

고속선 설계를 위한 유동계산 및 쇄파현상

朴 命 圭* · 郭 承 鉉**

Numerical Simulation of the Flows and Breaking Phenomena
for the Design for High Speed Vessels

Myung-Kyu Park · Hyun-Seung Kwag

〈目 次〉

Abstract	3. 계산 결과 및 검토
1. 서 론	3.1 계산 조건
2. 수치해법	3.2 계산 결과 및 검토
2.1 기초방정식	4. 결 론
2.3 쇄파의 형성조건(Appearance Condition)	참고문헌

Abstract

In connection to the design of high speed vessels, the numerical simulation is carried out to make clear the property of flows and breaking phenomena around the catamaran. It is because the bradking phenomenon is closely related to the free-surface turbulent flow. The free-surface wave and transverse velocity vectors are calculated around the twin and demi hull of the catamaran. Computed results are applied to detect the appearance of sub-breaking waves around the hull.

The critical condition for their appearance is studied at two Froude numbers of 0.45 and 0.95. The numerical analysis shows that the breaking is more serious near the twin hull rather the demi hull. To simulate the flows, the Navier-Stokes solver is invoked with a free-surface. The computation is made only in half a domain because it is symmetric in the shape.

* 정회원, 한국해양대학교 선박공학과

** 정회원, 현대중공업 주식회사

기 호 설 명

- u, v, w 무차원 속도계수
- x, y, z cartesian 좌표계
- p 무차원 압력계수
- ξ, η, ζ 변환 좌표계
- U, V, W 변환 속도
- ∇^2 Laplacian 변환
- U_s 유선방향의 속도
- M 원주방향의 힘
- s 유선방향의 좌표계
- κ 자유수면의 곡률
- n_z z방향의 법선속도
- g 중력 가속도
- j η 방향의 격자 순소
- ζ 자유 수면의 파고
- L 무차원 배의 길이
- t 무차원 시간
- F_n 프루우드 수
- R_n 레이놀드 수
- subscr. x, y, z, t에 관한 1차 도함수
(x, y, z, t)

1. 서 론

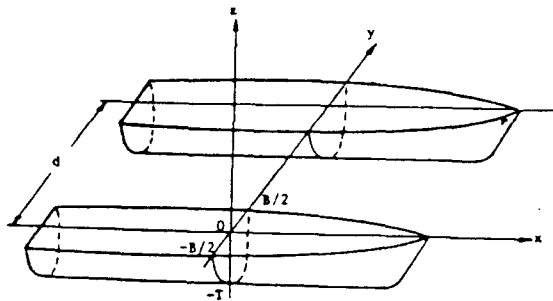
선박설계의 기초 연구 과정에 있어서 비선형과 난류라는 복잡한 유동현상을 내포하는 흐름을 규명하는 것은 선박 계산의 가장 어렵고 또한 최종적인 목표이기도 하다. 최근 들어 고 부가가치의 경제 선형인 고속 쌍동선 및 여객선의 개발을 위하여 예인수조에서 모형시험을 하는 과정에서 우리들은 선체 주위에서 심한 파도깨짐이 흔히 붕괴(breaking)라고도 하는데 이에 대해서는 많은 연구가 있어 왔다. Duncan[1]은 2차원 하이드로포일을 가지고 실험을 하여 파도 붕괴 현상이 저항 값에 미치는 영향을 규명하였고, Mori and Shin[2]은 쇄파 현상을 수치적으로 연구하여 쇄파의 특성과 발생 조건 등을 다루었다. Coleman

[3]은 2차원 날개를 대상으로 깊이에 따른 쇄파 현상을 수치 및 실험을 통하여 규명하였다. 그 이후 Mori[4], Maruo[5], Grosenbaugh[6] 등이 자유표면 쇄파에 관한 실험을 수행하였지만 쇄파와 관계된 자유표면의 비선형 문제는 역시 어려운 과제로 남아있다. 실험을 통해 현상을 설명하고 이론적인 수학적 모델링 작업도 이루어졌는데 주로 Dagan[7], Tanaka[8] 등에 의해서였다. 이들은 쇄파현상을 예측하기 위하여 불안정 해석(instability analysis)을 하였고 나름대로 쇄파에 대한 발생조건(appearance condition)을 수치계산에 적용하였다.

