



비선형 조파문제를 위한 패널법과 유한체적법의 비교연구

Comparison Study of Panel Method and Finite Volume Method
for Solving the Nonlinear Ship Wave Problem김도현, 김우전, 반석호¹⁾

Do-Hyun Kim, Wu-Joan Kim, Suak-Ho Van

The two different approaches for solving the nonlinear ship wave problem are discussed in the present paper. The first one is based on a panel method which neglects the viscous effects. Another one is based on a finite volume method which solves RANS equations. The present paper has been focused on the advantages/disadvantages of the above two methods. The developed methods are applied to calculating the flow around Wigley hull & Series 60 hull to validate the performance of the present nonlinear method. Although the two methods employ quite different numerical approaches, the calculated wave patterns from the both methods show good agreements with the experiments.

1. 서론

정수중을 이동하는 선박의 비선형 조파문제(nonlinear ship wave problem)는 선박유체역학분야에서 가장 오래되고 현재까지도 많이 연구되고 있는 중요한 분야중의 하나이다. 비선형 조파문제의 가장 어려운 점은 경계조건(boundary condition)을 만족시켜야 할 경계(boundary)인 자유수면(free surface)이 미리 정해져 있지 않아 해의 일부(part of solution)로 구해야 하는 것이고 또 자유수면 조건식의 수학적 성질이 비선형이라는 데 까다로운 점이 있다. 이러한 이유 때문에 80년대 말에 점성의 효과를 무시한 포텐셜 방법으로 비선형 조파문제가 연구되기 시작했고 점성의 효과를 고려하기 시작한 것은 90년대 중반에 이르러서이다. 그러나 비선형 조파문제는 현재까지도 포텐셜 방법으로 많이 계산되어지고 있다. 특히 유조선, 컨테이너 선등과 같은 실제선형인 경우에는 더욱 그러하다. 이는 점성의 효과를 고려하여 비선형 조파문제를 푸는 기존의 수치해석방법들이 이러한 실제선형에 적용하기에는 아직도 계산상의 안정성(stability)에 문제가 있기 때문이다. 반면에 Rankine 소오스 패널법(7, 12)등과 같은 포텐셜 방법은 여러 형태의 실제선형에 무리없이 적용될 수 있으나 근본적으로 점성의 효과를 무시하고 있으므로 계산되어진 선미파(stern wave)가 실제보다 과장되게 추정되는 경향이 있고 추진기(propeller)가 위치할 선미부근의 유동의 계산결과가 부정확하다는 단점이 있다. 이에 본 연구에서는 점성의 효과를 고려하지 않고 비선형 조파문제를 푸는 한 방법인 상방향 패널법(raised panel method)을 간략히 설명하고 점성의 효과를 고려하는 비선형 조파문제를 푸는 한 방법으로 유한체적법(finite volume method)을 기본으로 하여 비선형 자유수면 조건식을 만족하는 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 방정식을 푼 결과를 소개한다. 계산 예로서는 많은 실험자료가 존재하는 Wigley 선형, Series60 선형에 대해 계산하였고 특히 논문에서는 파형의 수치감쇠(numerical damping), 선미파의 추정에 중점을 두어 언급한다.

2. 문제의 정식화

본 논문에서는 배에 고정된 좌표계를 사용하고 하류 방향을 x , 우현 방향을 y 로, 연직 상방향을 z 로 하는 Cartesian 직교 좌표계를 사용하였고, 좌표계의 원점은 선체 중심면(center plane)과 중임면(midship), 그리고 정수면(calm free surface)이 만나는 점에 위치시켰다. 아래에 나올 지배방정식과 경계조건은 모두 배의 길이(L_0), 배의 속도(U_0)로 무차원화 되었다.

2.1. 포텐셜 유동 해석

비점성(invscid), 비압축성(incompressible), 비회전성(irrotational)의 포텐셜 유동을 가정하면 $\mathbf{v} = \nabla\phi$ 를 만족하는 속도포텐셜 ϕ 를 정의할 수 있고 잘 알려진 바와 같이 속도포텐셜 ϕ 는 지배방정식으로 라플라스 방정식(Laplace equation)을 만족시켜야 한다.

