
 論 文

大韓造船學會論文集
 第 34 卷 第 2 號 1997年 5月
 Journal of the Society of
 Naval Architecture of Korea
 Vol. 34, No. 2, May 1997

부가물이 부착된 Wigley선형 주위의 점성유동 해석

박종진*, 박승서*, 이승희**

A Numerical Computation of Viscous Flow around a Wigley Hull For with Appendages

by

J. J. Park*, S. S. Park* and S. H. Lee**

요 약

본 연구에서는 수치계산을 통하여 선체-부가물 주위의 난류유동을 해석하였다. 지배방정식으로 는 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식을 사용하였으며, 선체 및 부가물의 3차원 형상을 정도 높게 표현하기 위하여 물체적합좌표계(Body-Fitted Coordinate System)를 도입하였다. 지배방정식들은 유한체적법(Finite Volume Method)을 이용하여 이산화 하였으며, 난류모형으로는 SGS (Sub-Grid Scale)모형을 사용하였다.

계산 대상 선형으로 실험 및 계산 자료가 많은 Wigley선형을 선택하고, $Rn = 1.0 \times 10^6$ 인 경우 에 대하여 계산을 수행하여 부가물이 선체 주위의 난류유동에 미치는 영향을 예측할 수 있음을 보였다.

Abstract

In the present paper, viscous flow fields around a wigley hull with appendages are analysed to study interactions between the hull and appendages. Navier-Stokes and continuity equations are solved by a finite volume method in a body-fitted coordinate system which conforms three dimensional ship geometries with appendages. A Sub-Grid Scale(SGS) turbulent model is used for a calculation of high Reynolds number flow.

Numerical computations has been done for a Wigley hull form at $Rn = 1.0 \times 10^6$. The results show that the present approach can predict, at least in qualitative sense, the influence of the appendages upon the flow field around a ship.

발 표 : 1995년도 대한조선학회 추계연구발표회('95.11.11.)

접수일자 : 1996년 2월 11일. 재접수일자: 1994년 3월 11일

* 학생회원, 인하대학교 대학원 선박해양공학과

** 정회원, 인하대학교 선박해양공학과

1. 서 언

선박에 부착되는 선저판(Keel Plate), 타(Rudder)등과 같은 부가물은 선박의 추진 또는 운동, 조종성능 등에 많은 영향을 준다. 최근에는 선박이 고속화됨에 따라 선체에 Fin과 같은 각종 부가물을 설치하여 선박의 저항, 추진 성능을 향상 시키기 위한 노력이 진행되고 있다. 그 중 Fin과 같은 선체 부가물은 선박의 저항성능뿐만 아니라, 최근 활발히 연구되고 있는 초고속선의 복합지방식 개발 등과도 밀접한 관계를 갖고 있다. 또한 선박 건조시 선주의 요구에 의하여 이러한 선체 부가물들이 부착되는 경우가 증가하고 있는 실정이다.

위와 같은 이유로 선체-부가물 주위의 유동에 대한 연구는 상당히 중요시되어 왔다. 이러한 선체-부가물 주위의 유동은 여러 가지 유동 현상이 복합된 상당히 복잡한 유동 형태를 가진다. 즉 선체 - 부가물 주위의 유동은 선박의 3차원 형상에 따른 유동의 변화, 부가물과 접합부 근처에서의 말굽 보오텍스(Horseshoe Vortex)의 형성 등의 특성을 갖는 접합부 유동, 그리고 Fin 끝에서의 영향 등이 서로 복합된 유동이라고 볼 수 있다. 그러나 지금까지는 선체와 부가물 각각에 대한 연구가 주로 이루어졌을 뿐이며[1], [2], [3], [4], 선체-부가물 주위, 그리고 그 접합부 주위의 유동장에 관한 연구는 아직까지 미진한 상태이다.

본 연구에서는 선체-부가물 주위의 점성유동을 수치계산을 통하여 연구하였다. $Rn = 1.0 \times 10^6$ 인 난류유동의 경우에 대하여 계산하였으며, 계산 대상 선형으로는 수식 선형인 Wigley 선형을 택하였다. 부가물은 실제 선박에 많이 응용되고 있는 날개단면(Foil)의 형태이며, 부가물의 위치 및 모양에 따라 다음과 같은 두 가지 계산조건을 택하였다. 즉, 선체에 선저판과 타가 부착된 경우와 두 개의 Fin이 선저와 30도의 각을 갖도록 선체에 부착된 경우이다.