본 연구에 있어서는 타원(elliptic) 형태의 쌍동선을 대상으로 수치계산을 수행하였다.(Table 1의 주요제원 참조) 자유표면을 포함하여 Navier-Stokes 방정식을 풀었으며 단동선(demi-hull)을 먼저 취급하고 쌍동선(twin-hull)을 계산하는 순서로 수행하였다. 결과로서는 자유수면과 분포, 유동장내 압력 및 속도 분포 등이고, 적용으로서 쇄파현상 예측 및 모델의 유용성 검토이다.

Table 1. 주요제원

L. O. A.	44m
L. W. L.	40m
Breadth	11m
Mono Hull Beam	3m
Draft	1.6m
Depth	5.0m
Design Speed	35 knots



2. 수치해법

2.1 기초방정식

비압축성 및 비정상 유체에 대한 지배방정식은 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식이다. 그들을 무차원해서 표기하면 다음과 같이 된다.

$$u_t + uu_x + vu_y + wu_z = -p_x + \frac{1}{R_n} \nabla^2 u$$

$$v_t + uv_x + vv_y + wv_z = -p_y + \frac{1}{R_n} \nabla^2 v \dots\dots\dots (1)$$

$$w_t + uw_x + vw_y + ww_z = -p_z + \frac{1}{R_n} \nabla^2 w$$

$$u_x + v_y + w_z = 0 \dots\dots\dots (2)$$

여기서 변수 밑에 표기한 것은 그 변수에 대한 편미분을 나타내고 (u, v, w)는 cartesian 좌표계 (x, y, z)에 대한 속도 성분들, p는 압력을 표시한다. 모든 변수는 배의 길이 L, 균일 유입 속도 U, 및 물의 밀도 ρ에 의해 무차원화 시켰다. 물체 형상을 보다 정확히 나타내고 경계조건의 편의를 위해 물체 적합 좌표계를 적용했고 계산을 위한 좌표계 변환을 수행하였다.

$$\xi = \xi(x, y, z), \eta = \eta(x, y, z), \zeta = \zeta(x, y, z) \dots (3)$$

위의 관계를 대입하면 다음을 얻는다.

$$u_t + Uu_\xi + Vu_\eta + Wu_\zeta = -(\xi p_\xi + \eta p_\eta + \zeta p_\zeta) + \frac{1}{R_n} \nabla^2 u \dots\dots\dots (4)$$

$$v_t + Uv_\xi + Vv_\eta + Wv_\zeta = -(\xi p_\xi + \eta p_\eta + \zeta p_\zeta) + \frac{1}{R_n} \nabla^2 v$$

$$w_t + Uw_\xi + Vw_\eta + Ww_\zeta = -(\xi p_\xi + \eta p_\eta + \zeta p_\zeta) + \frac{1}{R_n} \nabla^2 w$$

$$\xi u_\xi + \eta u_\eta + \zeta u_\zeta + \xi v_\xi + \eta v_\eta + \zeta v_\zeta + \xi w_\xi + \eta w_\eta + \zeta w_\zeta = 0 \dots\dots\dots (5)$$

여기서 U, V, W는 contravariant 속도를 의미하고 아래의 관계를 갖는다.

$$U = \xi_x u + \xi_y v + \xi_z w$$

$$V = \eta_x u + \eta_y v + \eta_z w \dots\dots\dots (6)$$

$$W = \zeta_x u + \zeta_y v + \zeta_z w$$

물체 적합 좌표계에서의 Laplacian ∇^2 은 다음의 관계를 가진다.