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

첫 번째 경계조건으로는 선체에서 유동이 선체에 접해야(tangential) 한다는 조건이고 이것은 아래의 식으



로 표현된다.

$$\phi_n = 0 \quad \text{on the body} \tag{2}$$

통상 선박은 자유수면의 경계면에서 운항하므로 자유수면이 중요한 역할을 하게 된다. 그래서 또 다른 중요한 경계조건으로 자유수면에서의 압력이 대기압이어야 한다는 조건을 자유수면의 파고를 $z = h(x, y)$ 로 도입하여 속도포텐셜 ϕ 로 표시하면 다음의 동적 자유수면 조건식 (dynamic free surface condition)을 얻는다.

$$h + \frac{Fn^2}{2}(\phi_x^2 + \phi_y^2 + \phi_z^2 - U_0^2) = 0 \quad \text{on the free surface} \tag{3}$$

위 식에서 Fn 는 $Fn = U_0/\sqrt{gL_0}$ 로 정의되어 있는 후르드 수(Froude number)이다.

자유수면에서 만족되어야 할 또 다른 조건으로 자유수면에서 유동이 자유수면에 접해야 한다는 조건으로부터 아래의 운동학적 자유수면 조건식 (kinematic free surface condition)을 얻는다.

$$\phi_x h_x + \phi_y h_y - \phi_z = 0 \quad \text{on the free surface} \tag{4}$$

본 연구의 포텐셜 유동 해석방법에서의 자유수면의 처리는 Steady Formulation을 채택하고 있음으로 위의 두 자유수면 조건식에는 시간에 대한 항(term)이 없음을 주의한다.

2.2. 점성 유동 해석

비압축성 난류 유동의 지배 방정식인 연속방정식과 운동량방정식을 무차원화하고 Integral Form으로 표시하면 다음과 같다.

$$\int_S \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS = 0 \tag{5}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} u_i d\Omega + \int_S u_i (\mathbf{v} - \mathbf{v}_b) \cdot \mathbf{n} dS = \int_S \tau_{ij} i_j \cdot \mathbf{n} dS - \int_S \hat{p} i_i \cdot \mathbf{n} dS + \int_{\Omega} b_i d\Omega \tag{6}$$

본 방법에서는 자유수면 유동을 계산하기 위해 격자를 이동시켜주므로 식(6)의 대류항에 격자속도가 포함되어 있음에 주의한다. τ_{ij} 는 점성과 난류에 의한 유효 응력을 나타내며 아래와 같이 표현된다.

$$\tau_{ij} = \left(\frac{1}{Re} + \nu_t\right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \quad \text{where } \nu_t = C_{\mu} \frac{k^2}{\epsilon} \tag{7}$$

식(6)의 운동량방정식에서 Modified Pressure \hat{p} 는 아래의 식(8)과 같이 정의되어 있고 식(6)의 우변 마지막 항은 정지상태에서 주어진 속도 (U_0)까지 가속에 사용되는 Body Force항이다.

$$\hat{p} = p + \frac{z}{F_n^2} + \frac{2}{3} k \tag{8}$$

본 연구에서 사용된 난류모델은 아래의 Standard $k-\epsilon$ 모형을 사용하였고 벽함수(wall function)를 사용하였다. 아래의 식에서 $\phi = k$ 또는 $\phi = \epsilon$ 을 의미한다.

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}\phi) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\phi}} \right) \nabla \phi \right] + S_{\phi} \tag{9}$$

$$S_k = P_k - \rho\epsilon$$

$$S_{\epsilon} = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} P_k - \rho C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k}$$

$$C_{\mu} = 0.09, C_{\epsilon 1} = 1.44, C_{\epsilon 2} = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_{\epsilon} = 1.3$$

그리고 위에서 언급하였듯이 이동격자의 경우에는 식(10)과 같은 Space(Geometrical) Conservation Law, SCL,를 만족시켜 주어야 한다.

$$\frac{d\Omega}{dt} - \int_S \mathbf{v}_b \cdot \mathbf{n} dS = 0 \tag{10}$$

원래 이동격자에서의 연속방정식은 식(11)과 같으나 비압축성 유동을 가정하면 식(10)으로 표현되는 SCL을 이용하면 식(5)와 같은 격자가 고정된 경우의 연속방정식과 같은 형태를 얻는다.

$$\frac{d\Omega}{dt} + \int_S (\mathbf{v} - \mathbf{v}_b) \cdot \mathbf{n} dS = 0 \tag{11}$$

특히 자유수면에서는 아래와 같은 운동학적, 동력학적 자유수면 조건식을 만족시켜 주어야 한다.

Kinematic Free Surface Condition

$$\{(\mathbf{v} - \mathbf{v}_b) \cdot \mathbf{n}\}_s = 0 \quad \text{or} \quad \dot{m}_s = 0 \tag{12}$$

Dynamic Free Surface Condition

$$p=0 \Leftrightarrow \hat{p} = h/Fn^2 + 2/3k_s \tag{13}$$

점성 유동 해석의 경우에는 속도포텐셜이 존재하지 않음으로 포텐셜 유동해석에서의 두 자유수면 조건식 (3), (4)와 달리 본래의 그 의미대로 경계조건식이 표현되어 있다.

