
 論 文

大韓造船學會論文集
 第 35 卷 第 3 號 1998 年 8 月
 Journal of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 35, No. 3, August 1998

고차경계요소법을 이용한 수중익에 대한 3차원 조파문제 해석

박일룡*, 전호환**, 김성환*, 하동대**

Analysis of Three-dimensional Water Waves Created by a Hydrofoil Using a Higher-Order Boundary Element Method

by

Il-Ryong Park*, Ho-Hwan Chun**, Sung-Hwan Kim* and Dong-Dai Ha**

요 약

본 논문에서는 9절점 라그랑지안(Lagrangian) 곡면요소를 바탕으로 한 고차경계요소법(Higher-order Boundary Element Method)을 사용하여 자유수면 아래에서 일정한 속도로 전진하는 3차원 수중익에 대한 유체역학적 특성을 연구하였다. 수치계산법에 있어서 자유수면의 계산결과를 개선하기 위해 겹2차 스플라인(bi-quadratic spline)기법을 도입하였다. 수치기법의 검증에서 잠수된 구와 구형체에 대한 해석해와 수치계산 결과가 잘 일치함을 볼 수 있었다. 수중익 문제에 대한 적용성과 그 타당성을 검증하기 위해서 가로-세로비(aspect ratio; A.R.)가 4인 NACA641A412 단면을 가진 3차원 수중익 주위 유동을 해석하였다. 속도가 일정할 때 받음각(angle of attack)과 잠수깊이 변화에 따른 Wadlin et al.[28]의 양력과 항력 계측 실험결과와 비교하였으며, 각각의 경우에 대해 본 수치계산 결과들이 실험결과와 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있었다. 가로-세로비 4의 NACA0012단면을 가지는 수중익에 대한 계산결과에서는 수중익에 작용하는 양력과 항력에 미치는 자유수면의 영향을 고찰하였으며, 서로 다른 속도와 잠수깊이에서 수중익에 의해 발생하는 자유수면의 변위변화를 고찰하였다.

Abstract

In the present paper, the hydrodynamic characteristics of three dimensional hydrofoils moving with a constant speed below the free surface using a higher-order boundary element method based on 9-node Lagrangian curvilinear elements are investigated. A bi-quadratic

발 표 : 1997년도 대한조선학회 춘계연구발표회('97. 4. 25.)

접수일자 : 1998년 3월 5일. 재접수일자 : 1998년 6월 30일

*학생회원, 부산대학교 조선해양공학과 대학원

**정회원, 부산대학교 조선해양공학과 (기계기술연구소)

spline scheme is employed to improve the numerical results on the free surface. To validate the present scheme, the calculated results are compared with the analytic solutions for a submerged sphere and a spheroid showing a good agreement. For the validation of the hydrofoil study, the computed lift and drag of a hydrofoil having NACA64₁A412 section with aspect ratio(A.R.) of 4 are compared with the experimental data by Wadlin et al.[28]. The comparison covers a number of variations of angle of attack and submergence depth. Then, using an A.R. 4 hydrofoil with NACA0012 section, the free surface effects on the lift and drag are investigated and these are compared with the previous results. The wave elevations and patterns created by the aforementioned submerged bodies are also investigated with Froude numbers and submergences.

1. 서론

선박의 동체에 수중익을 부착하여 속도성능을 향상시키려는 연구는 일찍이 1898년 이탈리아의 Forlanini 이후 최근에 이르기까지 실험과 이론적 연구가 계속되어 오고 있다. 수중익 부착효과는 충분히 가속된 배의 선수부위 또는 전체를 부상시켜 선체로부터 발생하는 파(waves)를 감소시켜 저항을 줄여 줌으로써, 같은 엔진동력에서 더 빠른 속도를 낼 수 있는 것이다. 그러나 속도가 증가함에 따라 수중익 주위의 유동특성은 복잡한 물리적 현상을 동반하기 때문에 이에 대한 많은 이해가 필요하다.

공기중의 날개와 수중익의 다른 특징은 점성 및 수중익 형상의 영향에 더하여 자유수면의 비선형 특성, 캐비테이션 발생 등의 영향을 지배적으로 받는다. 이러한 수중익의 실험적 연구는 Wladimirow[1], Land[2], Benson & Land[3], Ward & Land[4] 등에 의해 NACA 예인수조에서 수행되었다. 1950년 Sottorf[5]의 실험연구에서는 양력과 양항비는 증가시키면서 캐비테이션 발생을 줄이는 수중익 단면의 형상과 유체역학적 특징을 밝힌 바 있다. 2차원 수중익에 대한 실험적 연구는 Duncan[6], Parkin et al.[7] 등이 쇄파발생을 포함한 자유수면 변위측정과 수중익 표면에서의 압력측정을 각각 수행하였다. 최근에는 Min & Lee[8]에 의해서 성능이 우수한 수중익 단면개발을 목적으로 2차원 수중익에 대한 체계적이고 광범위한 실험적 연구가 수행되었으며, 새로운 수중익 단면설계에 대한 연구를 발표하였다. 이론적인

연구로서, 자유수면에 대해 선형화된 이론을 적용한 Giesing & Smith[9], Hough & Moran[10] 등의 연구가 있다. 자유수면의 비선형성이 2차원 수중익에 미치는 영향은 Salvesen[11], Park & Chun[12], Lee[13] 등의 연구가 있으며, 자유수면의 점성은 무시하고 수중익 주위의 점성을 고려한 연구는 Kim & Van[14], Park et al.[15] 등이 있다.

3차원 수중익에 대한 연구는 Wu[16], Breslin[17], Nishiyama[18], Bai & Lee[19], Nakatake et al.[20] 등이 수행한 바 있다. 이들의 연구결과에 의하면 3차원 수중익에 대한 유체력 특성 추정에 있어서 개선되어야 할 여지가 많음을 보여 주고 있다.

본 논문에서는 선형화된 자유수면 조건을 사용하고, 고차경계요소법(Higher-Order Boundary Element Method)을 일정 속도로 전진하는 3차원 수중익 주위 유동해석에 적용하였다. 여기서 유체의 점성영향이나 수중익에서 일어나는 캐비테이션은 무시하였다. 랭킨소오스(Rankine source)를 그린함수로 사용하여 자유수면 조파문제를 해석하였으며, Scavounous & Nakos[24]의 겹2차 스플라인 법을 9절점 라그랑지안(Lagrangian)곡면요소에 확장 적용하여 자유수면에서의 해의 정도와 수렴성을 높였다. Hong & Choi[21]은 이 방법을 자유수면에 대해서 8절점 곡면요소로 확장하여 정상 및 비정상 Neumann-Kelvin문제를 해석한 바 있다.