$$\nabla^2 q = (\xi_x^2 + \xi_y^2 + \xi_z^2)_{q\xi\xi} + (\eta_x^2 + \eta_y^2 + \eta_z^2)_{q\eta\eta} + (\zeta_x^2 + \zeta_y^2 + \zeta_z^2)_{q\zeta\zeta} + 2(\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y + \xi_z \eta_z)_{q\xi\eta} + 2(\eta_x \zeta_x + \eta_y \zeta_y + \eta_z \zeta_z)_{q\eta\zeta} + 2(\xi_x \zeta_x + \xi_y \zeta_y + \xi_z \zeta_z)_{q\xi\zeta} + (\eta_x + \eta_y + \eta_z)_{q\eta} + (\zeta_x + \zeta_y + \zeta_z)_{q\zeta} \dots\dots\dots (7)$$

2.2 수치 기법 및 경계조건

MAC 방법[9]이 사용되었으며 압력을 계산하기 위하여 Poisson 방정식을 풀었고 모우멘텀 방정식과 연속방정식을 만족시켰다. Poisson 방정식을 풀기 위하여 relaxation 방법이 사용되었으며 매 timestep에서도 속도들은 모우멘텀 방정식으로부터 updated 되어졌다. 수치 계산은 단동선의 경우는 좌우 대칭인 점을 고려하여 한쪽 domain만 계산했고 쌍동선의 경우는 두 hull 사이의 간섭현상을 검토하기 위하여 두 동체간의 영역만을 계산하였다. 선체표면의 경계조건으로 속도에 대해서는 no-slip 조건을 사용하였고 압력에 관해서는 모우멘텀 방정식으로 부터 압력에 관해서는 모우멘텀 방정식으로 부터 Neumann 조건을 적용하였다. 물체로 부터 먼 쪽의 경계에는 zero-gradient 조건을 속도에 적용하였다. 물체의 하류에는 압력 조건으로 선형 외삽법(linearly extrapolated)을 유선 방향으로 적용했고 압력의 확산(diffusion)은 무시하였다.

2.3 쇄파의 형성조건(Appearance Condition)

계산된 결과는 쇄파의 형성을 예측하기 위해 사용되었다. 쇄파 형성의 임계조건(critical condition)은 Mori[10]에 의해서 제안되었다. 초기상태에서의 쇄파는 자유표면 난류 유동으로 구분되었는데 기본 가정은 자유수면 파고의 증가로 인하여 파도의 봉우리에 모인 잉여 에너지가 난류를 만들어 내면서 흩어지는(dissipated) 상태로 되어 결국 overturning이나 backward flow가 나타나지

않고 스스로 평형을 유지하는 것이다. 불안정(instability) 해석을 수행하면 쇄파형성에 대한 임계 조건은 다음과 같이 된다.

$$\frac{U_s}{M} \frac{\partial M}{h \partial s} - \frac{\partial U_s}{h \partial s} - \frac{U_s}{n_z} \frac{\partial n_z}{h \partial n_s} > 0 \dots\dots\dots (8)$$

여기서 M은 원주 방향의 힘으로 다음과 같이 된다.

$$M = (kU^2 - n_z g) \cdot n_z \dots\dots\dots (9)$$

식(8)의 물리적 의미를 음미하면 자유수면 파는국부 파장 U^2/g 로 normalized 되었고 자유 표면 파고의 증가가 원주방향(circumferential) 힘의 증가 보다 커지면 불안정(unstable)하게 될 수 있다는 것이다. 이 불안정 해석을 계산된 결과에 이용하기 위해서는 다음의 식을 사용할 수 있다. 왜냐하면 $n_z = 1$, $\partial/h \partial s = \partial/\partial x$ 로 가정할 수 있기 때문이다.

$$\frac{U^2}{M} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{M}{U} \right) > 0 \dots\dots\dots (10)$$