마지막으로 포텐셜 유동해석과 점성 유동 해석의 경우 둘 다 공히 일종의 Realizability Constraint인 방사 조건식 (14)를 만족시켜야 한다.

$$v = (U_0, 0, 0) \text{ at } x = -\infty \tag{14}$$

3. 수치해석 방법

점성 유동 해석의 경우에는 3차원 공간상에 격자계를 생성하여 주어진 지배방정식을 푸는 Field Method를 택해야 하나 포텐셜 유동해석의 경우에는 3차원 공간상에 격자계를 생성하지 않아도 되는 좀 더 효율적인 Boundary Integral Method 계열의 방법이 존재한다. 본 연구에서 채택된 패널법은 Boundary Integral Method 계열의 한 방법이고 이로 인해 유한체적법과 패널법은 수치해석 방법상 근본적으로 많은 차이점을 가지고 있다. 그리고 자유수면을 처리하는 방법도 두 방법, 유한체적법과 패널법, 이 발달해온 과정에 따라서 패널법에서는 Steady Formulation이 유한체적법에서는 Unsteady Formulation이 주로 사용되고 있다. 이에 대한 내용을 아래에 간략히 설명한다.

3.1. 포텐셜 유동 해석

3.1.1. 이산화

지배방정식인 라플라스 방정식을 만족하는 속도포텐셜을 선체와 자유수면의 일부분에 소오스(source)를 분포하여 아래 식과 같이 표현한다.

$$\phi(x, y, z) = \int_{Hull+FS} \sigma(q)/r(p, q) ds + U_0 x \tag{15}$$

위 식에서 소오스는 이미 지배방정식인 라플라스 방정식을 만족하고 있으므로 Fig. 3과 같이 선체와 자유수면 일부분에 사각형 패널을 분포하고 이산화 과정을 통하여 선체와 자유수면에서의 경계조건만을 만족하도록 소오스의 세기를 결정하면 된다.

3.1.2. 자유수면의 처리

자유수면 조건식을 선형이든 비선형으로 처리하든 우선 속도포텐셜, 파고를 다음과 같이 분해하여 선형화의 과정을 거쳐야 한다.

$$\nabla \phi = \nabla \Phi + \nabla \phi', \quad h = H + h' \tag{16}$$

위 식에서 Φ 는 모유동속도포텐셜, ϕ' 는 교란속도포텐셜, H는 모파고, h' 는 교란파고를 의미한다. 여기서 교란속도포텐셜, 교란파고는 작다고 가정하고 이 교란에 대해 자유수면조건식 (3), (4)식을 선형화하면 (17), (18)식과 같고 이 식은 $z = h$ 에서 만족시켜주어야 하나 해를 반복법에 의해 직접 구하기 위해 h' 이 작다는 가정하에 $z = H$ 에서 만족시켜 준다.

$$\phi_x H_x + \phi_y H_y + \phi_z h'_x + \phi_y h'_y - \phi_z = 0 \tag{17}$$

$$h' = \frac{1}{2} Fn^2 (1 + \phi_x^2 + \phi_y^2 + \phi_z^2 - 2\phi_x \phi_x - 2\phi_y \phi_y - 2\phi_z \phi_z) - H \tag{18}$$

위의 두 식에서 초기조건으로 모파고(base height), 모유동(base flow)을 $H=0, \phi_x=1, \phi_y=0, \phi_z=0$ 로 주면 잘 알려진 바와같이 Kelvin 자유수면조건식을 얻고 이중모형해(double model solution)인 경우 $\phi_z=0$ 임을 이용하여 ϕ, H 를 각각 이중모형해의 속도 포텐셜, 파고를 사용하면 잘 알려진 Dawson형식의 선형화된 자유수면 조건식(2)을 얻는다.

위의 자유수면 조건식을 이산화하는 과정에서 위에서 언급하였듯이 식(14)로 표현되는 방사조건을 만족시켜주기 위하여 x방향 미분은 Dawson이 제안한 4-Point Upwind Operator(?)를 사용하여 수치적인 방법으로 만족시켜 준다.

