 복소 속도포텐셜, ϕ_I 는 입사파의 포텐셜, ϕ_D 는 산란 포텐셜, ϕ_k 는 단위 속도 진폭으로 k 방향의 운동에 의해 발생하는 방사 포텐셜이다. 또, i 는 허수단위, ω 는 선체와 파의 조우 각주파수, η_k 는 k 방향의 복소 변위 진폭이다.

산란 포텐셜 ϕ_D 및 방사 포텐셜 $\phi_k(k=1\sim6)$ 은 다음과 같은 경계치 문제의 해로서 구할 수 있다.

$$\nabla^2 \phi_{D,k} = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (4)$$

$$[(i\omega + U \frac{\partial}{\partial x})^2 + g \frac{\partial}{\partial z}] \phi_{D,k} = 0 \quad \text{on } S_F \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi_D}{\partial n} = - \frac{\partial \phi_I}{\partial n} \quad \text{on } S_H \quad (6)$$

$$\frac{\partial \phi_k}{\partial n} = n_k + i \frac{U}{\omega} m_k \quad \text{on } S_H \quad (7)$$

$$\frac{\partial \phi_{D,k}}{\partial z} = 0 \quad \text{on } S_B \quad (8a)$$

$$\lim_{z \rightarrow -\infty} \nabla \phi_{D,k} = 0 \quad \text{on } S_B \quad (8b)$$

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \sqrt{R} (\frac{\partial \phi_{D,k}}{\partial R} - ik \phi_{D,k}) = 0 \quad \text{on } S_R \quad (9)$$

여기서, 식(8a)는 유한수심의 경우이고, 식(8b)는 무한수심의 경우이다. 식(9)는 무한원방에서의 방사조건이며, R 은 source점과 field점의 수평거리이고, k 는 조우 파수이다.

n_k 는 $(n_1, n_2, n_3) = \vec{n}$ 과 $(n_4, n_5, n_6) = (\vec{r} - \vec{r}_m) \times \vec{n}$ 의 일반방향여현이고, \vec{n} 은 선체에서 유체로 향하는 외향법선벡터, \vec{r}_m 은 운동중심점의 위치벡터이다. $m_k=0$ ($k=1, 2, 3, 4$)이고, $m_5 = n_3$, $m_6 = -n_2$ 이다.

선체의 운동주파수 ω 가 미분 연산자 $U\partial/\partial x$ 보다 훨씬 높은 고주파수로 가정하면, 자유표면 경계조건은 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial \phi_D}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \phi_D = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial \phi_k}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \phi_k = 0 \quad (k=1\sim6) \quad (11)$$

그러므로 ϕ_D, ϕ_k ($k=1\sim6$)은 통상적인 3차원 특이점 분포법에 의해 구할 수 있다.

일정 속도 U 로 파중을 전진하는 선체에 작용하는 유체력과 모멘트는 다음과 같다.

$$F_j = - \int_{S_H} p \cdot n_j ds = F_j^W + F_j^R + F_j^S \quad (12)$$

여기서, F_j^W 는 파강제력과 모멘트, F_j^R 은 동유체력과 모멘트, F_j^S 는 복원력과 모멘트이고 다음

과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_j^W = -\rho \int \int_{S_H} (i\omega + U \frac{\partial}{\partial x}) [\phi_I + \phi_D] e^{-i\omega t} n_j ds \quad (13)$$

$$F_j^R = -\rho \int \int_{S_H} (i\omega + U \frac{\partial}{\partial x}) [\sum_{k=1}^6 -i\omega \eta_k \phi_k] e^{-i\omega t} n_j ds \\ = \sum_{k=1}^6 \eta_k e^{-i\omega t} (\omega^2 \mu_{jk} + i\omega \nu_{jk}) \quad (14)$$

$$F_j^\delta = \rho g \int \int_{S_H} z n_j ds = - \sum_{k=1}^6 K_{jk} \eta_k e^{-i\omega t} \quad (15)$$

여기서

$$\mu_{jk} = -\frac{\rho}{\omega} Re \int \int_{S_H} n_j (\omega - iU \frac{\partial}{\partial x}) \phi_k ds \quad (16)$$

$$\nu_{jk} = -\rho Im \int \int_{S_H} n_j (\omega - iU \frac{\partial}{\partial x}) \phi_k ds \quad (17)$$

이고, μ_{jk} , ν_{jk} 및 K_{jk} 는 각각 k 방향의 운동에 의한 j 방향에의 부가질량, 감쇠계수 및 복원력계수이다.

식(13), (14)에서 포텐셜 미분항의 적분을 평가할 필요가 있다. 본 계산에서는 수치적분에 의해 이항을 직접 평가했다. 그런데, Chan⁸⁾은 Tuck의 정리^{11),12)}를 적용하여 그것을 선적분항이 포함된 포텐셜만의 적분항으로 변환시켜 선적분항을 무시하여 평가하고 있다.