여기서

$$M = kU^2 - 9 \dots\dots\dots (11)$$

3. 계산 결과 및 검토

3.1 계산 조건

계산은 Froude 수 0.45 및 0.95에서 수행하였고 타원(elliptic) 형태의 선형에 대하여 계산을 수행하였다. 격자는 기하학적(geometric) 방법에 의하여 생성하였고 선미는 계산의 발산을 막기 위하여 몇개의 계산점을 후류 방향으로 점진 이동시켰다. 격자수는 단동선의 경우 $80 \times 16 \times 16$ 이고 쌍동선의 경우는 $80 \times 30 \times 16$ 을 사용하였다. 계산 영역은 선미 방향으로 상당한 domain이 필요하였으나 컴퓨터의 제한 때문에 선미로부터 배의 길이만큼 택하였다.

3.2 계산 결과 및 검토

Fig. 1은 계산을 위한 쌍동선과 단동선의 격자 구조를 보여준다. 자유표면의 이동에 가장 적합한 H 형태의 격자를 채택하였다. 선체주위에서 격자들 간에 직교성(orthogonal)과 최소 격자 간격을 유지하려고 노력했다.

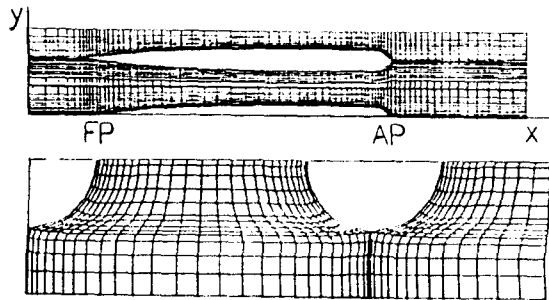


Fig. 1 Grid and Coordinate System

Fig. 2는 생성된 파고의 측면도를 나타낸 것이다. (a), (b)는 단동선에서 Froude 수 0.45와 0.95에서 계산한 것을 비교했고 (b), (c)는 단동선과 쌍동선의 것을 비교한 것이다. 파고와 위상(phase)을 비교해 볼 때 Froude 수의 영향은 상당했고 특히 선미 후방의 파고는 정량적인 비교는 불가능했지만 예인수조 시험시의 파고의 경향과 가시적으로 유사하였다.

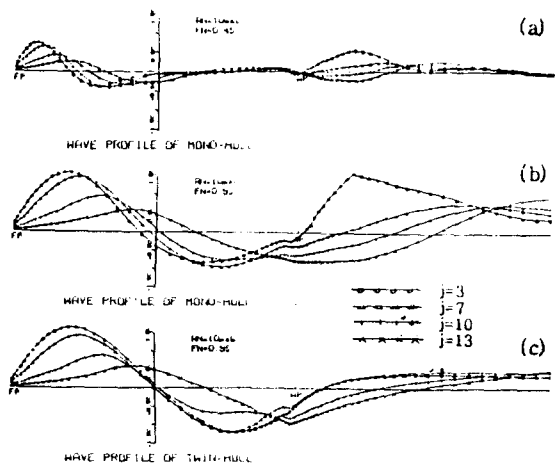


Fig. 2 Wave Profile around Hull Surface

Fig. 3은 깊이 방향으로 각 단면에서 속도벡터를 나타낸 것이다. 선미에서 velocity defect가 나타났고 충분한 갯수의 격자를 배치하지는 못했지만 비교적 만족스러운 속도벡터를 나타냈다.

Fig. 4는 종단면에서 자유수면과 속도 벡터를 나타낸 것이다. (h) 및 (i)에서 볼 수 있듯이 선미 후방에서 vortical motion이 나타났다.