어떤 형태의 모파고, 모유동을 선택하든지 간에 그것을 비선형 계산시 첫 번째 Iteration의 조건으로 사용하고 반복적으로 식(17), (18)을 적용하여 최종적으로 비선형 자유수면 조건식을 만족시켜준다. 그리고 비선형 계산의 반복계산중에는 아래의 식으로 운동학적(kinematic), 동적(dynamic) 자유수면조건식이 만족하는지를 검사한다.



$$\epsilon_k = \phi_z - \phi_x H_x + \phi_y H_y, \quad \epsilon_d = \frac{1}{2} F n^2 (1 - \phi_x^2 - \phi_y^2 - \phi_z^2) - H \quad (19)$$

보통 ϵ_k 는 Fn 의 0.1%-0.3%, ϵ_d 는 정체파고(stagnation height, $F n^2/2$)의 0.3%-0.5%를 수렴조건으로 사용하면 무난하다.

3.1.3. 전체적인 계산과정

기본적으로 자유수면의 처리는 Steady Formulation으로 구성되어 있고 상방향 패널법(12)을 사용하여 아래와 같은 반복계산법으로 구한다.

1. 반복계산법의 초기값으로 자유수면은 정수면, 모유동은 균일류를 택하는 Neumann-Kelvin 유동을 가정한다.
2. 만족점을 자유수면 패널의 중심 아래 정수면에 둔다. 또는 필요에 따라 상류방향으로 이동시킨다.
3. 식 (17), (18)을 만족하고 선체에 비침투조건을 만족하도록 주어진 문제를 선형방정식으로 이산화 하여 푼다.
4. 만족점을 새로운 자유수면에 맞도록 이동시킨다.
5. 모유동(base flow)을 새로운 해에 맞게 바꾼다.
6. 자유수면에 수직인 잉여속도와 잉여압력을 구해 주어진 오차범위내에 있지 않으면 다시 3의 단계로 간다.

3.2. 점성 유동 해석

3.2.1. 이산화

연속방정식, 운동량방정식, k, ϵ 의 이동방정식은 각 CV(Control Volume)에 대해 유한체적법(finite volume method)으로 이산화하였으며 속도-압력 연성은 SIMPLE방법을 사용하였다. 이에 대한 자세한 내용은 Ferziger(4)와 Kim(9)을 참조하기 바란다. 시간에 대해서는 Euler Implicit방법을, 대류항은 Deferred Correction 방법(4)을 사용하여 QUICK으로, 확산항은 2차 중앙차분(CDS)을 사용하여 지배방정식을 이산화하면 최종적으로 아래와 같은 선형방정식을 얻는다.

$$A_l \phi_l + \sum A_i \phi_i = Q_p \quad \text{where } l = E, W, N, S, T, B \quad (20)$$

위의 선형방정식은 Stone의 SIP Solver를 사용하여 풀었다.

본 방법과 같이 Moving Grid 문제의 경우에는 지배방정식에서 격자속도를 고려해 주어야 하는 데 식(7)의 대류항의 격자속도는 Demirdzic(3)의 방법을 따라 Volume Flux 개념으로 고려하였다. 우선 식(10)으로 표현되는 SCL을 Euler Implicit로 이산화하면 아래의 식과 같다.

$$\frac{(\Delta \Omega)^{n+1} - (\Delta \Omega)^n}{\Delta t} = \sum_c (v_b \cdot n)^{n+1} S_c, \quad \text{where } c = e, w, n, s, t, b \quad (21)$$

그리고 반면에 CV의 체적의 변화는 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$(\Delta \Omega)^{n+1} - (\Delta \Omega)^n = \sum_c \delta \Omega_c \quad (22)$$

위의 식을 식(21)에 대입하면 Volume Flux는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\dot{\Omega}_c = (v_b \cdot n)^{n+1} S_c = \frac{\delta \Omega_c}{\Delta t} \quad (23)$$

그러면 대류항의 이산화에 필요한 Mass Flux는 아래와 같이 근사된다.

$$\dot{m}_c = \int_{S_i} (v - v_b) \cdot n dS \approx (v \cdot n)_c S_c - \dot{\Omega}_c \quad (24)$$

3.2.2. 자유수면의 처리

기본적으로 자유수면의 처리는 Mujafferija(11)의 방법을 따르고 있고 Hino(5)도 이와 비슷한 방법으로 자유수면을 처리하였다. SIMPLE방법에서 자유수면의 압력을 식(13)와 같이 Dirichlet하게 주면 자유수면에서의 Mass Flux는 0이 되지 않고 어떠한 값을 가지게 된다. 그러나 동시에 자유수면에서는 식(12)과 같이 Mass Flux가 0이 되어야하므로 아래와 같이 Mass Flux가 0이 되도록 자유수면을 이동시킨다. 이 과정은 매 Outer Iteration에서 Iterative하게 만족시킨다.

