

비대선 모형에 대한 점성유동의 수치해석연구

朴 命 圭* · 姜 國 珍**

A Study on the Numerical Analysis of the Viscous Flow for a Full Ship Model

Myung-Kyu Park * · *Kuk-Jin Kang***

<목 차>

Abstract

1. 서 론
2. 지배방정식
3. 수치계산법

4. 계산결과 및 검토

5. 결 론
- 참고문헌

Abstract

This paper presents the numerical analysis results of the viscous flow for a full ship model. The mass and momentum conservation equations are used for governing equations, and the flow field is discretized by the Finite-Volume Method for the numerical calculation. An algebraic grid and elliptic grid generation techniques are adopted for generation of the body-fitted coordinates system, which is suitable to ship's hull forms. Time-marching procedure is used to solve the three-dimensional unsteady problem, where the convection terms are approximated by the QUICK scheme and the 2nd-order central differencing scheme is used for other spatial derivatives. A Sub-Grid Scale turbulence model is used to approximate the turbulence, and the wall function is used at the body surface. Pressure and velocity fields are calculated by the simultaneous iteration method. Numerical calculations were accomplished for the Crude Oil Tanker(DWT 95,000tons, $C_b=0.805$) model. Calculation results are compared to the experimental results and show good agreements.

* 韓國海洋大學校 造船工學科 教授

** 船舶海洋工學研究센터 船舶性能研究部 先任研究員

1. 서 론

일반적으로, 선체주위의 유동장은 3차원적인 기하학적 형상과 자유표면의 존재로 인해서 매우 복잡하다. 선형을 잘 설계하기 위해서는 선체에 작용하는 물리적인 현상을 잘 파악하고 저항이 최소가 되도록 해야 한다. 선체에 작용하는 저항성분을 크게 나누어 보면, 파도에 의한 조파저항과 유체의 점성력에 의한 점성저항 및 선체형상에 의한 형상저항 등을 들 수 있다. 오늘에 이르기까지 많은 조선공학 연구자들은 이들 저항성분의 정확한 추정과 최소저항을 갖는 선형의 설계를 위하여 이론 및 실험적인 기술개발에 노력을 기울여 왔다. 조파저항은 주로 포텐셜이론인 선형 조파저항 이론에 바탕을 두고 연구가 이루어져 왔으나, 저속선 또는 선수부가 뚱뚱한 비대선 등 비선형성이 강한 경우에는 이러한 이론적인 계산이 불가능하게 된다. 근래에는 조파저항계산에 있어서 비선형항까지 고려해 주는 Rankine Source 방법이 여러사람들에 의하여 개발되어 비교적 좋은 결과를 주고 있으며, 널리 사용되고 있다.

최근 전산기와 더불어 수치계산능력이 급속히 발달함에 따라, 유한차분법(Finite Difference Method)과 같은 수치해석방법을 이용하여 과거의 해석적인 방법으로는 접근할 수 없었던 거의 모든 분야의 문제를 수치적으로 풀 수 있는 단계에 이르렀다. 따라서 선체주위의 점성유동장의 해석에 있어서도 그 지배방정식인 Navier-Stokes 또는 Reynolds 방정식을 수치적으로 직접 풀어서 유동장을 어느정도 정확하게 해석할 수 있는 단계에 도달했다.

1990년에 스웨덴의 SSPA에서 개최된 SSPA-CTH-IIIHR Workshop[1]에서는 HSVA Tanker선형과 Mystery선형에 대하여 각자의 방법으로 계산하여 그 결과를 실험치와 비교검토한 바가 있으며 이들 결과중에는 수준급의 결과도 있다. 그러나 배에 적합한 난류모형의 개선은 여전히 속제로 남아 있으며, 실험에서 나타난 선미빌지 와류에 의한 프로펠러면에서의 축방향 속도성분의 hook 모양을 계산으로 재현하는 데에 대부분이 실패를 하였다. 그리고, 이에 이어서 1994년 일본 동경에서는 일본 선박연구소(SRI)가 주관하여 Series 60(Cb=0.6)모

형에 대하여 자유수면과 점성유동을 함께 풀어서 그 결과를 실험과 비교검토하는 CFD Workshop[2]이 개최되었으며, 상당히 좋은 결과들이 많이 발표가 되어 수치수조의 실현이 한층 가까와 졌음을 보였다.