선체의 운동이 입사파의 주파수와 조화인 것으로 가정하고 있으므로, 임의의 운동 기준점의 좌표 (x_m, y_m, z_m) 주위의 선형운동 방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$\sum_{k=1}^6 [-\omega^2 (M_{jk} + \mu_{jk}) - i\omega \nu_{jk} + K_{jk}] \eta_k e^{-i\omega t} \\ = F_j^W \quad (j=1 \sim 6) \quad (18)$$

여기서, M_{jk} 는 선체의 관성력 계수이다. 선체의 관성력 계수를 구체적으로 표시하면 다음과 같다.

$$M_{kk} = m, \quad (k=1 \sim 3) \\ M_{15} = -m(z_m - z_g), M_{16} = m(y_m - y_g)$$

$$M_{24} = m(z_m - z_g), M_{25} = -m(x_m - x_g) \\ M_{34} = -m(y_m - y_g), M_{35} = m(x_m - x_g) \\ M_{42} = M_{24}, M_{43} = M_{34} \\ M_{44} = I_{xx} + m(y_m - y_g)^2 + m(z_m - z_g)^2 \\ M_{45} = -I_{xy} - m(x_m - x_g)(y_m - y_g) \\ M_{46} = -I_{xz} - m(x_m - x_g)(z_m - z_g) \\ M_{51} = M_{15}, M_{53} = M_{35}, M_{54} = M_{45} \\ M_{55} = I_{yy} + m(x_m - x_g)^2 + m(z_m - z_g)^2 \\ M_{56} = -I_{yz} - m(y_m - y_g)(z_m - z_g) \\ M_{61} = M_{16}, M_{62} = M_{26} \\ M_{64} = M_{46}, M_{65} = M_{56} \\ M_{66} = I_{zz} + m(x_m - x_g)^2 + m(y_m - y_g)^2 \\ \text{상기 이외의 성분의 } M_{jk} = 0 \quad (19)$$

여기서, (x_g, y_g, z_g) 는 선체의 무게중심, m 은 선체의 질량이고,

$$I_{xx} = \sum [(y - y_g)^2 + (z - z_g)^2] \delta m \\ I_{yy} = \sum [(x - x_g)^2 + (z - z_g)^2] \delta m \\ I_{zz} = \sum [(x - x_g)^2 + (y - y_g)^2] \delta m \\ I_{xz} = \sum (x - x_g)(z - z_g) \delta m \\ I_{yz} = \sum (y - y_g)(z - z_g) \delta m \\ I_{xy} = \sum (x - x_g)(y - y_g) \delta m \\ m = \sum \delta m \quad (20)$$

또한 정수압에 의한 복원력 계수는 다음 식과 같이 표시된다.

$$K_{33} = \rho g \int \int_{S_0} dA \\ K_{34} = \rho g \int \int_{S_0} (y - y_g) dA - \rho g (y_m - y_g) \int \int_{S_0} dA \\ K_{35} = -\rho g \int \int_{S_0} (x - x_g) dA + \rho g (x_m - x_g) \int \int_{S_0} dA \\ K_{44} = \rho g (y_m - y_g)^2 \int \int_{S_0} dA$$

$$\begin{aligned}
 & - 2\rho g(y_m - y_g) \int \int_{S_0} (y - y_g) dA \\
 & + \rho g \int \int_{S_0} (y - y_g)^2 dA + \rho g V_0 (z_b - z_g) \\
 K_{45} = & - \rho g(x_m - x_g)(y_m - y_g) \int \int_{S_0} dA \\
 & + \rho g(x_m - x_g) \int \int_{S_0} (y - y_g) dA \\
 & + \rho g(y_m - y_g) \int \int_{S_0} (x - x_g) dA \\
 & - \rho g \int \int_{S_0} (x - x_g)(y - y_g) dA \\
 K_{46} = & - \rho g V_0 (x_b - x_g) \\
 K_{43} = & K_{34} , K_{53} = K_{35} , K_{54} = K_{45} \\
 K_{55} = & \rho g(x_m - x_g)^2 \int \int_{S_0} dA \\
 & - 2\rho g(x_m - x_g) \int \int_{S_0} (x - x_g) dA \\
 & + \rho g \int \int_{S_0} (x - x_g)^2 dA + \rho g V_0 (z_b - z_g) \\
 K_{56} = & - \rho g V_0 (y_b - y_g) \\
 \text{상기 이외의 성분의 } & K_{ij} = 0 \quad (21)
 \end{aligned}$$

여기서, V_0 는 배수용적, (x_b, y_b, z_b) 는 선체의 부력중심, $S_0 = \int \int_{S_0} dA$ 는 수선면적이다.

운동응답이 구해지면 선체 침수표면의 임의의 점에 있어서의 변동압력은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned}
 p = & \rho(i\omega + U \frac{\partial}{\partial x}) \left\{ \phi_I + \phi_D + \sum_{k=1}^6 -i\omega\eta_k\phi_k \right\} e^{-i\omega t} \\
 & - \rho g(\eta_3 + (y - y_m)\eta_4 - (x - x_m)\eta_5) e^{-i\omega t} \\
 = & \left[i\rho\omega_0\phi_I + i\rho\omega \left\{ \phi_D + \sum_{k=1}^6 -i\omega\eta_k\phi_k \right\} \right. \\
 & \left. + \rho U \left\{ \frac{\partial\phi_D}{\partial x} + \sum_{k=1}^6 -i\omega\eta_k \frac{\partial\phi_k}{\partial x} \right\} \right. \\
 & \left. - \rho g(\eta_3 + (y - y_m)\eta_4 - (x - x_m)\eta_5) \right] e^{-i\omega t} \quad (22)
 \end{aligned}$$

여기서, ϕ_I, ϕ_D 는 선속에 무관하나, ϕ_k 는 선속에 의존함에 주의를 요한다.

쌍동선에 대한 주요 내력은 쌍동선의 횡단갑판의 중심선에서 종방향으로 잘랐을 때 생기는 종단면에 작용하는 횡하중 및 SWATH의 경우 수직 strut에 작용하는 횡하중이다. 이 횡하중은 Fig. 4와 같이 종방향 전단력(longitudinal shear force) F_1 , 측면력(side force) F_2 , 수직전단력(vertical shear force) F_3 , 굽힘 모멘트(prying moment) F_4 , pitch 비틀림 모멘트(pitch torsional moment) F_5 와 yaw 분리 모멘트(yaw splitting moment) F_6 이다.