$$\Delta h = a_{fs} \frac{\dot{m}_{fs}}{S_{fs} \cdot e_{fs}} \Delta t - W(x, y) h \Delta t, \quad \text{where } \dot{m}_{fs} = (v_{fs} - v_b) \cdot S_{fs} = v_{fs} \cdot S_{fs} - \dot{\Omega}_{fs} \quad (25)$$

위 식에서 e_{fs} 는 Background Grid를 따르는 단위벡터를 의미한다. 그리고 위 식에서는 출구면에서의 파고

의 반사를 방지하기 위해 Hino(5)의 방법을 따라 파고에 소산항을 도입하였다. 위 식에서 사용된 소산항의 분포는 아래와 같다.

$$W(x, y) = A \times \max(W_x(x), W_y(y)) \quad (26)$$

$$W_x(x, y) = \begin{cases} \left(\frac{x-x_d}{x_o-x_d}\right)^2 & \text{if } x_d \leq x \leq x_o \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad W_y(y, x) = \begin{cases} \left(\frac{y-y_d}{y_o-y_d}\right)^2 & \text{if } y_d \leq y \leq y_o \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

식(26)에서 A 는 소산항의 크기를 결정하는 상수이고 이는 $0 \leq A \leq 1/\Delta t$ 의 범위에 있어야 한다. 본 계산에서는 10-20정도의 값을 사용하였다. x_d, y_d 는 Damping Zone의 시작위치를, x_o, y_o 는 Outlet Boundary, Outer Boundary의 위치를 의미한다.

식(25)에서 α_h 는 자유수면 이동에 대한 하향완화 계수이고 본 연구에서는 0.5의 값을 사용하였다. 식(?)에 의해 Outer Iteration 중에 새로운 $h^{m+1} = h^m + \Delta h$ 가 구해지면 소위 Background Grid를 이용하여 각 ξ -line은 3D Parametric Cubic Spline을 이용하여 ξ -line위에 있는 격자점들을 새로운 파고에 맞추어 재분포함으로써 다시 격자계를 구성한다. ξ -line의 격자분포는 전 Outer Iteration에서의 동일한 Arc-Length 분포를 사용한다. Background Grid에 대한 3D Parametric Cubic Spline의 계수 정보는 계산초기에 한번만 구하여 저장하고 격자계를 재구성할 때에는 구해 놓은 계수를 이용한다. 위에서 설명한 방법대로 자유수면을 갱신하는 과정에서 자유수면의 모양은 거의 Smooth한 모양을 얻을 수 있었으나 간혹 선수 앞쪽, 중앙면 부근의 파고가 톱니모양의 Oscillation이 발생해 Miyata(10), Beddhu(1)의 Filtering식을 이용하여 선수부 앞쪽만 국부적으로 자유수면을 Smoothing하였다.

3. 2. 3 전체적인 계산과정

포텐시얼 유동 해석에서의 경우와는 달리 기본적으로 자유수면의 처리는 Unsteady Formulation으로 구성되어 있고 전체적인 계산과정은 아래와 같다.

1. 현재의 자유수면 모양과 식(6)으로 표시되는 입력조건을 만족시키는 운동량방정식을 푼다.
2. 각 셀에서 연속방정식이 만족되도록 압력보정방정식(pressure correction equation)을 풀고 속도, 압력을 보정한다.
3. 채택된 난류모델에 해당하는 방정식을 푼다.
4. 자유수면에서 Mass Flux가 0이 되도록 식(25)를 이용하여 자유수면을 이동한다.
5. 운동량방정식, 연속방정식, 자유수면 조건식이 만족할 때까지 1에서 3까지의 Outer Iteration 단계를 반복한다.
6. 다음 시간스텝으로 전진한다.