본 연구에서는 개발된 계산방법[3a]과 실제선박 기본 및 선형설계에 적용된 것을[3b] 활용하기 위한 검증단계로서 선수벌브와 선미벌브가 있는 95,000톤급의 원유운반선에 적용한 계산결과를 실험결과와 비교검토 해 봄으로서 비대선박에 의한 그린선박(Green ship)의 선형과 그 가능성을 살펴보고자 하였다.

2. 지배방정식

2.1 연속방정식 및 운동량방정식

3차원 물체주위의 비압축성 유동장에 대한 지배방정식은 질량보존법칙으로 부터 유도되는 연속방정식과 운동량보존법칙으로 부터 유도되는 Navier-Stokes방정식으로서 다음과 같다,

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} \delta_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_j} (F_{ij}) \quad (2)$$

$$\text{단, } F_{ij} = -u_i u_j + \frac{2}{R_n} e_{ij} - \overline{u_i u_k} \quad (3)$$

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

$$R_n = \frac{U_o L}{\nu} \quad (5)$$

여기서, U_o 는 배의 전진속도, L 은 배의 길이, ν 는 물의 동점성계수이다. 그리고, (3)식에서 우변 첫항은 대류항, 2항은 확산항, 마지막항은 난류응력항이다.

2.2 난류모델

점성유동중에 물체가 놓여 있으면, 물체표면에 서는 점성때문에 유체가 미끌어 질 수가 없으므로

그 경계면에서 속도는 불연속이 되며 그 부근에서는 미세한 이차원파(Tollmien-Schlichting waves)가 존재하게 된다. Reynolds(이하 Rn 이라 함)수가 작으면 이 미세한 파동은 감쇄되어서 유동은 층류가 되지만, Rn 수가 커지면 점성력보다도 관성력이 커지게 되고, 이에 따라서 미세한 파동이 발달하여 유동이 난류가 된다. 그리고 난류에서는 크고 작은 여러가지 scale의 와동이 불규칙하게 혼합되어 운동량과 에너지를 전달한다. 일반적으로 Rn 수 10^4 을 층류로 풀수있는 한계라 생각하고, 그 이상의 Rn 수에서는 난류모델의 도입이 불가피하다. 본 연구에서는 SGS 난류모형[4]을 사용하여 난류유동 해석을 하고자 한다.

$$\overline{u_i u_j} = \frac{2}{3} \frac{\nu_s^2}{(0.094\Delta)^2} - 2\nu_s \overline{e_{ij}} \quad (6)$$

$$\Delta = (\Delta x_1 \Delta x_2 \Delta x_3)^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

와점성계수 ν_s 는 Smagorinsky[5] 가정을 따라서 다음과 같이 구해진다.

$$\nu_s = L_s^2 (2 \overline{e_{ij} e^{ij}})^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

여기서, 길이척도는 다음과 같이 Takakura[6]의 제안을 따라 최소격자길이의 반으로 취한다.

$$L_s = 0.5 \min(\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3) \quad (9)$$

2.3 벽법칙

난류계산시에 물체경계면에서의 속도를 0으로 하는 경우, 격자점이 y' (선체 표면에서의 최소 격자점의 크기)=1~4사이에 적어도 한개이상 있어야 하므로 많은 격자점이 필요하게 되고, 또한 시간증분 Δt 도 계산의 안정을 위해서 작게하여야 한다. 따라서 많은 기억용량과 시간이 소요되므로, 계산시에 어려움이 있다. 본 연구에서는 실용적인 면에 중점을 두고, 물체경계면에서 다음과 같은 벽법칙

을 사용하였다.

$$\frac{q}{u_\tau} = \frac{1}{0.42} \ln y^+ + 5.45 \quad (10)$$

$$\text{단, } y^+ = u_\tau y Rn$$

여기서, q 는 벽 바로 위의 계산격자에서의 속도, u_τ 는 벽면에서의 마찰속도이다.

벽면 상방의 2개 격자($j=2,3$, $j=1$ 은 벽면)가 로그 법칙이 적용되는 난류영역($y^+=50\sim 500$)에 놓이도록 하면, (10)식을 이용할 수가 있다. 즉, (10)식을 사용하여 $j=3$ 에서의 속도성분으로 마찰속도를 구하고, 이 마찰속도로 부터 $j=2$ 에서의 속도를 구한다. 이 벽법칙을 사용하면 최소격자를 10배이상 크게할 수 있으므로 계산시에 매우 유리하다. 이 벽 함수는 압력구배가 없는 평판상에서 성립하는 식이므로 3차원의 형상에 적용한다는 것은 다소 무리가 있을 것으로 예상되지만, 여러사람에 의하여 사용되어 왔으며 비교적 양호한 계산결과를 주는 것으로 알려져 있다[1].