Fig. 3 Velocity Vectors in Depthwise Direction

(a) Free Surface (b) $\xi/L = -0.0076$ (c) $\xi/L = -0.0118$

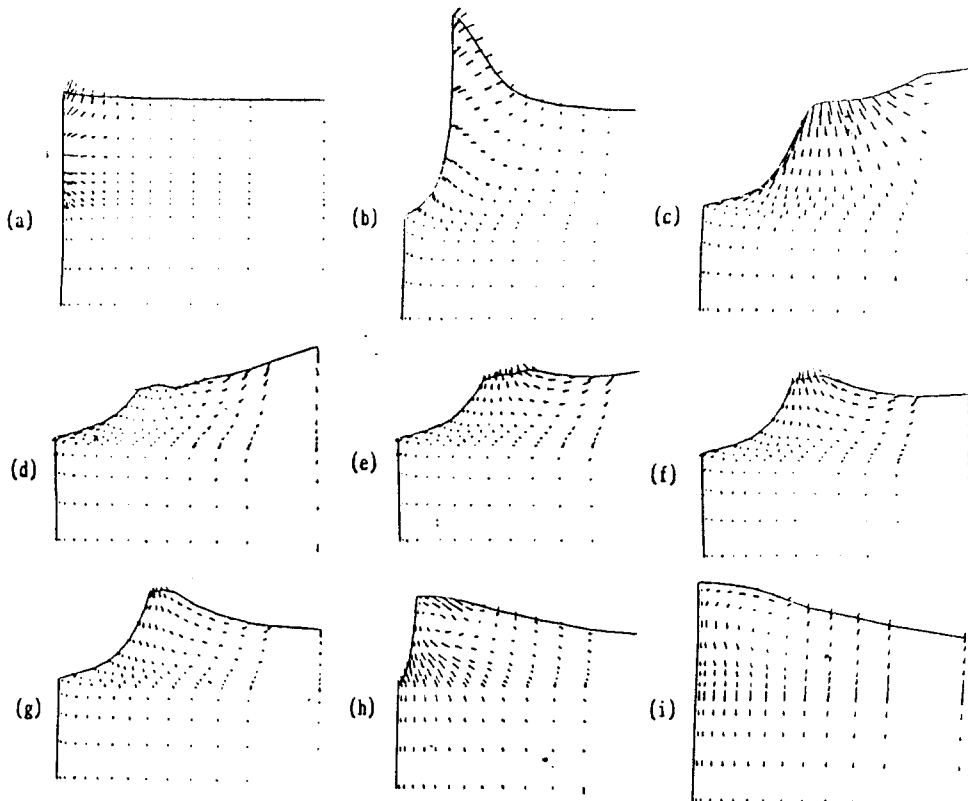


Fig. 4 Velocity Vectors for Demi Hull in Axial Direction

(a) $X/L=0.0$ (FP) (b) $X/L=0.35$ (c) 0.50 (d) 0.79 (e) 0.88 (f) 0.93 (g) 0.99 (h) 1.05 (i) 1.24

Fig. 5는 무차원 시간 흐름에 대한 단동선의 자유수면 분포도를 등고선으로 표시한 것이다. 계산 영역이 작기 때문에 반사(reflection) 파도가 선체로부터 먼 곳에 약간 보이고 있다.

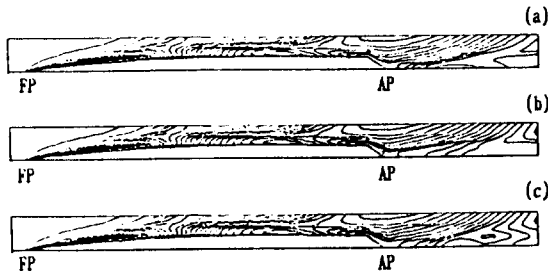


Fig. 5 Free Surface Contour for Demi Hull
(a) $t=2.0$ (b) 2.5 (c) 3.0

Fig. 6은 쌍동선에 대한 자유수면 등고선이다. 단동선의 계산 결과와 비교해 보면 계산 영역과 경계조건이 수치 계산 결과에 매우 중요한 인자로 작용함을 알 수 있다.