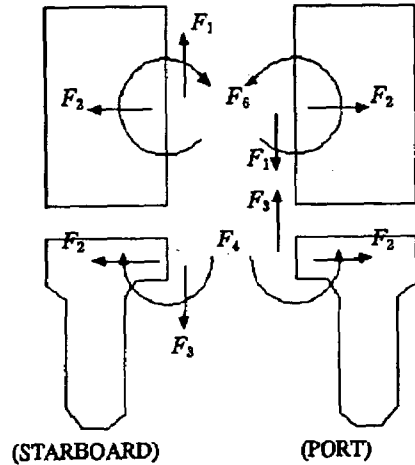
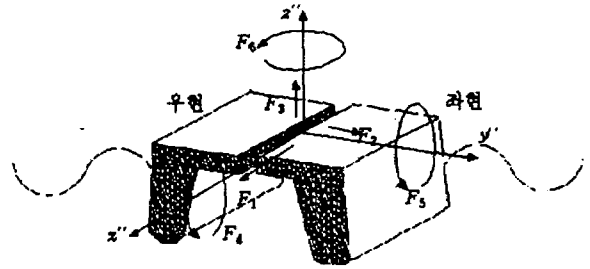


Fig. 4 Definition of global wave loads

두 선각의 대칭관계를 이용하면, 다음과 같은 파랑하중의 식을 얻을 수 있다.

$$F_1 = -\frac{1}{2} m \bar{y}_g \ddot{\xi}_6 - \frac{1}{2} (F_{1P} - F_{1S}) \quad (23)$$

$$F_2 = -\frac{1}{2} (F_{2P} - F_{2S}) \quad (24)$$

$$F_3 = \frac{1}{2} m \bar{y}_g \ddot{\xi}_4 - \frac{1}{2} (F_{3P} - F_{3S}) \quad (25)$$

$$F_4 = \frac{1}{2} m \bar{y}_g \bar{\xi}_3 - \frac{1}{2} m \bar{x}_g \bar{y}_g \bar{\xi}_5 - I_{xy} \bar{\xi}_5$$

$$- \frac{1}{2} \{ F_{4P} - F_{4S} + (F_{3P} - F_{3S}) y_m$$

$$- (F_{2P} - F_{2S})(z_m - h_0) \} \quad (26)$$

$$F_5 = -I_{yx} \bar{\xi}_4 - \frac{1}{2} m \bar{x}_g \bar{y}_g \bar{\xi}_4 - I_{yz} \bar{\xi}_6$$

$$- \frac{1}{2} m \bar{y}_g (\bar{z}_g - h_0) \bar{\xi}_6$$

$$- \frac{1}{2} \{ F_{5P} - F_{5S} + (F_{1P} - F_{1S})(z_m - h_0)$$

$$- (F_{3P} - F_{3S}) x_m \} \quad (27)$$

$$F_6 = -\frac{1}{2} m \bar{y}_g \bar{\xi}_1 - I_{zy} \bar{\xi}_5 - \frac{1}{2} m \bar{y}_g (\bar{z}_g - h_0) \bar{\xi}_5$$

$$- \frac{1}{2} \{ F_{6P} - F_{6S} + (F_{2P} - F_{2S}) x_m$$

$$- (F_{1P} - F_{1S}) y_m \} \quad (28)$$

여기서, $(\bar{x}_g, \bar{y}_g, \bar{z}_g)$ 는 기준좌표계에 대한 좌현 선각의 무게중심이며, F_{jP} 와 F_{jS} 는 동유체 압력과 정수압에 기인하는 기준좌표계에서의 운동 기준점 (x_m, y_m, z_m) 에서 평가된 좌우현 선각에 작용하는 유체력, h_0 는 평균 자유수면과 횡단 갑판 중성축간의 수직거리이다. 또, I_{jk} 는 기준좌표계에 대한 좌현선각의 무게중심에서의 좌현 선각의 관성모멘트($j = k$) 혹은 관성상승모멘트($j \neq k$)이다.

그리고 $\bar{\xi}_j$ 는 cross-deck의 중성축상의 좌표 $(0, 0, h_0)$ 에서 평가된 가속도로서 임의의 운동기준점 (x_m, y_m, z_m) 에서의 가속도 $\bar{\eta}_j$ 와는 다음의 관계가 성립한다.

$$\bar{\xi}_1 = \bar{\eta}_1 - (z_m - h_0) \bar{\eta}_5 + y_m \bar{\eta}_6$$

$$\bar{\xi}_2 = \bar{\eta}_2 + (z_m - h_0) \bar{\eta}_4 - x_m \bar{\eta}_6$$

$$\bar{\xi}_3 = \bar{\eta}_3 - y_m \bar{\eta}_4 + x_m \bar{\eta}_5$$

$$\bar{\xi}_4 = \bar{\eta}_4, \bar{\xi}_5 = \bar{\eta}_5, \bar{\xi}_6 = \bar{\eta}_6 \quad (29)$$