3. 수치계산법

3.1 격자생성 및 좌표변환

3차원 선체형상의 경계면에서의 유동을 정확하게 계산하기 위해서는 경계조건을 정확하게 줄 수 있는 물체적합좌표계가 필요하다. 수치계산을 위해서는 선체표면을 포함한 계산유체공간이 많은 격자점들로 구성되어져야 하며, 이들 격자점들끼리의 정보량 교환을 통하여 계산이 진행되게 된다. 따라서 생성된 격자의 좋고 나쁨에 따라서 수치해의 결과가 영향을 받기 때문에 격자생성은 매우 중요하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 Thompson[7]의 방법을 따라서 초기격자생성은 대수적인 방법으로 하고 이를 매끄럽게 해주는 타원형 격자생성법을 개발했다.

3.2 지배방정식의 변환

실영역을 계산영역으로 좌표변환시키면 직선좌

표계의 방정식을 모두 일반좌표계로 변환시켜 주어야 한다. 이때 필요한 변환 metric tensor들은 다음과 같다.

- 공변벡터: $a^i_i = \frac{\partial x^i}{\partial \xi^i}$

- 격자체적(Jacobian):

$$J = \partial_i \cdot (a_j \times a_k) = \det(a^i_m)$$

- 반변벡터:

$$b^i_l = \frac{1}{J} (a_j \times a_k)_l = \frac{1}{J} \epsilon_{lmn} a^m_j a^n_k$$

- 면적벡터: $A^i_l = J \cdot b^i_l$

위에서 정의된 변환 metric tensor들을 이용하여 직각좌표계에서의 지배방정식(1)~(4)를 일반좌표계로 변환시키면 다음과 같다.

$$\frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi^i} (A^i_k u_k) = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi^j} (-A^j_k p \delta_{ik} + A^j_k F_{ik}) \quad (11)$$

$$\text{단, } F_{ik} = -u_i u_k + \frac{2}{R_n} e_{ik} - \overline{u_i u_k} \quad (12)$$

$$e_{ik} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) \quad (13)$$

3.3 수치계산 방법

선체주위의 난류유동장을 시뮬레이션하기 위하여 유한체적법에 의한 수치계산법을 개발하였다. 계산시에 사용되는 격자계는 staggered 격자계이며, 속도와 압력점들이 3차원적으로 각기 다른 점에 정의가 되므로 압력계산시에 안정된 결과를 준다 [8].

우선, 유한체적법을 이용한 수치계산을 위해서는 지배방정식을 차분화된 식으로 변형해야 하는데, 이 차분방법에 따라서 수치계산 방법이 다양하다. 본 논문에서는 비정상유동의 해석을 목표로 하여 시간에 대해서 전진차분 형태를 취하면, (11)식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{u^{n+1} - u^n}{\Delta t} = -\nabla p + \nabla F \quad (14)$$

앞에서 언급한 바와 같이 F의 첫째항은 대류항에 해당하며, 이 항의 차분은 매우 중요하다. 대류항의 차분방법에는 여러가지가 있으나 본 연구에서는 3차에 가까운 정도를 주는 QUICK Scheme[9]을 사용하였다. 그리고 둘째와 셋째항은 확산항과 난류응력항에 해당하는 것으로서 2차정도의 중심차분으로 차분화 하였다.

이렇게 하여 차분화된 방정식을 사용하여 다음과 같은 방법으로 속도와 압력을 푼다. (14)식에서 압력항을 제외한 속도변화량은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta u = \Delta t \cdot \nabla F \quad (15)$$

그리고, (14)식은 다음과 같다.

$$u^{n+1} = u^n - \Delta t \cdot \nabla p + \Delta u \quad (16)$$

(16)식의 양변에 divergence를 취하면

$$\nabla(u^{n+1}) = \nabla(u^n - \Delta t \cdot \nabla p + \Delta u) \quad (17)$$

가 되고, (n+1) 시간단계에서의 divergence를 0으로 놓으면,

$$\nabla(u^{n+1}) = 0 \quad (18)$$

$$\nabla(u^n - \Delta t \cdot \nabla p + \Delta u) = 0 \quad (19)$$

가 되어, 압력에 대한 Poisson 방정식이 다음과 같이 구해진다.