수치계산의 결과에서는 자유수면 아래에서 전진하는 구(sphere)에 대한 Bessho[26]의 선형 해석해와 물수 구형체(spheroid)에 대한 Doctors &

Becker[27]의 수렴해를 수치계산 결과와 비교하여 본 수치계산방법의 타당성과 정확성을 검증하였다.

3차원 수중익 주위 유동해석은 NACA641A412 단면을 가진 가로-세로비가 4인 사각형 수중익의 잠수깊이와 받음각 변화에 따른 양력과 항력변화를 Wadlin et al.[28]의 실험결과와 비교하였다. 또한 NACA0012의 단면을 사용하고 가로-세로비가 4인 사각형 수중익을 사용하여 잠수깊이와 속도변화에 따라 자유수면이 수중익의 유체력 변화에 미치는 영향을 살펴보고, 또한 이러한 조건들 아래서 수중익에 의해 생성된 자유수면 변위에 대한 고찰을 하였다.

2. 문제의 정식화

교란되지 않은 자유수면 경계면에서 일정한 깊이(h)에 잠수되어 고정된 수중익 주위로 U_∞ 크기의 균일흐름이 x 축의 양의 방향으로 평행하게 유입될 때, 수중익 주위의 정상상태 유동장 해석의 정식화는 다음과 같다. 좌표계는 Fig.1과 같이 수직 상방향을 z 축의 양으로 하는 자유수면 상에 고정된 우수 직교좌표계이다. 문제의 해석을 위해 자유수면에서의 표면장력은 무시하고 수중익 주위의 유체를 비점성 및, 비압축성, 유동은 비회전성으로 가정한다. 이러한 가정과 전체 속도포텐셜 $\Phi(x, y, z)$ 를 도입하면 유체장의 지배방정식은 아래와 같은 라플라스(Laplace)방정식이 된다.

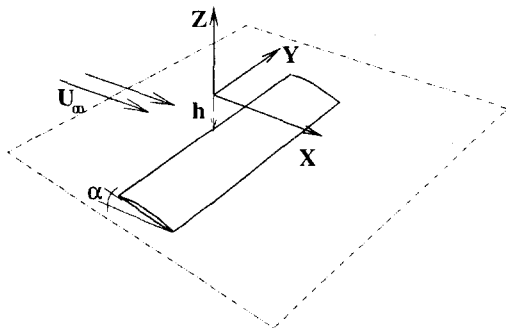


Fig.1 Coordinate system

$$\nabla^2 \Phi = 0, \quad \text{in the fluid domain} \quad (1)$$

전체 속도포텐셜 $\Phi(x, y, z)$ 를 유입유동에 의한 속도포텐셜과 물체의 존재에 의한 교란을 나타내는 속도포텐셜 $\phi(x, y, z)$ 를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi(x, y, z) = U_\infty x + \phi(x, y, z) \quad (2)$$

각 경계면에서 만족되어야 할 경계조건은 다음과 같다.

-자유 수면의 선형화 경계 조건 :

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{U_\infty^2}{g} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = 0, \quad \text{on } z = 0 \quad (3)$$

-물체 경계 조건 :

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = -U_\infty n_x, \quad \text{on } S_B \text{ (물체경계면)} \quad (4)$$

- 무한 원방에서 경계 조건 :

$$\nabla \phi \rightarrow 0 \quad (5)$$

- 수중익 후연(trailing edge)의 Kutta 조건 :

$$|\nabla \phi| < \infty \quad (6)$$

-후연 반류면의 가정 :

$$\begin{aligned} \vec{n} \cdot (\vec{V}_U - \vec{V}_L) &= 0 \\ p_U - p_L &= 0 \\ &\text{on } S_H \text{ (반류면)} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, g 는 중력가속도, \vec{n} 는 유체장 내부를 향하는 법선벡터이다. 아래첨자 U 와 L 은 각각 반류면의 상면과 하면을 나타내고 \vec{V} 와 p 는 각각 반류면 상에서의 속도와 압력을 나타낸다.

적분방정식

이상과 같은 Neuman-Kelvin 경계치 문제의 해가 되는 속도포텐셜 ϕ 는 유체영역의 모든 경계에 대해 그린(Green)정리를 적용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & C(\vec{x})\phi + \\
 & \int \int_{S_B+S_F} \phi \frac{\partial G}{\partial n} ds + \int \int_{S_W} \Delta \phi \frac{\partial G}{\partial n} ds \\
 & + \frac{U_\infty^2}{g} \int \int_{S_F} \phi_{xx} G ds = \int \int_{S_B} \frac{\partial \phi}{\partial n} G ds
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

여기서, S_B, S_F, S_F 는 각각 물체경계면, 자유수면과 반류면을 나타낸다.

$\Delta \phi_{II}$; 반류면의 포텐셜 차이

$$G ; \text{그린함수} = \frac{1}{4\pi r}$$

$$r = |\vec{x} - \vec{\xi}|$$

\vec{x} ; 계산점의 위치벡터

$\vec{\xi}$; 특이점의 위치벡터

$C(\vec{x})$; 고체각(solid angle)

3. 수치계산법

일반적으로 특이점을 분포하여 물체주위 유동장을 해석할 때 저차 패널법(Low-order Panel Method)이 유용하게 사용되어져 왔다. 이러한 저차 패널법과는 달리 물체경계의 형상을 2차이상의 고차 곡면요소로 표현하고 각 곡면요소 내에서 물리량의 변화를 동일한 차수를 갖는 고차경계요소법을 사용할 경우, 적분방정식의 계산의 정도와 해의 수렴성을 높일 수 있다. 본 논문에서는 물체 표면의 곡면요소와 물리량의 변화를 9절점 라그랑지안(Lagrangian)형상함수를 사용하여 계산하였다. 자유수면에서는 기하학적인 형상은 9절점 라그랑지안(Lagrangian)요소로 나타내고, 각 곡면요소내의 물리량의 변화는 이웃요소와 연속성을 갖는 겹 2차 스플라인(spline)함수를 도입하여 나타내었다. 자유수면의 이와 같은 수치계산법은 Slavounos & Nakos[24]에 의해 평면패널에 적용한 것이며, Hong & Choi[21]은 8절점 경계요소로 확장하여 정상 및 비정상 Neumann-Kelvin문제에 적용하였다. 자유수면의 속도포텐셜의 변화를 스플라인 함

수로 나타낸 것은 수치감쇠를 없애고, 수치분산성을 개선하여 해의 유일성과 수렴성을 개선하기 위한 목적이며, Slavounos & Nakos[24]의 논문에서 그들이 사용한 상류방사조건과 함께 기존 방법들과의 비교 분석에서 이 방법의 우수성을 보인바 있다.