4. 계산 결과 및 검증

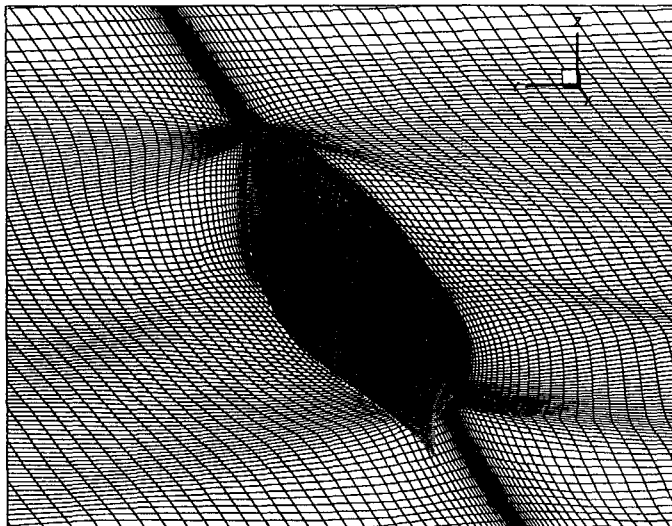
포텐시얼 계산에 사용된 패널분포의 한 예를 Fig. 1에 표시하였고 점성계산에 사용된 전형적인 격자계의 일부를 Fig. 2, 3에 보이었다. 이 두 그림을 비교하면 패널법이 유한체적법에 비해 그 계산의 편의성을 쉽게 짐작할 수 있다. 첫 번째 검증의 예로서 $Fn=0.316$ 의 Wigley 선형에 대한 계산이 이루어졌다. 점성계산 결과의 선측파형을 실험값과 함께 Fig. 4 도시하였다. 실험값과 잘 일치하는 결과를 얻었고 특히 선수과의 Peak가 비선형 포텐시얼 방법보다 점성 계산의 결과가 실험값에 더 근접해 있다. 이는 점성계산에서는 선측주위의 격자가 포텐시얼 방법에서의 경우 보다 훨씬 선측에 붙어있기 때문인 것으로 생각된다.

두 번째 검증의 경우로 Toda의 실험값이 존재하는 $Fn=0.316$ 의 Series 60선형에 대한 계산을 수행하였다. 계산되어진 선측파형을 실험값과 함께 Fig. 5 도시하였다. 그리고 Fig. 6, 7에는 점성계산의 결과로 나온 선미 뒤 쪽의 속도분포를 Toda의 실험값과 함께 표시하였다. 이 그림들을 비교하면 Wake 분포는 실험값의 경향을 제대로 따라가지 못함을 알 수 있고 이는 기존의 난류모델들이 자유수면의 영향을 고려하지 않은 것이 그 한 원인일 수 있고 또 이에 대해서는 다양한 난류모델을 사용하여 좀 더 검증이 필요한 부분이라고 사료된다. 마지막으로 점성계산으로 얻어진 파계, 포텐시얼 방법으로 얻어진 파계를 다양한 위치에서의 Cut 실험자료와 비교하여 각각 Fig. 8, 9에 도시하였다. 점성계산의 이점은 $y/L=0.0775$ Cut 비교에서 선미파 모양에서 잘 나타난다. 왼쪽의 점성계산 결과에서는 선미파가 실험값을 잘 따르고 있는 반면 포텐시얼 계산결과와 선미파는 상당히 과장되어 있음을 알 수 있다. 반면에 포텐시얼 결과는 선체에서 멀리 떨어져 있는 Cut에서는 그 결과가 점성계산의 결과보다 좀 더 좋고 이는 점성계산이 포텐시얼 방법보다 수치감쇠가 심하기 때문인 것으로 사료되고 특히 점성계산에서는 이러한 수치감쇠를 줄일 수 있는 방법이 강구되어야 할 것으로 생각된다.



참 고 문 헌

- [1] Beddhu, M., Jiang, M.Y., Taylor, L.K. and Whitfield, D.L., "Computation of Steady and Unsteady Flows with a Free Surface Around the Wigley Hull," Applied Mathematics and Computation, Vol. 89, pp. 67-84, 1998.
- [2] Dawson, C.W., "A Practical Computer Method for Solving Ship-Wave Problems," Second International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Berkeley, 1977.
- [3] Demirdzic, I., Peric, M., "Space Conservation Law in Finite Volume Calculations of Fluid Flow," Int. J. Numer. Methods Fluids, Vol. 8, pp. 1037-1050, 1988.
- [4] Ferziger, J.H. and Peric, M., Computational Methods for Fluid Dynamics, Springer-Verlag, Berlin, 1996.
- [5] Hino, T., "A Study of Grid Dependence in Navier-Stokes Solutions for Free Surface Flows around a Ship Hull," Journal of the Society Naval Architects of Japan, v. 176, pp. 11-18, Dec., 1994.
- [6] Hino, T., "Computation of Viscous Flows with Free Surface around an Advancing Ship," Proc. 2nd Osaka Int. Colloquium on Viscous Fluid Dynamics in Ship and Ocean Technology, Osaka Univ., 1992
- [7] Kim, D.H., Kim, W.J., Van, S.H. and Kim, H., "Nonlinear Potential Flow Calculation for the Wave Pattern of Practical Hull Forms," 3th Int. Conf. on Hydrodynamics, Seoul, Korea, 1998.
- [8] Kim, J.J. Kim, H.T. and Van, S.H., "RANS Simulation of Viscous Flow and Surface Wave Fields around Ship Models," Proc. of the third Osaka Colloquium on Advanced CFD Applications to Ship Flow and Hull Form Design, Osaka, Japan, 1998.
- [9] Kim, W.J., Kim, D.H., and Van, S.H., "Calculation of Turbulent Flows around VLCC Hull Forms with Stern Frameline Modification," 7th Int. Conf. Numerical Ship Hydrodynamics, Nantes, France, 1999.
- [10] Miyata, H., Sato, T. and Baba, T., "Difference Solution of a Viscous Flow with Free-Surface Wave about an Advancing Ship," Journal of Computational Physics, Vol. 72, pp. 393-421, 1987.
- [11] Muzafferija, S. and Peric, M., "Computation of Free Surface Flows Using Finite Volume Method and Moving Grids," Numer. Heat Transfer, Part B, Vol. 32, pp. 369-384, 1997.
- [12] Raven, H.C., "A Solution Method for the Nonlinear Ship Wave Resistance Problem," Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, Netherlands, 1996.