$$\nabla^2 p = \Delta(u^n + \Delta u) / \Delta t \quad (20)$$

(20)식은 속도와 압력을 동시 반복적으로 구하는 HSMAC법[10]으로 푸는데, 이하에는 HSMAC법을 간략히 정리하였다. 즉, \hat{u} 를 (n) 시간단계의 속도 예측치로 놓고, m을 반복회수라고 하면 \hat{u}

는 (16)식으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\hat{u} = u^n - \Delta t \cdot \nabla p^m + \Delta u \quad (21)$$

이렇게 구해진 \hat{u} 는 아직 연속방정식 (18)을 만족하지 않으며, 이로 인해서 생기는 압력변화는 다음과 같다.

$$p^{m+1} = p^m - \frac{\omega}{|\nabla^2|} \frac{\nabla \hat{u}}{\Delta t} \quad (22)$$

여기서 ω 는 완화계수(relaxation factor)로서 0.8로 한다. $|\nabla^2|$ 은 Laplace 연산자의 절대치로서 직교좌표계에서는 $(\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)$ 이나, 일반 좌표계에서는 다음과 같은 근사값을 사용하기로 한다.

$$|\nabla^2| \approx g^{11} + g^{22} + g^{33} \quad (23)$$

이렇게 해서 구해진 압력치들은 그 변화량이

$$|\Delta p| = |p^{m+1} - p^m| \leq 10^{-4} \quad (24)$$

일때, 수렴된 것으로 보고 다음 시간단계로 넘어가서 계산을 계속 수행한다.

3.4 경계조건

본 계산시에 주어진 경계조건은, 유입면과 측면 원방에서는 선체로 부터 충분히 떨어져 있다는 가정하에에서는 속도가 일정한 조건과 압력이 0인 조건이 사용되고, 유출면에서도 선체로 부터 충분히 떨어져 있다는 조건하에서 압력과 속도가 연속하다는 조건이 사용된다. 그리고 선체중심면과 자유표면에서는 대칭조건이, 선체표면상에서는 첫번째와 두번째의 격자점이 난류영역에 놓여있다는 조건하에서 속도에 대하여 벽함수가 사용되며, 압력에 대해서는 연속하다는 조건이 주어진다.

4. 계산결과 및 검토

본 계산의 정도와 유용성을 알아보기 위하여 95,000톤의 원유운반선이며, 주요 제원은 $L \times B \times d = 233.0 \times 41.8 \times 12.2$ 이며, $C_b = 0.805$ 이다. 계산시 모든 길이는 배길이로 무차원화 하였으며, 원점은 0.0, 선수는 -0.5, 선미는 0.5으로 설정하였다. Fig. 1에는 계산시에 사용된 격자계의 모양을 보이고 있다. 그리고 계산영역 및 계산조건은 다음표와 같다.

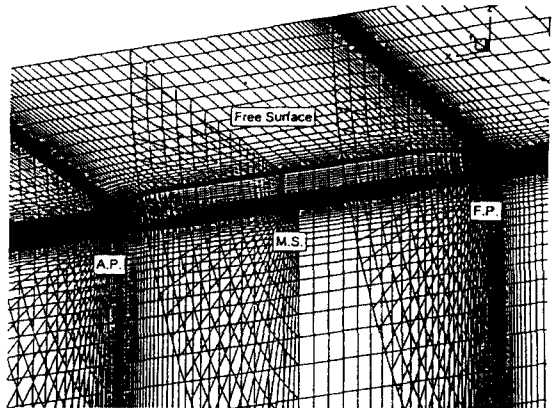


Fig. 1 Grid System for Numerical Calculation

계산 대상 속도	15노트 ($Rn=10^7$)
계산 영역	$-1.0 \leq x \leq 1.5$ $0.0 \leq y \leq 1.0$ $-1.0 \leq z \leq 0.0$
최소격자크기	$x = 0.005, y = 4 \times 10^{-4}$
계산격자점 갯수	154,290 ($139 \times 37 \times 30$)
총 계산 반복횟수	10,000회
무차원 계산시간	$T=2.26$
총 계산 소요시간	30시간
사용 계산 기종	HP Model 735

계산은 자유수면이 움직이지 않는 상태에 대해서 수행하였으며, 유속은 정지상태에서 2,000반복

횃수까지 서서히 가속시킨 후에, 수렴할 때까지 계속 반복계산을 하였다. 계산시간에 따른 마찰저항계수와 압력저항계수를 Fig. 2에 보이고 있는데, 마찰저항계수는 8,000 횃수에서 거의 수렴하고 있으며 압력저항계수는 계속 진동하며 임의의 값으로 수렴하고 있다. 이들의 결과를 실험값과 비교하면 다음과 같다.