Boo[22]는 자유수면을 16절점 3차(cubic) 라그랑지안(Lagrangian)형상함수를 사용하여 곡면요소와 물리량의 변화를 나타내었다. 본 논문에는 그 결과를 보이지는 않았으나, 3차 라그랑지안 함수는 겹2차 스플라인 함수보다 차수는 높지만 요소간의 불연속성 때문에 해의 수렴성이 떨어지며, 특히 잠수깊이가 낮은 잠수동체 문제나 자유수면을 관통하는 형상을 가진 선박 주위의 정상상태 조파문제해석에서 이러한 특성이 있는 것을 본 연구의 수행과정에서 알 수 있었다.

9절점 라그랑지안(Lagrangian)경계요소법

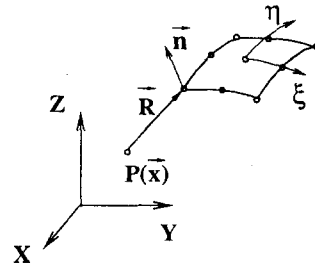


Fig.2 Local coordinate system

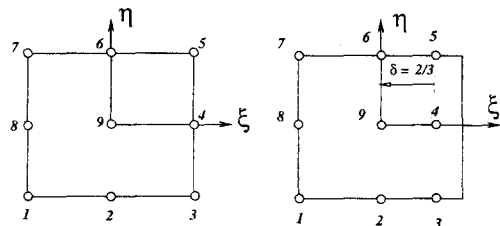


Fig.3 General 9-node Lagrangian element and discontinuous element

Fig.2는 경계요소에 대한 국부 좌표계를 나타내고 있으며 Fig.3은 일반적인 9절점 경계요소의 모습과 모서리 등에서 두 가지 경계조건이 중첩되는 경우 특이점 계산을 피하기 위해 사용되는 불연속 경계요소(discontinuous element)를 보여주고 있다. 여기에 대한 자세한 내용은 Brebbia et al.[29]에 소개되어 있다. 물체경계면에서 좌표와 물리량의 변화는 각각 아래와 같이 9절점 경계요소법을 사용하여 근사 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{x}(\xi, \eta) &= \sum_j^9 N_j(\xi, \eta) \vec{x}_j, \\ \phi(\xi, \eta) &= \sum_j^9 N_j(\xi, \eta) \phi_j, \\ \frac{\partial \phi}{\partial n}(\xi, \eta) &= \sum_j^9 N_j(\xi, \eta) \frac{\partial \phi}{\partial n}, \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, $N_j(\xi, \eta)$ 는 라그랑지안(Lagrangian)형 상함수(shape function)를 나타낸다.

겹2차 스플라인(spline)법

자유수면 경계면은 라그랑지안(Lagrangian)형상 함수를 사용하고 물리량의 변화는 다음과 같이 1차원 2차 스플라인함수를 사용한다.

$$b_s(x) = \begin{cases} \frac{1}{2\Delta h_x^2}(x + \frac{3}{2}\Delta h_x)^2, & -\frac{3}{2}\Delta h_x \leq x \leq -\frac{1}{2}\Delta h_x \\ \frac{1}{\Delta h_x^2}(-x^2 + \frac{3}{4}\Delta h_x^2), & -\frac{1}{2}\Delta h_x \leq x \leq \frac{1}{2}\Delta h_x \\ \frac{1}{2\Delta h_x^2}(x - \frac{3}{2}\Delta h_x)^2, & \frac{1}{2}\Delta h_x \leq x \leq \frac{3}{2}\Delta h_x \end{cases} \quad (10)$$

여기서 Δh_x 는 요소의 크기를 나타낸다.

식(10)을 사용한 1차원 등간격 요소분할에 대해서 주위 인접한 요소의 영향을 고려한 정규요소 구간 $-1 \leq \xi \leq 1$ 로 사상된 형태는 다음과 같다[21].

$$b_s(\xi) = \begin{cases} b_{s,j-1}(\xi) = \frac{1}{8}(\xi+1)^2 \\ b_{s,j}(\xi) = \frac{1}{4}(-\xi^2+3), & -1 \leq \xi \leq 1 \\ b_{s,j+1}(\xi) = \frac{1}{8}(-\xi+1)^2 \end{cases} \quad (11)$$

위에서 전개한 식(11)의 1차원 2차 스플라인 함수를 사용하여 정규요소 평면에 대한 자유수면의 속도포텐셜은 다음과 같이 각 방향의 1차원 2차 스플라인 함수의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$\phi(\vec{x}) = \sum_{k=1}^{NF} B_s^k(\vec{x}) \varphi_k \quad (12)$$

$$\text{여기서, } \sum_{k=1}^{NF} B_s^k(\vec{x}) = \sum_i \sum_j b_s^i(x) b_s^j(y)$$

$$i = k - NFY, \quad k, \quad k + NFY$$

$$j = k - 1, \quad k, \quad k + 1$$

φ_k 는 k 요소 도심(centroid)에서의 가중치를 나타내고, NF 와 NFY 는 자유수면의 분할 요소 수와 y 방향의 요소 수를 나타낸다.

앞의 전개된 내용을 사용하여 적분방정식(8)의 이산화 형태는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} C_i \phi_i + \sum_{\epsilon} \sum_j^9 \int \int_{S_n^{\epsilon}} \frac{\partial G}{\partial n} N_j J d\xi d\eta \phi_j \\ + \sum_{\epsilon} \sum_k^9 \sum_j^9 \int \int_{S_f^{\epsilon}} \frac{\partial G}{\partial n} B_s^k J d\xi d\eta \varphi_k \\ + \sum_{\epsilon} \sum_j^9 \int \int_{S_u^{\epsilon}} \frac{\partial G}{\partial n} N_j J d\xi d\eta \Delta \phi_w \\ - \sum_{\epsilon} \sum_k^9 \sum_j^9 \int \int_{S_f^{\epsilon}} \frac{U_{\infty}^2}{g} B_s^k \xi \xi G J d\xi d\eta \varphi_k \\ = - \sum_{\epsilon} \sum_j^9 \int \int_{S_b^{\epsilon}} G N_j J d\xi d\eta \phi_n, \end{aligned} \quad (13)$$

여기서, j 는 Jacobian을 나타내고 NB 는 수중익표면의 요소분할 수, NW 는 수중익 후연의 요소분할 수를 나타낸다. 그리고 윗첨자 ϵ 는 한 개의 요소를 나타낸다. 각 경계요소에서 적분은 수치적(Gauss 구적법)으로 수행하였으며, 특히 적분은 비선형 좌표변환을 사용하여 특이점 근방에 가우스점(Gauss points)을 집중시켜 계산하는 Telles[23]의 방법을 따랐다. 고체각 C_i 의 계산은 Brebbia et al.[29]의 방법을 사용하였다.