View of Fish's eyes

Just to remind you of the problem we are solving ...

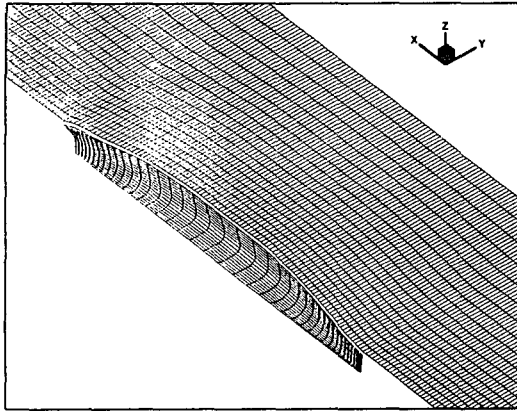


Fig. 1 Panel Distribution Used in Potential Method

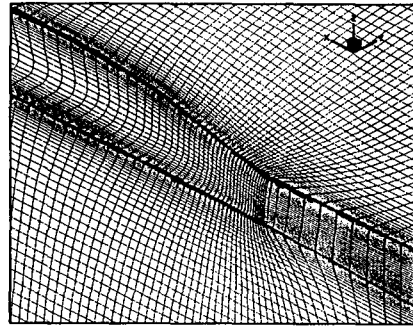


Fig. 2 Grids near a Bow

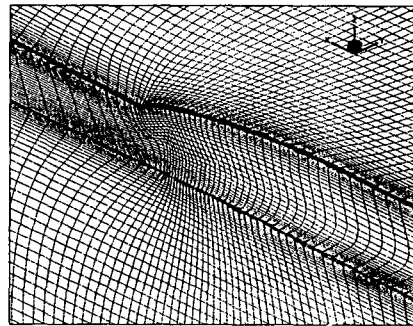


Fig. 3 Grids near a Stern

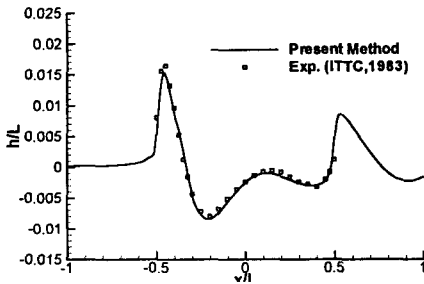


Fig. 4 Comparison of Hull Profiles (Wigley Hull, $F_n=0.316$, $Re=3.59 \times 10^6$)

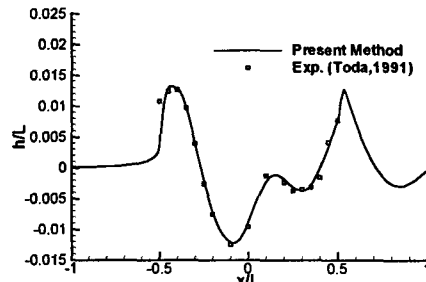


Fig. 5 Comparison of Hull Profiles (Series 60 Hull, $F_n=0.316$, $Re=4 \times 10^6$)