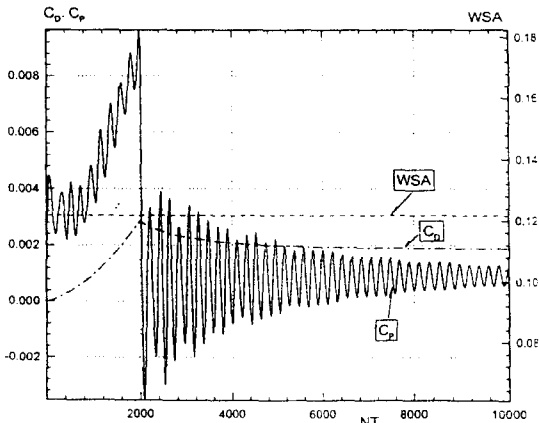


Fig. 2 Iteration Numbers and Drag Coefficients (C_D , C_P)

15노트 ($Rn=10^7$)	실험 ($\times 10^{-3}$)	계산 ($\times 10^{-3}$)
압력저항계수(C_P)	0.662	0.935
마찰저항계수(C_D)	2.921	1.888
조파저항계수(C_W)	0.068	—
전저항계수 (C_{TM})	3.651	2.823

상기 실험치 가운데 마찰저항계수는 1957년 ITTC의 모형선과 실선의 상관곡선을 사용하여 구한 값이고, 압력저항계수는 형상계수($K=0.2267$)를 사용하여 구한 값이다. 계산으로부터 압력저항계수는 크고, 마찰저항계수는 작게 추정이 되었는데, 합쳐서 실험치의 약 80%에 해당하고 있다. 오차가 큰 이유로는 자유수면의 계산이 포함되지 않은 것과 마찰저항의 계산결과의 부정확성을 들 수 있겠다. 이의 개선을 위해서 난류모형의 수정 등의 노력이 필요하다. Fig. 3에는 선체주위의 압력분포

모양을 보이고 있다.

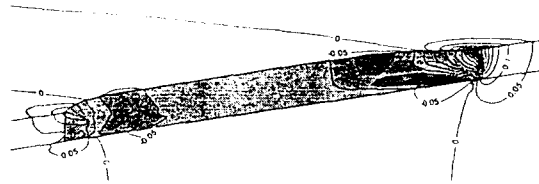


Fig. 3 Pressure Contours around a Ship Model

Fig. 4에는 선미부의 흐름을 파악하기 위하여 터프트시험결과와 계산결과를 비교해서 보이고 있다. 실험시에는 프로펠러가 작동하고 있기 때문에 프로펠러의 전방 가까운 곳과 후류에서의 흐름은 계산과 차이를 보이고 있지만, 그외에는 전반적으로 좋은 일치를 보이고 있다.

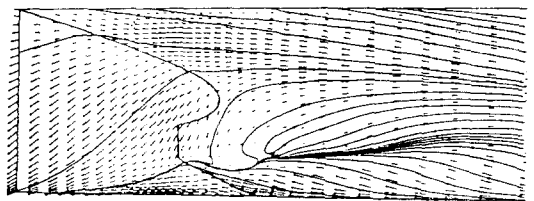
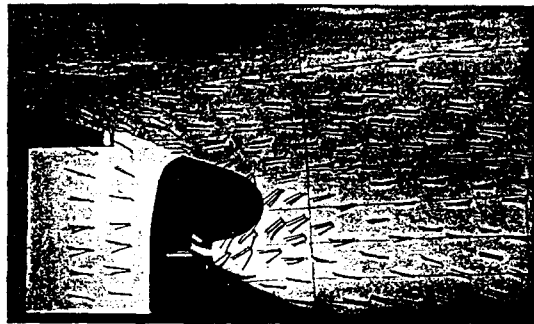


Fig. 4 Velocity Vectors and Stream Lines (above : Tufts Test Results, below : Present Calculation)

Fig. 5에서는 선수부부터 선미까지의 대표적인 단면에서의 속도분포 모양을 보이고 있다. 특히, 선미부로 가면서 밀지와류가 생성되는 것이 명확하게 보이고 있다.