방사조건

Sclavounos and Nakos [24]는 상류 계산영역 바깥 경계면에 다음의 조건을 부과하여 파의 방사

조건을 만족하도록 하였다.

$$\phi_x = 0, \quad \phi_{xx} = 0 \quad (14)$$

식(14)를 상류 계산영역 바깥 경계면에 적용하면 $\phi_{m-1} = \phi_m = \phi_{m+1}$ 의 조건을 사용할 수 있다. 여기서 m 은 상류 계산영역 바깥 경계면에서 하류방향으로 이웃한 3개 요소의 위치를 나타낸다. 자유수면 횡 방향의 계산영역 바깥 경계면에서는 속도포텐셜의 2차 미분값이 영이라는 조건을 부과하였다.

Kutta 조건

서로 다른 물리량을 가지는 세 점이 만나는 수중익 후연에서의 계산을 피하기 위해 불연속 경계요소를 사용하였고, Kutta조건은 후연에서 약간 떨어진 수중익의 아래 점과 위 점에 적용하였다. 수중익의 반류면의 형상변형은 무시하였으며, 균일 흐름에 평행하게 하류방향으로 놓여 있는 것으로 가정하였다. 3차원날개 및 프로펠러 문제에서 압력 Kutta조건을 사용하여 해의 유일성 확보와 정도를 향상시켜 왔으며, 본 논문에서는 Lee[25]가 제안한 압력 Kutta조건식을 계산에 적용하였다.

4. 유체력 계산

수중익의 항력계수와 양력계수 계산은 다음과 같다. 계산된 항력은 유기항력(induced drag)과 조파항력 또는 저항(wave drag or resistance)을 모두 포함한 값이다.

$$F_x = \int \int_{S_b} p n_x ds \quad (15)$$

$$F_z = \int \int_{S_b} p n_z ds \quad (16)$$

$$p = -\frac{\rho}{2} ((\nabla \phi)^2 + 2U_\infty \phi_x) \quad (17)$$

$$C_W = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 S} \quad (18)$$

$$C_L = \frac{F_z}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 S} \quad (19)$$

여기서, ρ 는 유체의 밀도를 나타내고, $S =$ 수중익의 코드길이 \times 스패ن길이를 나타낸다.

5. 계산결과 및 고찰

Fig.4는 자유수면 아래에서 구(sphere)가 전진할 때 각 속도 영역에서 계산된 조파저항계수와 양력계수를 Bessho[26]의 해석해와 비교한 것이다. 구의 잠수깊이(h)는 구의 반경(a)의 두 배에 해당하고, 자유수면의 계산영역은 $0 \leq y/a \leq 7, -4 \leq x/a \leq 10$ 으로 하였으며, x 방향 42개 y 방향 18개의 요소로 분할하였다. 계산에서 구의 표면은 각각 2차곡면요소 12개와 30개로 분할하였다. 계산 결과들은 저속영역과 고속영역 모두 해석해와 잘 일치하는 것을 보여주고 있으며, 구의 표면분할을 12개의 비교적 적은 수를 사용하여도 해석해에 잘 수렴함을 보여준다.

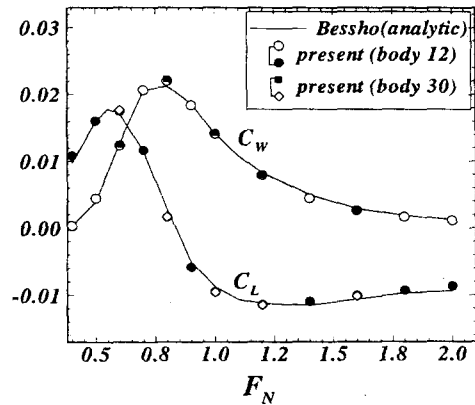


Fig.4 Wave resistance & lift coefficient of a sphere compared with analytic solution ($F_N = U_\infty / \sqrt{2 a g}, h/a=2$)

Fig.5는 잠수된 구형체 (폭-길이비 $D/L = 0.2$, 잠수깊이-길이비 $h/L = 0.16$)에 대해 계산한 결과와 Doctors & Beck[27]의 수렴해와 비교한 것으로서 구의 경우와 마찬가지로 적은 수의 요소(12

곡면 요소)를 사용하여도 해의 정도가 높은 것을 보여주고 있다.

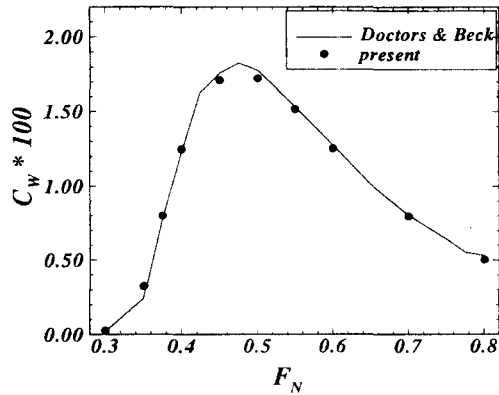


Fig.5 Wave resistance coefficient vs Froude number ($= U_\infty/\sqrt{g L}$) of a submerged spheroid($h/L = 0.16$)

Fig.6은 Fig5의 계산에 사용된 잠수 구형체가 $F_N (= U_\infty/\sqrt{g L}) = 0.6, 0.8$ 로 항주할 때 발생한 자유수면 변위를 등고선으로 나타낸 그림이다. 각각 계산영역 바깥 경계면에서 파의 반사 없이 방사조건이 잘 만족되고 있음을 보여준다.

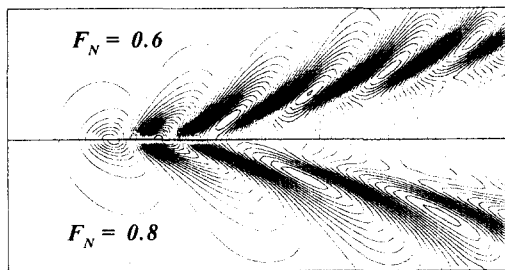


Fig.6 Wave contours due to a submerged spheroid($F_N=0.6, 0.8, h/L = 0.16$)

Fig.7은 무한 유체장에서 전진하는 NACA0012 단면을 가진 가로-세로비가 20인 사각형 수중익에 대한 수중익표면의 압력분포를 계산한 결과이다. 수중익의 코드방향과 스펠방향으로 각각 24개, 14

개의 곡면요소로 분할하여 계산을 하였다. 가로-세로비가 클 경우 중앙단면에서는 거의 2차원유동 특성을 보일 것으로 예상되므로, 받음각 5° 에서 2차원과 3차원 수중익의 중앙단면에서의 압력계수를 비교하였으며, 2차원의 결과(패널법; 패널수 120)와 거의 일치하고 있음을 보여주고 있다. 양력 문제에 고차경계요소법이 효율적으로 적용될 수 있음을 보여주고 있다.