Fig. 6 Free Surface Contour for Twin Hull
at $t=2.5$

Fig. 7은 쌍동선의 속도 벡터이다. 단동선의 경우와 경계조건의 차이를 보여주고 있다. 쌍동선이 단동선의 속도 벡터와 거의 유사하게 나타난 것

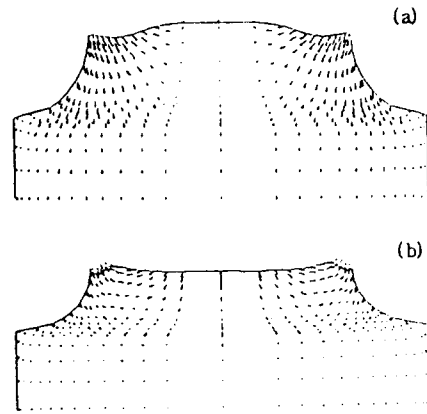


Fig. 7 Velocity Vectors for Twin Hull
(a) $X/L=0.55$ (b) 0.90

은 계산의 신뢰성(reliability)이 있다는 것을 의미한다.

Fig. 8은 쇄파에 대한 결과 해석이다. (a), (b), (c)는 Froude 수 0.45에 대한 M/U_s 를 그린 것이다. M/U_s 의 기울기가 음(negative)의 값으로 커질수록 깨짐(breaking)이 큰 것으로 예측되는데 그림 9와 같이 높은 속도, 즉 Froude 수 0.95에서는 대단히 불안정(unstable)하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 쌍동선의 쇄파 해석을 보여주고 있다. 단동선의 경우와 비교하면 선체주위에서 깨짐 현상이 쌍동선의 경우가 심각하게 나타남을 알 수 있다.