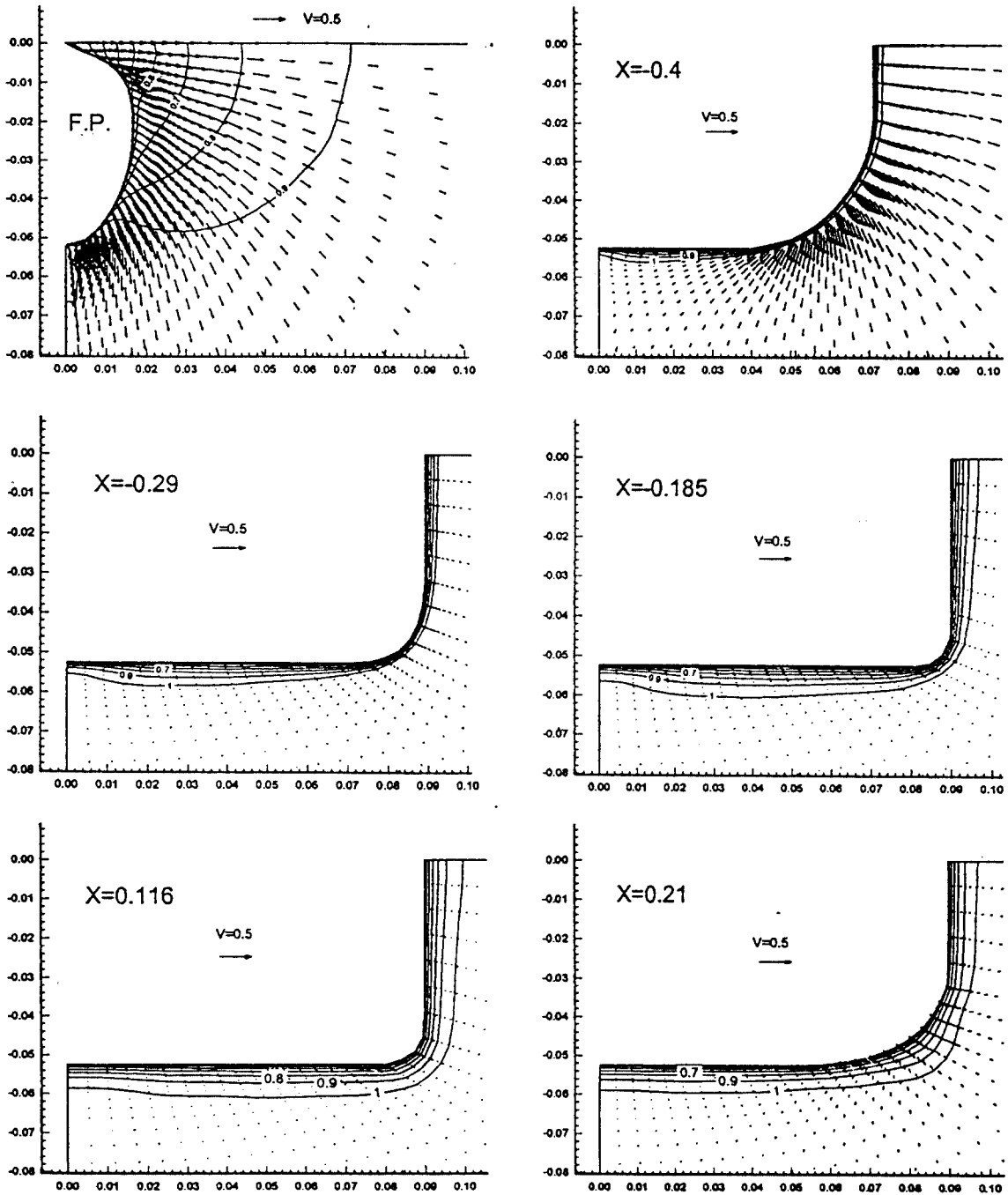


Fig. 5a. Iso-Axial(V_x/V) Velocity Contours and Transverse Velocity Vectors(V_{TR}/V)