또한, 식(23)~식(28)에서의 유체력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{jP} - F_{jS} = \rho \int \int_{S_H} sig(y) (\bar{\Phi}_t - U \bar{\Phi}_x) n_j ds$$

$$= -\rho \int \int_{S_H} sig(y) n_j (i\omega + U \frac{\partial}{\partial x}) \bar{\Phi} ds$$

$$= (F_{jP}^I + F_{jP}^D + F_{jP}^R) - (F_{jS}^I + F_{jS}^D + F_{jS}^R)$$

$$(j = 1, 2, 6) \quad (30)$$

$$F_{3P} - F_{3S} = \rho \int \int_{S_H} sig(y) (\bar{\Phi}_t - U \bar{\Phi}_x) n_3 ds$$

$$- \rho g \eta_4 \int \int_{S_0} sig(y) y dA$$

$$= (F_{3P}^I + F_{3P}^D + F_{3P}^R) - (F_{3S}^I + F_{3S}^D + F_{3S}^R)$$

$$- 2\rho g \eta_4 \int \int_{S_{op}} y dA \quad (31)$$

$$F_{4P} - F_{4S} = \rho \int \int_{S_H} sig(y) (\bar{\Phi}_t - U \bar{\Phi}_x) n_4 ds$$

$$- \rho g \eta_3 \int \int_{S_0} sig(y) y dA$$

$$+ 2\rho g \eta_4 y_m \int \int_{S_0} sig(y) y dA$$

$$+ \rho g \eta_5 \int \int_{S_0} sig(y) (x - x_m) y dA$$

$$+ \rho g V_0 (\bar{y}_b - \bar{y}_g)$$

$$= (F_{4P}^I + F_{4P}^D + F_{4P}^R) - (F_{4S}^I + F_{4S}^D + F_{4S}^R)$$

$$- 2\rho g \eta_3 \int \int_{S_{op}} y dA + 4\rho g \eta_4 y_m \int \int_{S_{op}} y dA$$

$$+ 2\rho g \eta_5 \int \int_{S_{op}} (x - x_m) y dA$$

$$+ \rho g V_0 (\bar{y}_b - \bar{y}_g) \quad (32)$$

$$F_{5P} - F_{5S} = \rho \int \int_{S_H} sig(y) (\bar{\Phi}_t - U \bar{\Phi}_x) n_5 ds$$

$$+ \rho g \eta_4 \int \int_{S_0} sig(y) (x - x_m) y dA$$

$$+ \rho g V_0 \eta_6 (\bar{y}_b - \bar{y}_g)$$

$$= (F_{5P}^I + F_{5P}^D + F_{5P}^R) - (F_{5S}^I + F_{5S}^D + F_{5S}^R)$$

$$+ 2\rho g \eta_4 \int \int_{S_{op}} (x - x_m) y dA$$

$$+ \rho g V_0 \eta_6 (\bar{y}_b - \bar{y}_g) \quad (33)$$

여기서, S_{0P} 는 좌현 선각의 수선면적이고,

$$F'_{jP} = -i\rho\omega_o \int \int_{S_P} n_j \phi_j ds \cdot e^{-i\omega t}$$

$$F'_{jS} = -i\rho\omega_o \int \int_{S_S} n_j \phi_j ds \cdot e^{-i\omega t} \quad (34)$$

$$F''_{jP} = -\rho \int \int_{S_P} n_j (i\omega + U \frac{\partial}{\partial x}) \phi_D ds \cdot e^{-i\omega t}$$

$$F''_{jS} = -\rho \int \int_{S_S} n_j (i\omega + U \frac{\partial}{\partial x}) \phi_D ds \cdot e^{-i\omega t} \quad (35)$$

$$F''_{jP} = \sum_{k=1}^6 T_{jkP} \eta_k e^{-i\omega t}$$

$$T_{jkP} = -\rho\omega \int \int_{S_P} n_j (\omega - iU \frac{\partial}{\partial x}) \phi_k ds$$

$$F''_{jS} = \sum_{k=1}^6 T_{jkS} \eta_k e^{-i\omega t}$$

$$T_{jkS} = -\rho\omega \int \int_{S_S} n_j (\omega - iU \frac{\partial}{\partial x}) \phi_k ds \quad (36)$$

여기서, S_P, S_S 는 각각 좌현과 우현 선각의 침수표면이며, $F'_j = F'_{jP} + F'_{jS}$, $F''_j = F''_{jP} + F''_{jS}$, $F''_j = F''_{jP} + F''_{jS}$ 의 관계는 성립하며, F'_{jP} 와 F'_{jS} 는 일반적으로 서로 같지 않다. 그리고, 식(32)의 마지막 항은 정적 굽힘 모멘트 성분으로 Wahab¹³⁾의 실험치에는 동적 성분만을 나타내고 있으므로 본 계산에서도 실험치와의 비교를 위해 이 항을 생략했다. 또한, 식(32),(33)의 마지막 항은 Chan⁸⁾의 정식화에 포함되어 있지 않은 새로운 항이다.

3. 수치계산 결과 및 고찰

Table 1은 본 계산모델인 쌍동선의 주요목을 나타내고, Fig. 5는 쌍동선에 작용하는 동유체력을 계산하기 위해 쌍동선의 침수표면을 552개의 평면 패널로 분할한 것이다.

ASR catamaran에서 쌍동간 거리와 단동폭비는 1.41로 하고, 입사각은 90°, 120°, 180° 일 때 각각 3개의 속도($F_n = 0.0, 0.126, 0.253$)에 대해서 계산을 수행하여 비교하였다.

Table 1 Principal particulars of an ASR catamaran

LBP, L (m)	64.01
Beam overall, B (m)	24.95
Beam of each hull at LWL (m)	7.32
Draught, D (m)	5.49
Hull spacing between hull centre-line (m)	17.63
Neutral axis height from LWL (m)	7.01
Displacement (tonnes)	2838.70
VCG (m)	6.40
LCG (m)	0.15A
CG of demi-hull from hull centre-line (m)	8.42
GM _T (m)	15.47
k_{xx} (m)	9.30
k_{yy} (m)	16.00
k_{zz} (m)	16.00