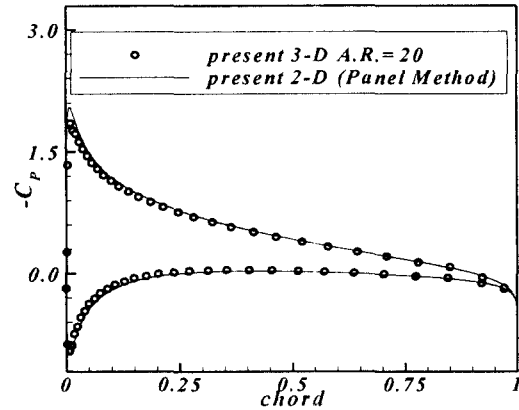
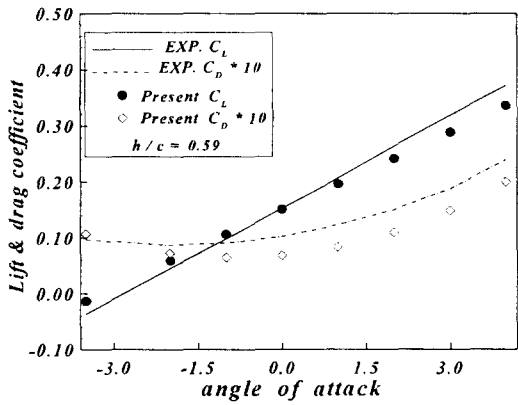


Fig.7 Pressure coefficient on the mid-span compared with 2-D panel method result in the unbounded flow (NACA0012, $\alpha=5^\circ$)

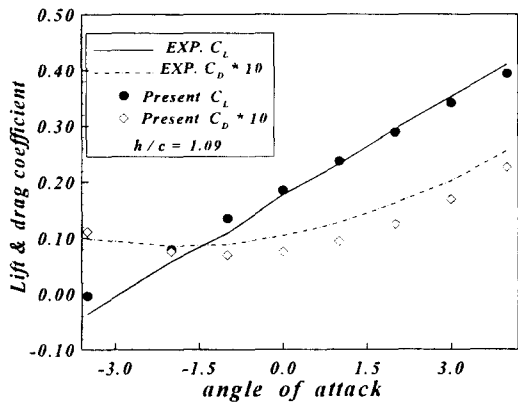
Fig.8은 잠수 깊이 $h/c = 0.59, 1.09$ (c ; 수중익 코드 길이)에서 NACA641A412단면을 가진 가로-세로비가 4인 수중익이 $F_N = 3.238$ 의 속도로 전진할 때 양력과 항력의 변화를 Wadlin et al.[28]의 실험과 비교하였다. 계산에 사용된 자유수면의 영역은 $0 \leq y/c \leq 6.8, -3.5 \leq x/c \leq 12.5$ 이고 수중익과 자유수면의 요소 수는 각각 120개, 600개이다. 양력계수의 크기는 큰 음의 받음각의 경우를 제외하고 비교적 실험과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 항력계수 비교에서 실험값은 총 항력계수이므로 비선형성을 고려하고 점성에 대한 마찰저항계수를 더해두면 두 값은 서로 비슷한 결과를 줄 것으로 생각된다.

본 방법에 의한 수치해석 결과의 타당성을 보다 더 검증하기 위해 수중익의 잠수깊이와 속도변화

에 따른 양력 및 항력의 변화를 조사하였다. 계산에 사용된 수중익 단면은 Fig.7에서 사용되었던 NACA0012단면을 가지는 가로-세로비 4인 사각형 수중익이며 받음각은 모두 6°로 고정하였다 (이후 계산결과는 모두 여기서 언급한 수중익에 대한 것이다).



8-a)



8-b)

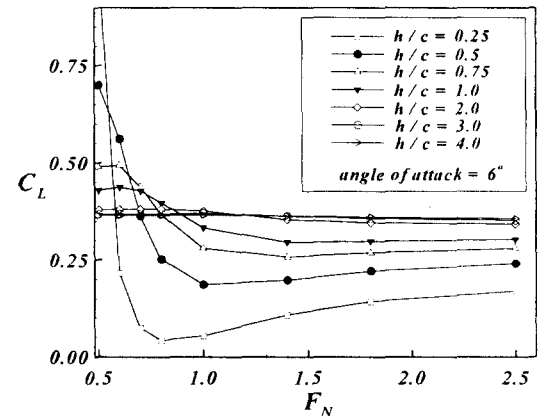
Fig.8 Comparison of experimental and numerical data ($F_N = 3.238$, NACA64₁A412)

Fig.9와 Fig.10은 자유수면 아래에서 받음각 6°로 전진하는 가로-세로비가 4인 NACA0012 단면 사각형 수중익의 잠수깊이와 속도에 따른 양력과 항력의 변화를 나타내고 있다. 자유수면에서의

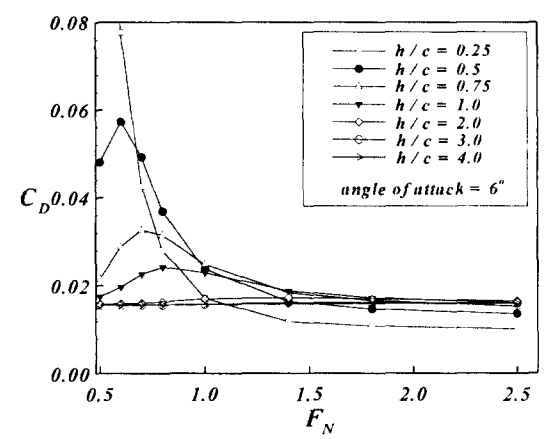
계산영역과 경계요소의 분할 수는 Fig.8의 NACA64₁A412단면의 계산조건과 동일하다.

Fig.9는 잠수깊이 $h/c = 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 2.0, 3.0$ and 4.0 에서 속도변화에 따른 양력계수와 항력계수의 변화를 보여주고 있다. 속도가 증가함에 따라 속도에 따른 양력계수와 항력계수 변화크기가 작고 두 계수 모두 각각의 잠수깊이에서 일정한 값으로 수렴하는 해의 거동을 볼 수 있다.

고속영역에서는 잠수깊이가 계속 증가하면 이러한 값들은 각각의 잠수깊이에 대해서 계속 증가하



9-a)



9-b)

Fig.9 Effect of Froude number on hydrofoil lift & drag coefficient (NACA0012, A.R. = 4)

여, 일정한 잠수깊이 이상에서는 무한 잠수깊이의 값으로 수렴됨을 볼 수 있다. 일반적으로 잠수깊이가 얕아지면 조파저항은 증가하는 경향이 있고, 유기항력은 감소하는 경향이 있으며[16], 고속영역에서는 두 값을 더한 항력은 수중익이 자유수면에 가까이 갈수록 작아지는 거동을 보이고 있다. 속도가 감소함에 따라서는 자유수면의 영향으로 양력계수가 감소하여 최저 점에 이르고 (그 값의 크기는 잠수깊이가 작을 수록 커짐) 더욱 속도가 감소하면 양력계수는 다시 증가하다 감소하여 $F_N = 0$ 의 값으로 수렴하는 경향을 볼 수 있다.