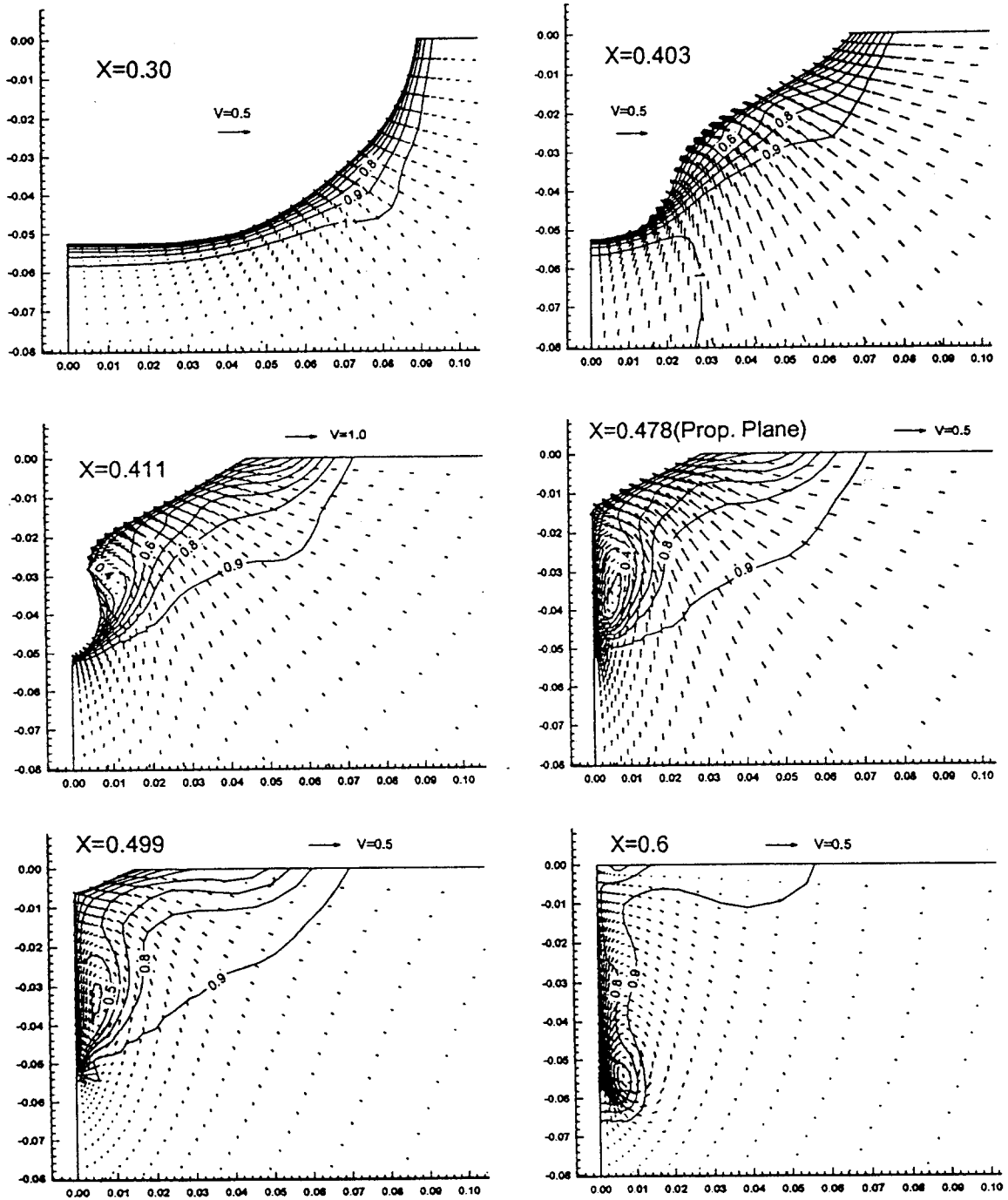


Fig. 5b. Iso-Axial Velocity(V_x/V) Contours and Transverse Velocity Vectors(V_{tr}/V)

Fig. 6에서는 본 계산의 중요한 관점인 프로펠러 면에서의 반류분포 계산결과를 실험결과와 비교해서 보이고 있다. 계산에 의한 반류가 실험치보다 다소 두껍게 나타나 보이지만 대체적으로 좋은 일치를 보이고 있다. 그런데, 이부분은 프로펠러 축 부분으로서 계산시에 이 부분을 기하학적인 곡면으로 부드럽게 표현하는 것이 매우 어렵기 때문에 다소의 계산오차가 예측되는 부분이다.