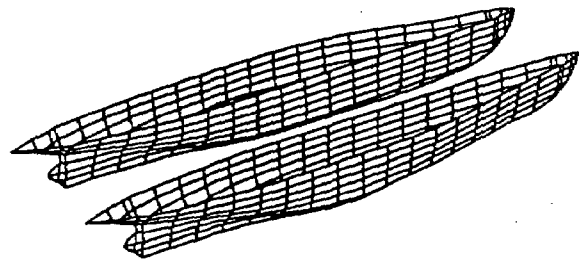


Fig. 5 Submerged surface of a twin-hull ship represented by 552 panels

heave는 평면 입사파의 진폭 ζ_a , pitch, roll은 파기울기 $k_0 \zeta_a$ (k_0 는 파수), 측면력, 수직전단력은 $\rho g \zeta_a L B$, 굽힘 모멘트, pitch 비틀림 모멘트, yaw 분리 모멘트는 $\rho g \zeta_a L^2 B$ 로 각각 무차원화시켰다. Fig. 6, 7, 8은 각각 선수파 및 횡파에 있어서의 heave, pitch, roll의 무차원 진폭을 나타내고 있다. 흑점은 Wahab¹³⁾의 실험치이고 실선은 직접수치적분에 의한 계산결과이며, 점선은 Tuck의 정리^{11),12)}에 의한 선적분항을 무시한 계산결과이다. 전반적으로 실험치와 잘 일치하고 있고, 선적분항의 영향이 그다지 크지 않으나, 선속이 증가함에 따라 약간의 차이를 보여주고 있다.