잠수깊이가 증가하면 자유수면의 영향은 점점 감소하여 본 계산 결과에 의하면 $h/c = 2.0$ 이상의 깊이에서는 속도에 따른 양력계수와 항력계수의 변화가 미소함을 볼 수 있다.

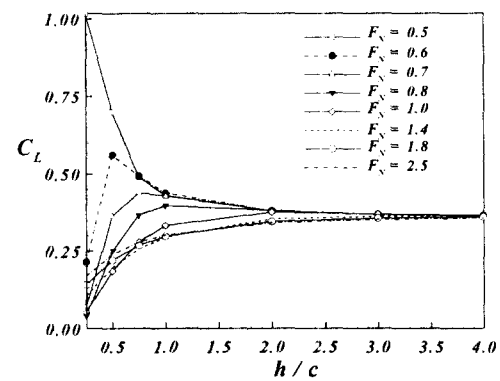
이러한 결과들은 Hough and Moran[10]의 2차원 수중익에 대한 해석결과와 비슷함을 보여주고 있다. 잠수깊이와 속도에 따른 양력의 변화는 Hough and Moran이 지적하였듯이 일정속도에서 잠수깊이 변화에 따른 손실 혹은 이득(depth loss or gain)과 일정깊이에서 속도에 의한 손실 혹은 이득(speed loss or gain)으로 나누어 생각할 수 있다. 전반적으로 잠수깊이가 낮을수록 양력과 항력이 감소하는 비율이 크며, 고속으로 갈수록 모든 잠수깊이에서 양력계수의 회복이 점차 이루어지고 있는 것을 볼 수 있다. 수중익이 부상하여 잠수깊이가 낮아지면 양력의 감소로 부상력이 떨어질 수 있으나, 일정속도 이상의 고속으로 전진하면 양력이 회복 단계에 있으므로 잠수깊이에 따른 양력감소 손실을 어느 정도 회복할 수 있음을 알 수 있다.

Fig.10은 각각의 고정된 속도에서 잠수깊이 변화에 대해 양력계수와 항력계수를 비교하였다. $F_N = 1.0$ 이하의 저속에서는 잠수깊이에 따른 양력과 항력계수의 변화가 크지만, $F_N = 1.0$ 이상의 고속영역에서는 변화가 대체로 작은 것을 볼 수 있다.

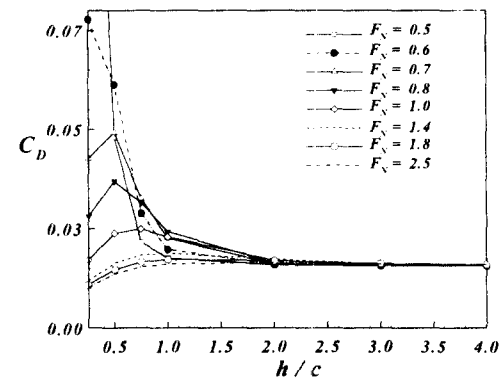
Fig.11은 $F_N = 1.8$ 그리고 잠수깊이 $h/c = 1.0$ 에 대한 계산결과에서 수중익의 스펠방향으로 압

력계수 변화를 나타낸다. 여기서 자유수면을 고려한 경우도 적용한 Kutta조건이 잘 만족하고 있음을 보여준다.

Fig.12는 $F_N = 0.7, 1.4$ 에서 $h/c = 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ 잠수깊이에 따른 수중익의 중앙단면($y = 0$)에서의 압력계수를 보여주고 있다. $F_N = 0.7$ 에서는 수중익의 압력면과 양력면 모두 잠수깊이에 따른 변화가 심한 것을 보여주고 있으며, $F_N = 1.4$ 에서는 압력면의 변화는 미소하고 자유수면과 맞대어 있는 양력면에서의 압력이 잠수깊이에 따라 변화가 큰 것을 볼 수 있다.



10-a)



10-b)

Fig.10 Effect of submergence depth on lift & drag coefficient (NACA0012, A.R.=4, $\alpha = 6^\circ$)

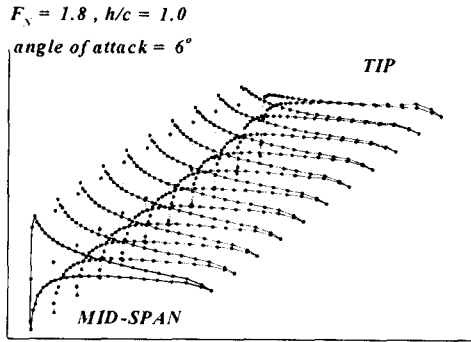
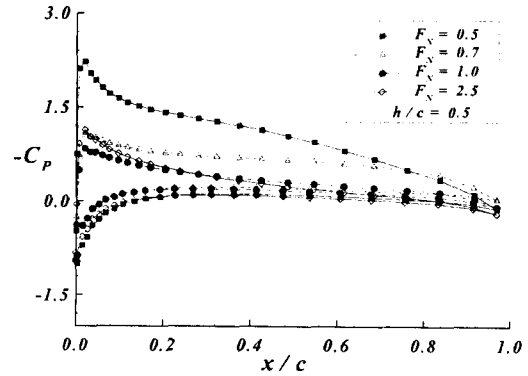
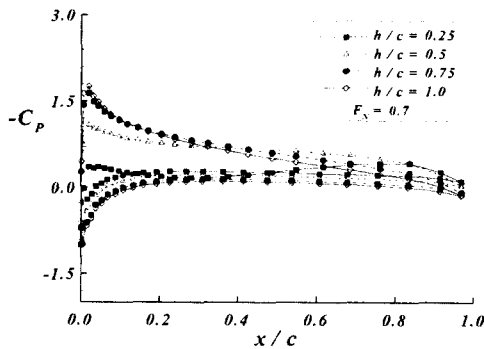


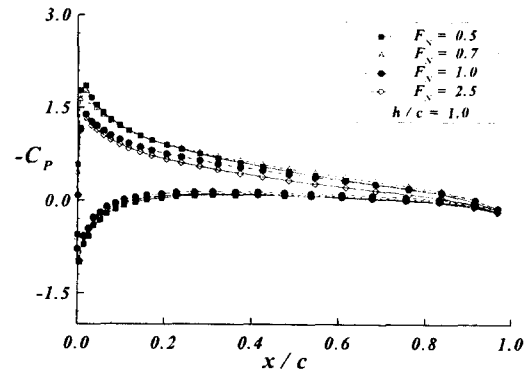
Fig.11 Pressure coefficient variation along spanwise section(NACA0012)