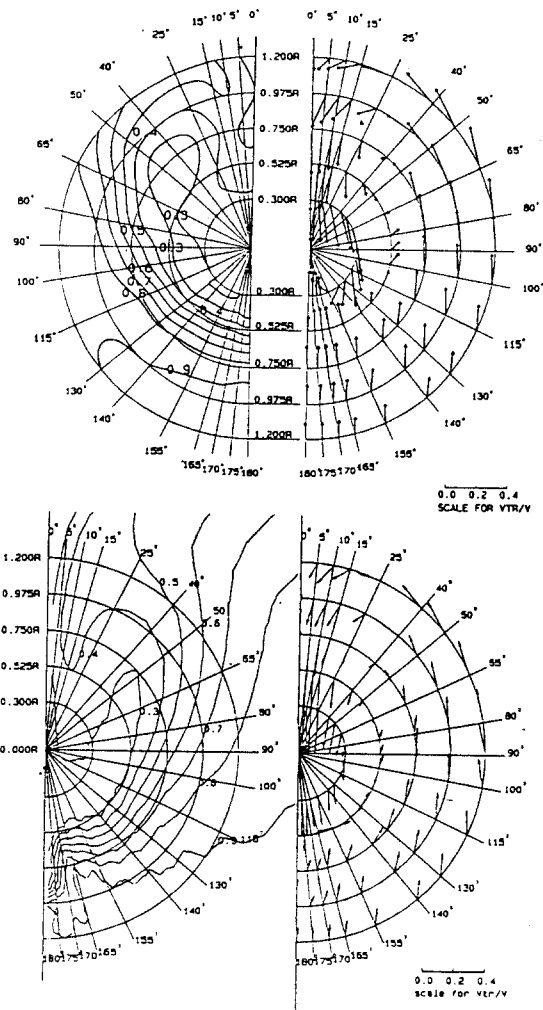


Fig. 6 Iso-Axial Velocity(V_x/V) Contours and Transverse Velocity Vectors(V_{TR}/V) at Propeller Plane (above : Wake Survey Results, below : Present Cal.)

5. 결 론

(1) 실제 선박의 모형선에 대한 점성유동장 계산을 수행하여 실험결과와 비교검토를 하고, 실용가능성을 검토해 보고자 하였다.

(2) 계산결과로부터 압력저항계수는 크고, 마찰저항계수는 작게 추정이 되었는데, 합쳐서 실험치의 약 80%에 해당하고 있다. 오차가 큰 이유로는 자유수면의 계산이 포함되지 않은 것과 마찰저항의 계산결과와 부정확성을 들 수 있겠다. 이의 개선을 위해서 난류모형의 수정 등의 노력이 필요하다.

(3) 프로펠러면에서의 반류분포 계산결과가 실험치보다 다소 두껍게 나타나 보이지만 대체적으로 좋은 일치를 보이고 있다.

(4) 프로펠러 축부분을 포함하여 선수미부의 격자생성을 잘 할 수 있도록 격자생성법에 대한 연구가 계속되어야 할 것으로 생각한다.

(5) 본 수치해석법을 자유수면까지 포함하여 계산할 수 있도록 확장시킬 필요가 있으며, 이를 위한 지속적인 노력이 있어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 1994년 해대학술진흥회 연구비로 WCF 논문제에 이어 두번째로 수행된 연구결과 일부만을 밝혀둔다.

참 고 문 헌

- [1] Larsson, L., Patel, V.C. and Dyne, G. ed., "Ship Viscous Flow", Proceedings of 1990 SSPA-CTH-IIIHR Workshop, 1991.
- [2] "Proceedings of CFD WORKSHOP TOKYO 1994", Vol. 1,2, Tokyo, Japan, March 1994.
- [3a] Kang, K. J., "Numerical simulation of the viscous flows around ships in a generalized coordinates system", Ph.D Thesis, Inha Univ., 1991.
- [3b] Park, M.K., "A study on basic design method and Seakeeping performance of an

- Hatchcoverless Ship", Ph.D Thesis, Ulsan Univ., 1994.
- [4] Zhu, M., Miyata, H. and Kajitani, H., "Finite-Difference Simulation of a Viscous Flow about a Ship of Arbitrary Configuration", 5th ICNSH, Hiroshima, Japan, 1989.
- [5] Smagorinsky, J., Manebe, S., and Holloway, J. L., "Numerical Results from a nine-level general circulation model of the atmosphere", *Monthly Weather Review*, 93, Dec., 727-768, 1965.
- [6] Takakura, Y., Ogawa, S., and Ishiguro, T., "Turbulence Model for Transonic Viscous Flow", *AIAA paper*, No. 89-1952CP, 1989.
- [7] Thompson, J. F., Warsi, Z.U. A. and Mastin C. W., "Numerical grid generation", North-Holland, 1985.
- [8] Patankar, S.V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", McGRAW-Hill Book Company, 1980.
- [9] Leonard, B.P., "A Stable and accurate convective modeling procedure based quadratic upstream interpolation, *Computational Methods*", *Appl. Mech. Eng.* Vol. 19, 1979
- [10] Hirt, C.W., Nichols B.D. and Romero N.C., "SOLA-A Numerical solution algorithm for transient fluid flows", Los Alamos Lab., UC-34 and UC-79d, 1979.