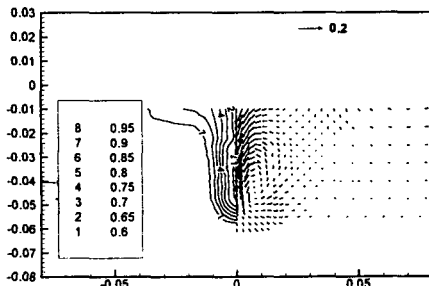


Fig. 6 Velocity Distribution at $x/L=0.6$ (Exp., Toda)

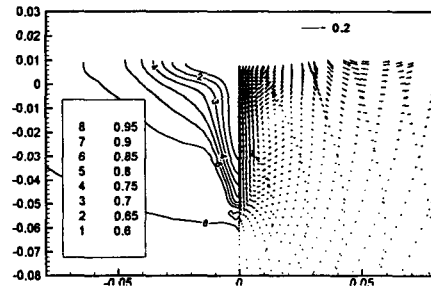


Fig. 7 Velocity Distribution at $x/L=0.6$ (Cal.)

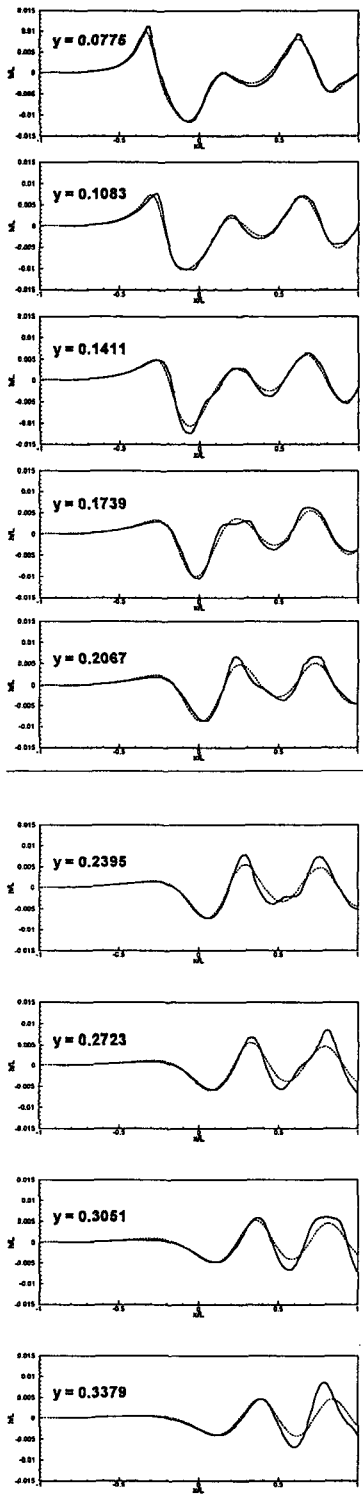


Fig. 8 Cuts by Viscous Method (Solid Line=Exp., Dotted Line=Cal.)

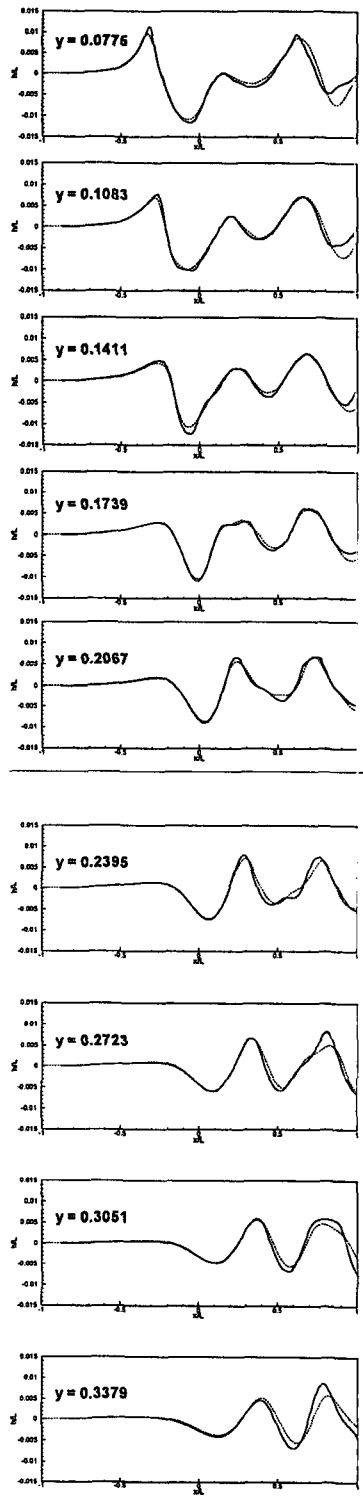


Fig. 9 Cuts by Potential Method (Solid Line=Exp., Dotted Line=Cal.)