Fig. 9, 10은 각각 횡파 및 선수파에 있어서의 무차원 측면력을 나타내고 있다. 원표는 Chan⁸⁾의 점

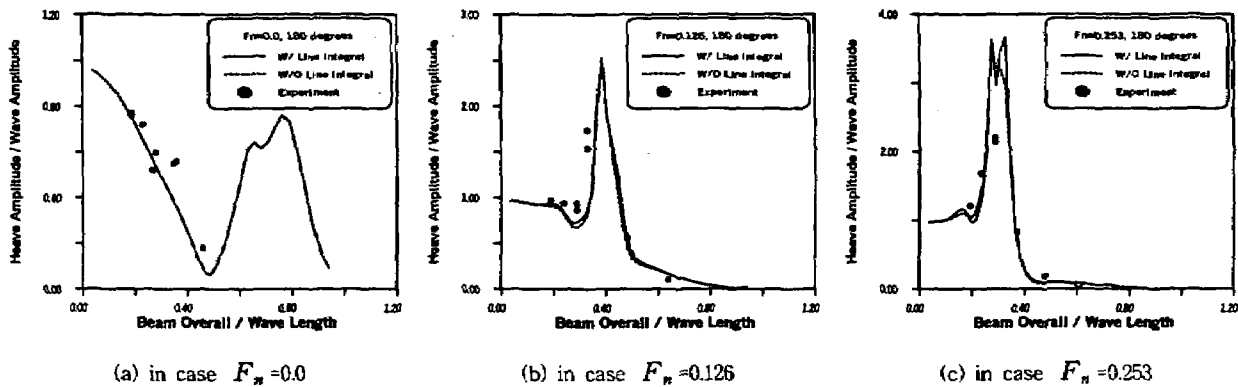


Fig. 6 Heave amplitude in head seas

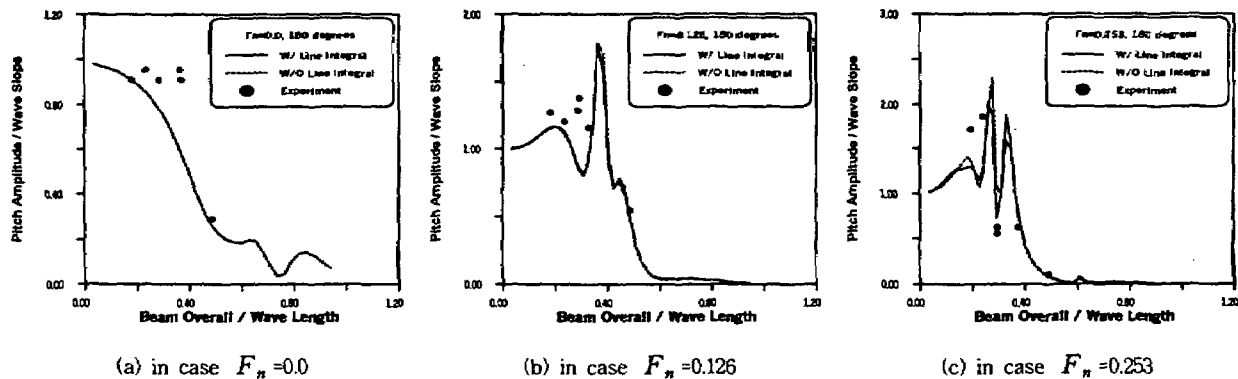


Fig. 7 Pitch amplitude in head seas

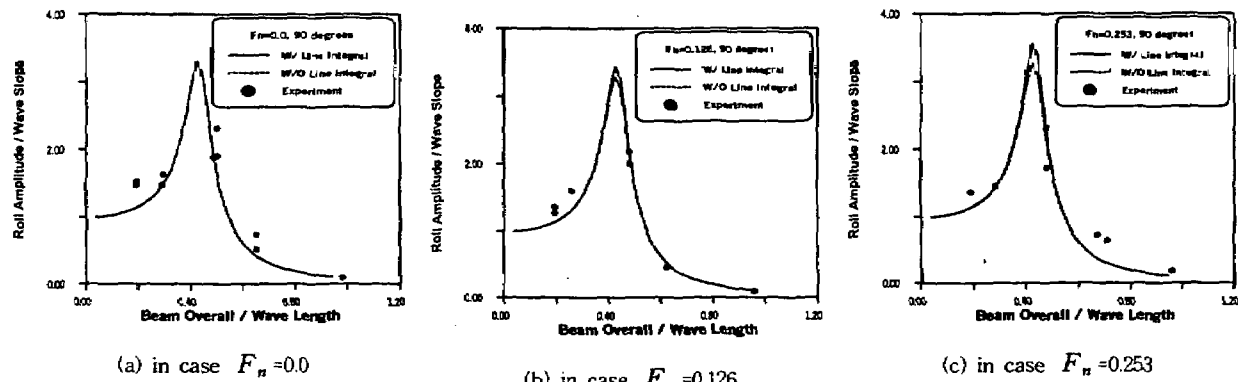


Fig. 8 Roll amplitude in beam seas

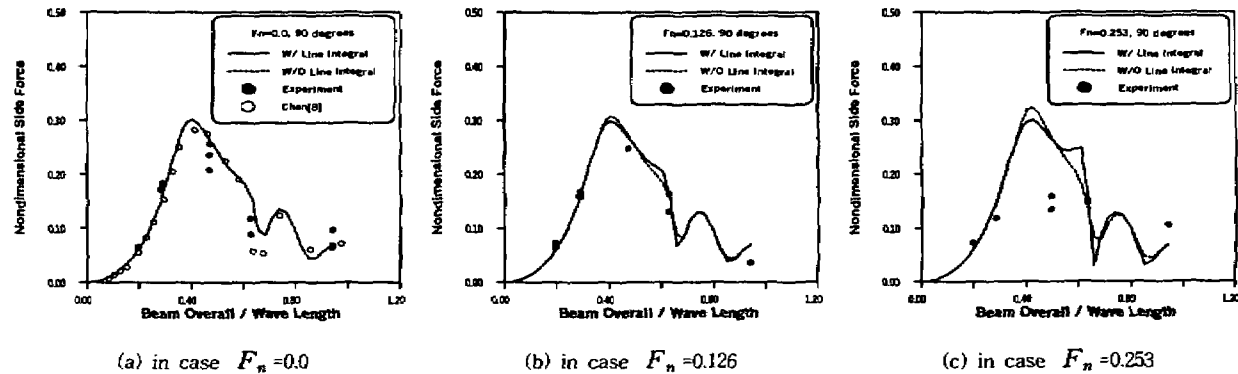


Fig. 9 Side force in beam seas

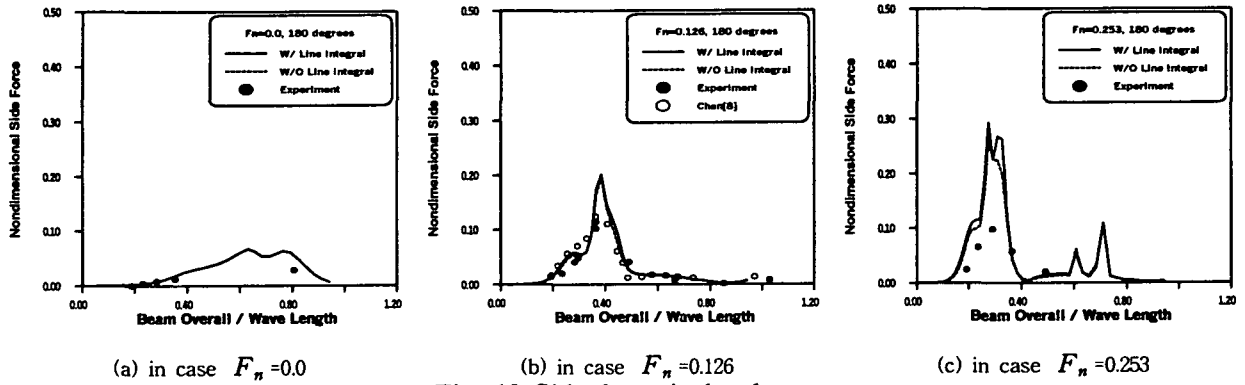


Fig. 10 Side force in head seas

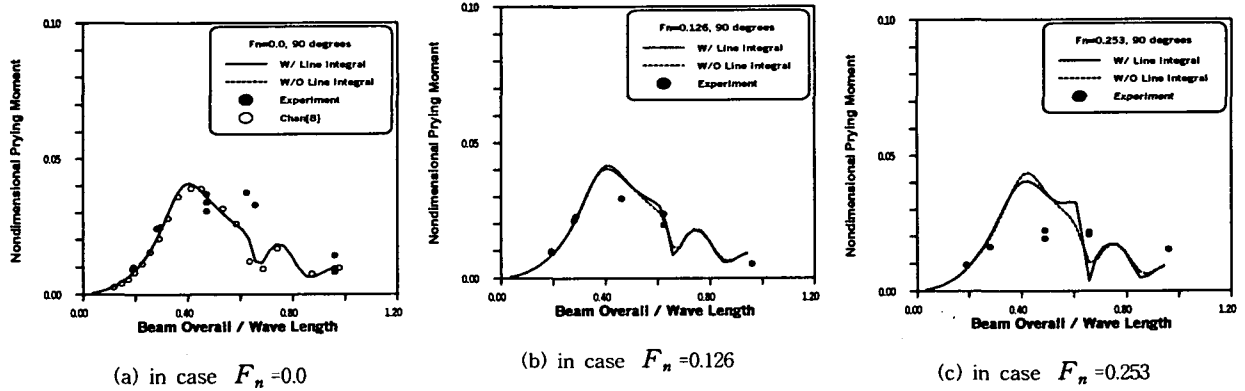


Fig. 11 Prying moment in beam seas

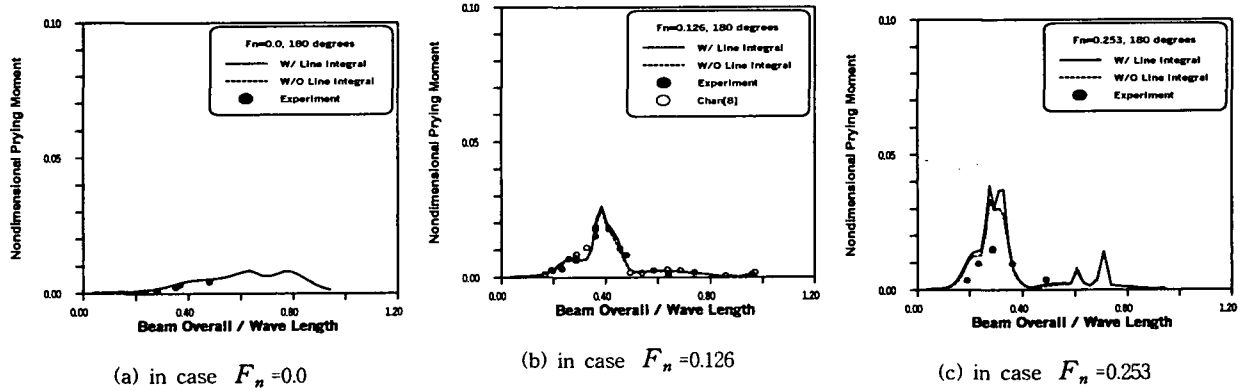


Fig. 12 Prying moment in head seas

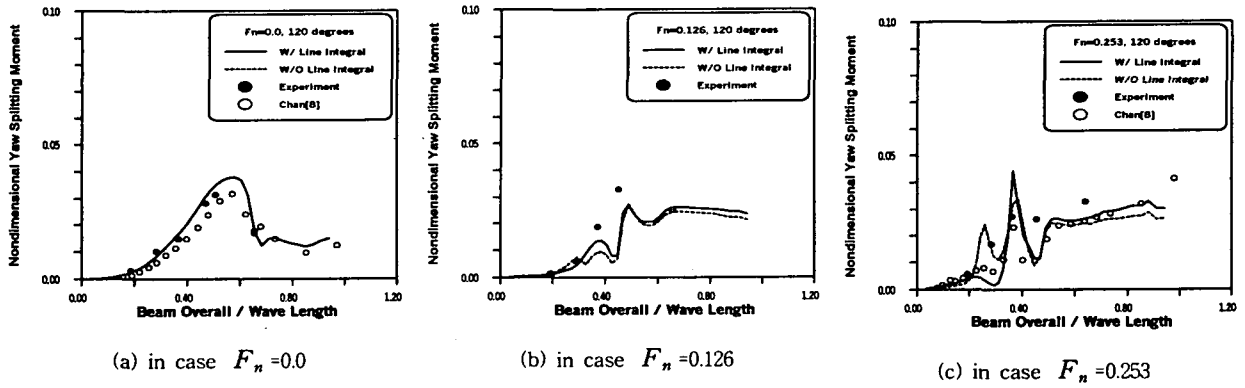


Fig. 13 Yaw splitting moment in $\beta = 120^\circ$

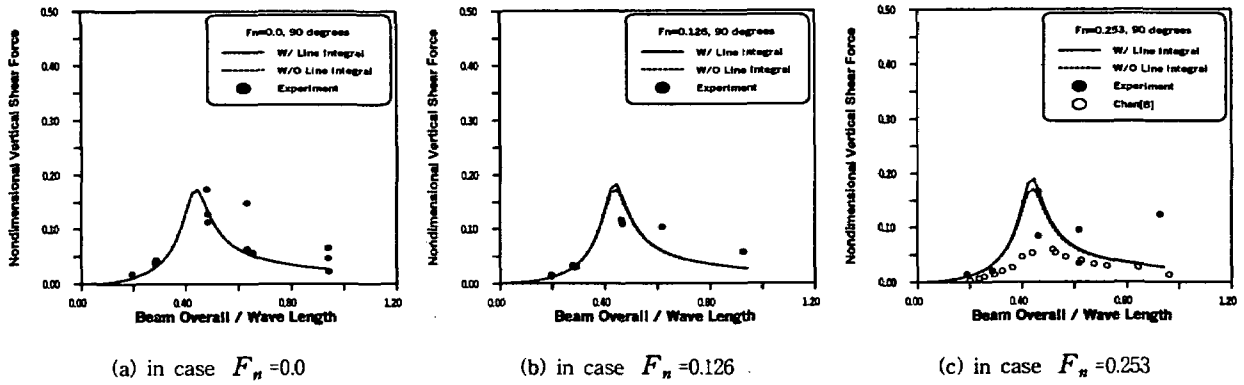


Fig. 14 Vertical shear force in beam seas

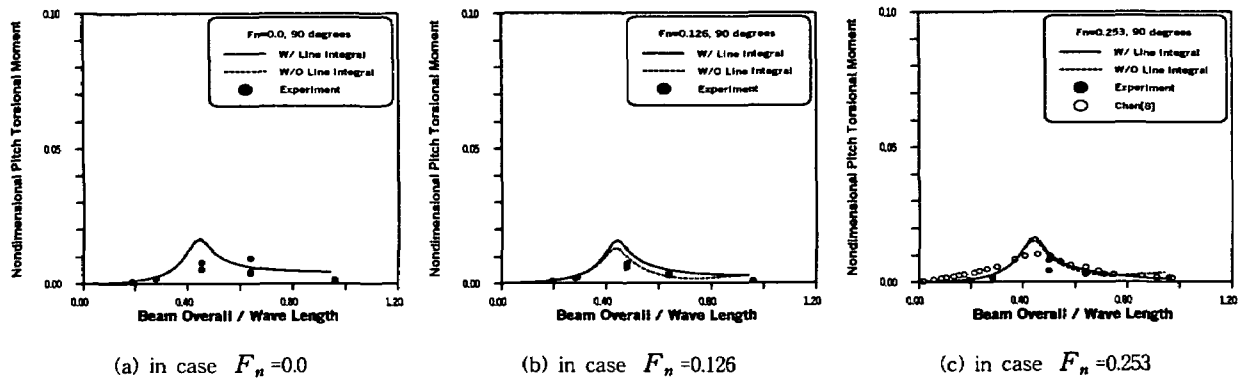


Fig. 15 Pitch torsional moment in beam seas

성 감쇠를 고려한 계산결과이다. 선속이 작은 경우에 있어서, 본 계산결과는 실험치 및 Chan의 계산치와 잘 일치하고 있으나, 선속이 큰 경우에는 실험치보다 크게 추정하고 있다. 이것은 자유표면 경계조건에서 선속의 영향을 무시했기 때문인 것으로 생각된다. 피크치에 있어서의 과대 추정은 마찰, 조와, 양력에 의한 점성감쇠를 고려하면 개선되어질 것으로 사료된다.

Fig. 11,12는 각각 횡파 및 선수파에 있어서의 무차원 굽힘 모멘트를 나타내고 있다. 굽힘 모멘트의 응답특성은 측면력의 응답특성과 동일한 경향을 보여주고 있다. 그러므로 굽힘 모멘트는 측면력에 의해 발생하는 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 선수사파($\beta=120^\circ$)인 경우에 있어서의 무차원 yaw 분리 모멘트를 나타내고 있다. 본 계산결과는 실험치 및 Chan의 계산치와 좋은 상관을 보여주고 있음을 알 수 있다.