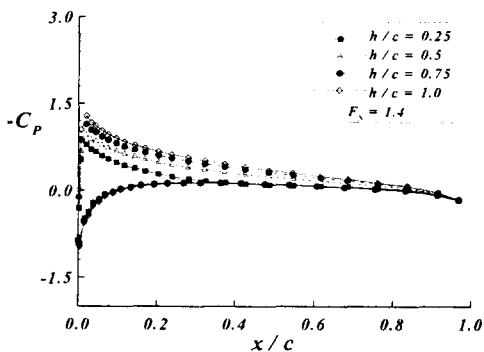
13-a)



12-a)



13-b)



12-b)

Fig.12 Effect of Froude Number on pressure coefficient at mid-span (NACA0012, $\alpha=6^\circ$)

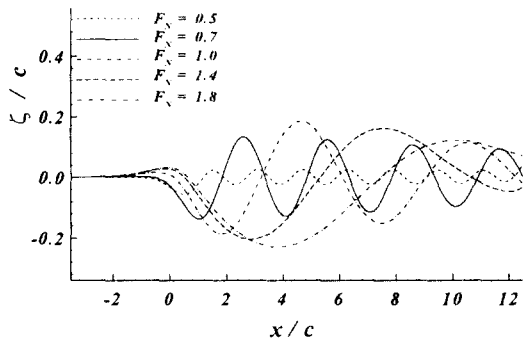
Fig.13 Effect of submergence depth on pressure coefficient at mid-span (NACA0012, A.R.=4, $\alpha=6^\circ$)

Fig.13은 $h/c = 0.5, 1.0$ 으로 각각 고정하고 $F_N = 0.5, 0.7, 1.0, 2.5$ 로 변할 때 수중익의 중앙 단면($y = 0$)에서의 압력계수를 보여주고 있다. 앞에서 언급한 잠수깊이와 속도와의 관계를 이 그림에서도 볼 수 있다.

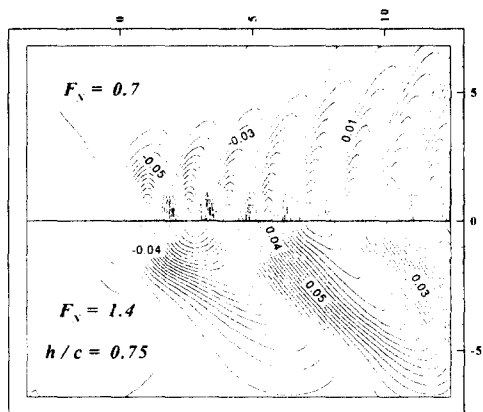
Fig.14-a는 잠수깊이 $h/c = 0.75$ 일 때 속도변화에 따른 $y = 0$ 에서 자유수면의 변위를 비교하여 나타낸 그림이다. 속도가 증가하면서 수중익에 의한 파장과 파고가 증가하다가 $F_N = 1.0$ 이후에서는 파장은 증가하나 파고가 조금씩 감소함을 알

수 있다. Fig.14-b는 $F_N = 0.7, 1.4$ 에서 각각 횡파와 발산파가 지배적인 자유수면의 변위의 모습을 보여준다.

Fig.15-a는 $F_N = 0.7$ 에서 잠수깊이 $h/c = 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ 으로 변할 때 $y = 0$ 에서 자유수면의 변위를 비교하여 나타내었다. 대체적으로 잠수깊이가 낮은 경우 파고가 증가함을 알 수 있다. Fig.15-b는 $h/c = 0.25, 1.0$ 에서 파고의 등고선을 보여주고 있다.

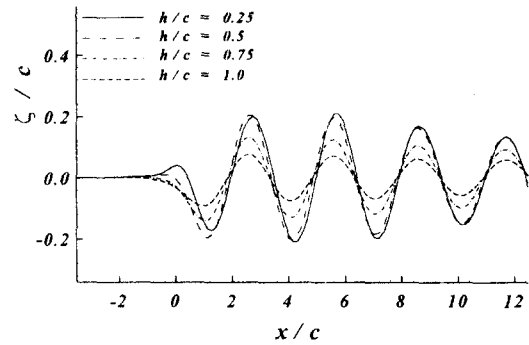


14-a)

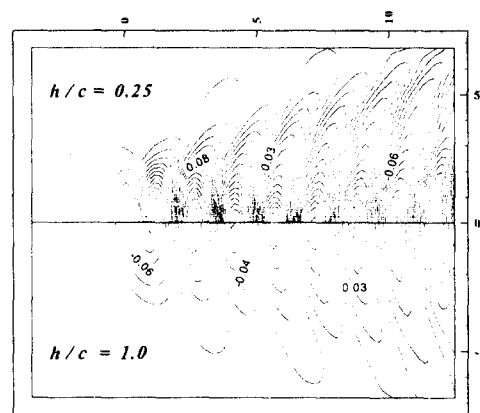


14-b)

Fig.14 Wave profiles due to a submerged hydrofoil on $y=0$ & wave contours against Froude number (NACA0012, $\alpha = 6^\circ$, $h/c=0.75$)



15-a)



15-b)

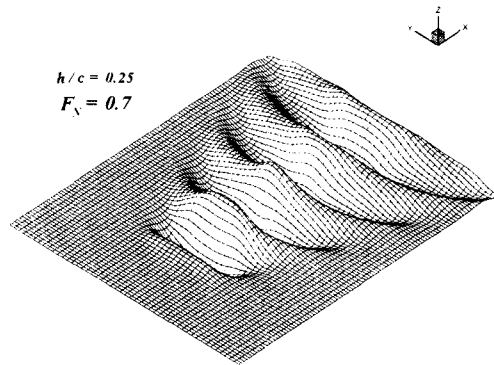
Fig.15 Wave profiles due to a submerged hydrofoil on $y=0$ & wave contours against submergence depth (NACA0012, $\alpha = 6^\circ$, $F_N = 0.7$)

Fig.16은 z 방향 변위비를 크게 하여 $h/c = 0.25$ 에서 $F_N = 0.7$ 과 1.0 에서의 3차원 파의 형상을 나타내었으며, 두 속도에서 수중익에 의해 발생되는 파의 특징을 잘 보여 주고 있다.

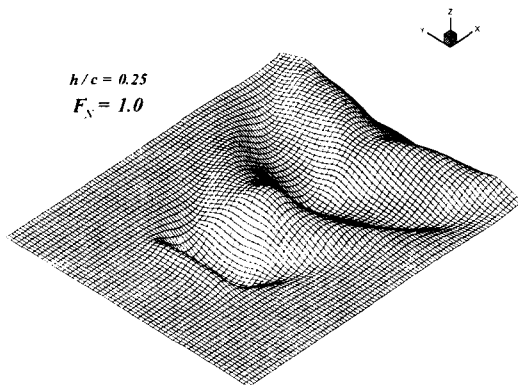
6. 결론

고차경계요소법을 사용한 3차원 유동해석 결과에서, 본 수치계산법의 정도와 유용성을 알 수 있

다. 수중익에 작용하는 유체력에 미치는 자유수면의 영향은 잠수깊이와 속도에 의해 변화가 큰 것을 알 수 있었으며, 수중익이 자유수면 변위에 미치는 영향을 계산결과에서 볼 수 있었다. 수중익에 작용하는 유체력의 정량적인 추정을 위해서 자유수면의 비선형성, 점성 그리고 캐비테이션(cavitation)을 고려한 계산이 필요하다고 본다.