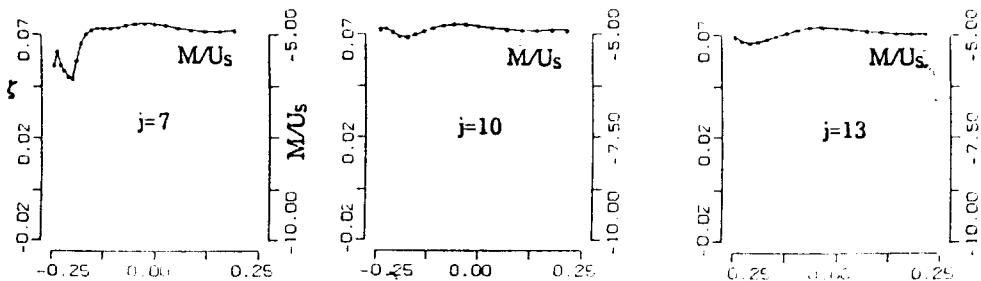


Fig. 8 Breaking Analysis for Demi Hull at $Fn=0.45$

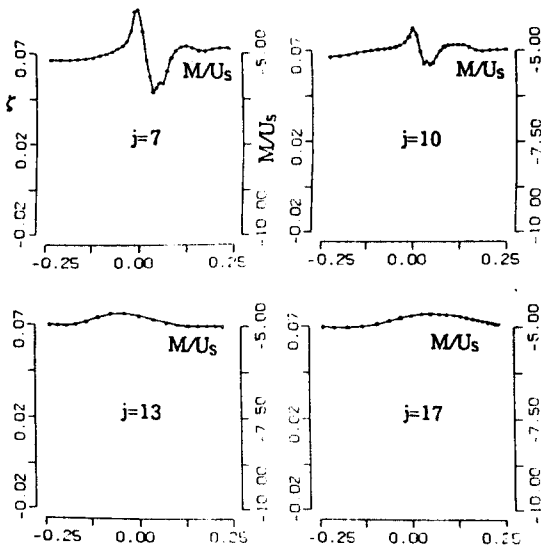


Fig. 9 Breaking Analysis for Demi Hull at $Fn=0.95$

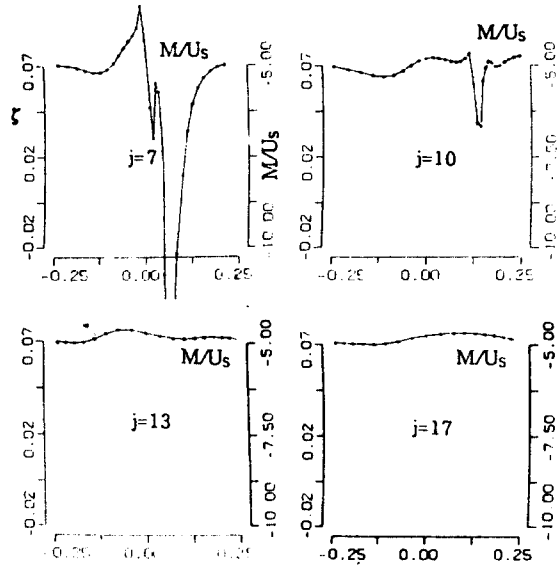


Fig. 10 Breaking Analysis for Twin Hull at $Fn=0.95$

4. 결 론

(1) 높은 Froude 수에서 일정 속도로 움직이는 쌍동선 주위에 유체 현상을 수치 계산을 통해 파악하고 단동선의 것과 비교 검토하였다. 선체주위의 자유표면파고 및 속도 벡터 등을 계산하여 쌍동선 주변의 유동장을 유체역학적으로 조사하였다.

(2) 계산 결과의 응용으로 자유표면의 불안정성을 수치적으로 규명하였다. 단동선과 쌍동선의 쇄파 현상을 분석한 결과 쌍동선의 경우가 선체 부근에서 더욱 불안정함을 보여주었다.

(3) 본 논문에서는 쇄파가 발생하는 위치 및 쇄파의 크고 작은 정도만을 예측하였으나 장래의 과제로서는 유동장 계산 과정에 3차원 쇄파 모형이 삽입되어야 하겠으나 난류와 함께 쇄파의 본질에 대한 물리적 현상의 규명도 이루어져야 하겠다.

참 고 문 헌

- (1) Duncan, J. H., "The Breaking and Non-Breaking Wave Resistance of a Two-Dimensional Hydrofoil", *Jour. of Fluid Mechanics*, Vol. 126, pp. 507-520.
- (2) Mori, K. and Shin, M., "Sub-Breaking Wave : Its Characteristics, Appearing Condition and Numerical Simulation", *Proc. of 17th Symp. on Naval Hydro.*, 1989.
- (3) Coleman, R. M., "Nonlinear Calculation of Breaking and Non-Breaking Waves Behind a Two-Dimensional Hydrofoil", *Proc. 16th Symp. on Naval Hydrodynamics*, pp. 51-62, 1986.
- (4) Mor, K. and Doi, Y., "Flow Characteristics of 2-Dimensional Sub-Breaking Wave, Turbulence Measurements and Flow Modeling",

Hemisphere Pub. Co., 1985.

- (5) Maruo, H. and Ikehata, M., "Some Discussions on the Free Surface Flow around the Bow", Proc. of 16th Symp. on Naval Hydro., 1986.
- (6) Grosenbaugh, M. A. and Yeung, R. W., "Non-Linear Bow Flow-An Experimental and Theoretical Investigation", Proc. of 17th Symp. on Naval Hydro., 1988.
- (7) Dagan, G. and Tulin, M. P., "Two Dimensional Free-Surface Gravity Flow Past Blunt Bodies", Jour. Fluid Mech. Vol. 51, Part 3, 1972.
- (8) Tanaka, M., Dold, J. W. and Peregrine, D. H., "Instability and Breaking of a Solitary Wave", Jour. Fluid Mech, Vol. 185, 1987.
- (9) Kwag, S. H. and Mori, K., "Viscous Interaction of Stern Wave and the Wave Breaking", Hull Form '92, Hull Form Design and Flow Phenomena, pp. 81-92, 1992.
- (10) Mori, K., "Sub-Breaking Waves and Critical Condition for Their Appearance", Jour. of Soc. Nav. Arch. of Japan, Vol. 159, pp. 1-8, 1986.