Fig. 14는 횡파에 있어서의 무차원 수직전단력을

나타내고 있다. 본 계산결과는 실험치와 잘 일치하고 있으나, Chan의 계산결과는 실험치보다 과소 평가하고 있음을 알 수 있다.

Fig.15는 횡파에 있어서의 무차원 pitch 비틀림 모멘트를 나타내고 있다. 피크치에서 약간 과대 평가하고 있지만, 전반적으로 좋은 상관을 보여주고 있다.

파랑하중도 운동응답과 마찬가지로 선속이 증가함에 따라 선적분항의 영향이 약간 나타나지만, 그 차이는 그다지 크지 않음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서 얻어진 주요한 결론은 다음과 같다.

- 1) 3차원 특이점분포법을 이용하여 쌍동선의 운동과 파랑하중을 평가하였으며, 본 수치계산의 결과를 Wahab의 실험치 및 Chan의 계산치와 서로 비교

- 검토하여 본 계산기법의 타당성을 검증하였다.
- 2) Tuck의 정리에 나타나는 선적분항은 선속에 관계하므로 선속이 없는 경우에는 선적분항을 고려한 경우와 무시한 경우에 대해 동일 값을 보였고, 선속이 있는 경우에는 선속이 증가함에 따라 그 영향이 다소 있지만, 그다지 크게 나타나지 않았다.
 - 3) 본 연구에서 개발된 프로그램은 선체의 침수표면에서의 유체압력도 출력하고 있으므로 전선해석에 의해 경제적이고 합리적인 쌍동선 설계에 이용될 수 있을 것으로 사료된다.
 - 4) 본 연구에서는 점성 감쇠와 양력에 대한 영향을 고려하지 않았으나, 이에 대한 평가가 요구되며, 전선해석에 대한 연구가 진행되어야 한다.

참 고 문 헌

- 1) Fry, E. D. and Graul, T., "Design and Application of Modern High-Speed Catamarans", Marine Technology, Vol. 9, pp.345-357, 1972
- 2) Lee, C. M., "Theoretical Prediction of Motion of Small-Waterplane-Area Twin-Hull(SWATH) Ships in Waves", DTNSRDC Report 76-0046, 1976
- 3) Lee, C.M. and Curphey, R. M., "Prediction of Motion Stability and Wave Load of Small-Waterplane-Area Twin Hull Ships", Trans. SNAME 85, pp.94-130, 1977