16-a)



16-b)

Fig.16 Perspective view of wave elevations due to a submerged hydrofoil (NACA0012, $\alpha = 6^\circ$)

참고 문헌

- [1] Wladimirow A., "Approximative Hydrodynamic Calculation of a Hydrofoil of Finite Span", ZAHl Rep. No. 311, 1937, Moscow (English translation available, Central Air Documents Office No. ATI-57689)
- [2] Land N. S., "Characteristics of an NACA 66, S-209 Section Hydrofoil at Several Depths", NACA Wartime Rept. L-757, 1943
- [3] Benson J. M. and Land N. S., "An Investigation of Hydrofoils in the NACA Tank", NACA Wartime Rept. L-758, 1942
- [4] Ward K. E. and Land N. S., "Preliminary Tests in the NACA Tank to Investigate the Fundamental Characteristics of Hydrofoils", NACA Wartime Rept. L-755, 1940
- [5] Sottorf W., "Experimentelle Untersuchungen zur Frage des Wassertragfluegels", Deutsche Versuchsanstalt fuer Luftfahrt e. v., Hamburg, Bericht Nr. 408/1, 1940 (English translation available, Central Air Document Office No. ATI 64631)
- [6] Duncan J. H., "The Breaking and Non-breaking Wave Resistance of a Two Dimensional Hydrofoil", Journal of Fluid Mechanics Vol. 26, 1983, pp. 507-529
- [7] Parkins B. R., Perry B. and Wu, T. Y., "Pressure distribution on a Hydrofoil Running near the Water Surface", Journal of Applied Physics, Vol. 27, No. 3, 1956, pp. 232-241
- [8] Min K. S. and Lee H. G., "Systematic Studies on the Development and the Estimation of Hydrodynamic Characteristics of New Hydrofoil Sections Moving under the Free Surface", Proc. of the Annual Spring Meeting, The Society of Naval Architects of Korea, 1996 (in Korean)
- [9] Giesing J. P. and Smith A. M. O., "Potential Flow About Two-Dimensional Hydrofoils", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 28, Part 1, 1967, pp. 113-129
- [10] Hough G. R. and Moran J. P., "Froude Number Effects on Two-Dimensional Hydrofoils", Journal of Ship Research, Vol. 13,

- 1969, pp. 53-60
- [11] Salvesen, N., "On Higher-Order Wave Theory for Submerged Two-Dimensional Bodies", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 38, 1969, pp. 415-432
- [12] Park I. R., Chun H. H. and Chung J. H., "Analysis of 2-D Nonlinear Wave Problem using Rankine Source Panel Method", *Proc. of the Annual Spring Meeting, The Society of Naval Architects of Korea*, 1996 (in Korean)
- [13] Lee, S. J., "A Nonlinear Calculation of 2-Dimensional Hydrofoil with Shallow Submergence", *Journal of Hydrospace Technology*, Vol. 1, No. 2, 1995, pp. 59-68 (in Korean)
- [14] Kim W. J. and Van S. H., "Study on the Flow Characteristics around a Hydrofoil including Free-Surface Effects", *Journal of Hydrospace Technology*, Vol. 1, No. 2, 1995, pp. 69-82 (in Korean)
- [15] Park J. J., Choi K. H., Jeong S. M. and Lee Y. G., "Numerical Computation of Viscous Flow around an Advancing Hydrofoil under Free Surface", *Transactions of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 32, No. 3, 1995 (in Korean)
- [16] Wu T. Y., "A Theory for Hydrofoils of Finite Span", *Journal of Mathematics and Physics*, Vol. 33, October, 1954, pp. 207-248
- [17] Breslin J. P., "Application of Ship-Wave Theory to the Hydrofoil of Finite Span", *Journal of Ship Research*, Vol. 2, No. 1, 1957, pp. 27-55
- [18] Nishiyama T., "Linearized Steady Theory of Fully Wetted Hydrofoils", *Advances in Hydrospace*, Vol. 3, Academic Press, Inc., N. Y., 1966, pp. 237-342
- [19] Bai K. J. and Lee H. K., "A Localized Finite-Element Method for Nonlinear Free-Surface Wave Problems", *19th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Seoul, Korea, 1992
- [20] Nakatake K., Kawagoe T., Kataoka K. and Ando J., "Calculation of the Hydrodynamic Forces Acting on a Hydrofoil", *Transactions of the West-Japan Society of Naval Architects*, No. 76, 1988 (in Japanese)
- [21] Hong S. Y. and Choi H. S., "Analysis of Steady and Unsteady Flow Around a Ship Using a Higher-Order Boundary Element Method", *Transactions of The Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 32, No. 1, 1995, pp. 42-57
- [22] Boo, S. Y., "Application of Higher Order Boundary Element Method to Steady Ship Wave Problem and Time Domain Simulation of Nonlinear Gravity Waves", Ph.D. dissertation, Texas A&M University, 1993
- [23] Telles J. C. F., "A Self-Adaptive Co-ordinate Transformation for Efficient Numerical Evaluation of General Boundary Element Integrals", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 24, 1987, pp. 959-973
- [24] Sclavounos, P. D. and Nakos, D. E., "Stability Analysis of Panel Methods for Free-Surface Flows with Forward Speed", *17th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Hague, The Netherlands, 1988
- [25] Lee J. T., "A Potential-based Panel Method for the Analysis of Marine Propellers in Steady Flow", Ph.D. dissertation, Department of Ocean Engineering, M.I.T., Cambridge, Mass, 1987
- [26] Bessho M., 1957, "On the Wave Resistance of a Submerged Body", *60th Anniversary Series. The Society of Naval Architects of Japan* Vol. 2, 1957, pp. 135-172
- [27] Doctors L. J. and Beck R. F., "Convergence Properties of the Neumann-Kelvin Problem for a Submerged Body", *Journal of Ship Research* Vol. 31, No. 4, 1987
- [28] Wadlin K. L., Shuford C. L. Jr. and Mogehee J. R., "A Theoretical and Experimental Investigation of the Lift and Drag Characteristics of a Hydrofoil at Subcritical and Supercritical Speeds", *NACA RML52D23a*, July, 1952
- [29] Brebbia C. A., Telles J. C. F. and Wrobel L. C., *Boundary Element Techniques*, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 1984