- 4) 神宮紀夫, "半沒水雙胴船の縱運動に關する研究", 關西造船協會誌, 第182號, 1981
- 5) Hong, H.S., "Predictions of Motion of SWATH Ships in Following Seas", DTNSRDC Report, 81-039, 1981
- 6) Kim, K.H., "Determination of Damping Coefficients of SWATH Catamaran Using Thin Ship Theory", Thesis of M.Sc., M.I.T., 1975
- 7) 小林正典, 島田 潔, "半沒水型雙胴船(SWATH)", 日本造船學會 運動性能研究委員會·第7回シンポジウム, pp.49-80, 1990
- 8) Chan .H.S., "Prediction of Motion and Wave Loads of Twin-hull Ships", Marine Structures, Vol. 6, pp.75-102, 1993
- 9) Hess, J.L. and Smith, A.M.O., "Calculation of Nonlifting Potential Flow about Arbitrary Three- Dimensional Bodies", Journal of Ship Research, Vol.8, No.2, pp.22-44, 1964
- 10) Faltinsen, O.M. and Michelsen, F.C., "Motions of Large Structures in Waves at Zero Froude Number", Proceedings of International Symposium on Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves, pp.91-106, 1974
- 11) Ogilvie, T.F. and Tuck, E.O., "A Rational Strip Theory of Ship Motions:Part 1", University of Michigan, Report No.013, 1969
- 12) Salvesen, N., Tuck, E. O. and Faltinsen, O., "Ship Motions and Sea Loads", Trans. SNAME, Vol. 78, pp.250-287, 1970
- 13) Wahab, R., Pritchett, C. & Ruth, L.C., "On the Behavior of the ASR Catamaran in Waves," Marine Technology, Vol. 8, pp.334-360, 1971