이상의 연구를 통하여 선체에 부착된 부가물이 전체 유동장에 큰 영향을 미침을 보였으며, 정성적으로 만족할 만한 결과를 얻었다. 이에 따라 앞

으로 일반 선박의 타 또는 에너지질감을 위한 부가장치들과 고속선의 운동, 조종성능 향상을 위한 제어판 등의 유체역학적 특성해석 등에 본 수치해석방법이 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

2. 문제의 정식화

2.1 지배방정식

3차원 비정상, 비압축성, 점성유동에 관한 계산을 수행하기 위해 사용되는 지배방정식들은 Navier - Stokes 방정식과 연속방정식으로 정의되며, Cartesian 좌표계($x_i, i=1,2,3$)에서 U_0 (교란되지 않은 속도)와 L (특성길이)로 무차원 된 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial V_i}{\partial t} + V_j \frac{\partial V_i}{\partial x_j} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (1)$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\tau_{ij} = -P\delta_{ij} + \frac{2}{Rn} e_{ij}$$

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_j}{\partial x_i} + \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \right)$$

여기서, $Rn = U_0 L / \nu$ 이며 ν 는 동점성계수를 나타낸다. 위 식들을 물체적합좌표계($\xi_i, i=1,2,3$)로 변환하면.

$$\frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi^j} (A_k^j V_k) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial t} = \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi^j} (-A_k^j P \delta_{ik} + A_k^j \sigma_{ik}) \quad (4)$$

$$\sigma_{ik} = -V_i V_k + \frac{2}{Rn} e_{ik}$$

$$A_k^i = J \frac{\partial \xi^i}{\partial x_k}$$

와 같이 표현되며, 여기서 J 는 Jacobian, δ_{ij} 는 kronecker delta이다.

2.2 난류 모형

격자크기 이하의 난류유동 특성을 계산 과정에 고려하기 위하여 SGS(Sub-Grid Scale) 난류모형을 이용하였다. 이 때 u_{ij} 를 교란속도 성분이라 하면, Reynolds 응력 $\overline{u_i u_j}$ 는 다음과 같이 근사된다.

$$\overline{u_i u_j} = \frac{2}{3} \frac{\nu_s^2}{(0.094\Delta)^2} - 2\nu_s e_{ij} \quad (5)$$

여기서, Δ 는 filter의 폭으로써 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta = (\Delta x_1 \Delta x_2 \Delta x_3)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

Smagorinsky[5]에 의하면 SGS 와점성 계수 ν_s 는 아래와 같이 쓸 수 있으며,

$$\nu_s = L_s^2 (2 \overline{e_{ij}^2})^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

본 연구에서는,

$$L_s = \min(0.5\Delta x_2, 0.1\Delta)$$

로 근사하였고[6], 선체와 부가물 근처에서의 영향을 고려하기 위하여 Van Driest의 벽 감쇠함수(wall damping function)[7]을 사용하였다. 이에 따라

$$L_s = D_f \min(0.5\Delta x_2, 0.5\Delta x_3, 0.1\Delta) \quad (8)$$

$$D_f = [1 - \exp(-Y^+/A^+)]$$

$$A^+ = 26.0, Y^+ = y \cdot u^*/\nu$$

를 사용하였다.

3. 수치해석 방법

본 연구에서는 유한체적법(Finite Volume Method) [8]을 이용하여 비정상 Navier-Stokes 방정식을 차분화 하였다. 시간에 관해서는 전진차분법을, 공간에 관한 대류항은 QUICK (Quadratic Upstream Interpolation for Convection Kinematics)방법[9]을 이용하고, 그 밖의 공간에

관한 미분항 들은 2차 정도의 중심차분 또는 1차 정도의 전진차분법을 이용하여 차분하였다[10]. 속도와 압력의 연성을 위해서는 속도와 압력을 동시에 반복적으로 푸는 HSMAC방법[11]을 사용하였다.

3.1 격자계 및 경계 조건

유한체적법에서는 계산영역을 제어체적(Control Volume)으로 분할하고 각각의 제어체적 내에서 모든 물리량들이 보존되도록 미분방정식을 적분하여 이산화된 방정식을 얻는다.

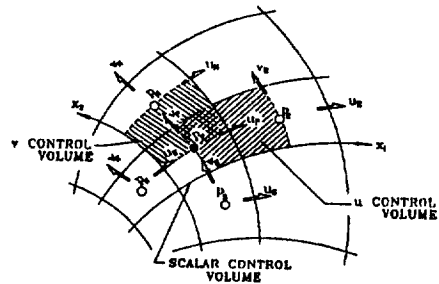
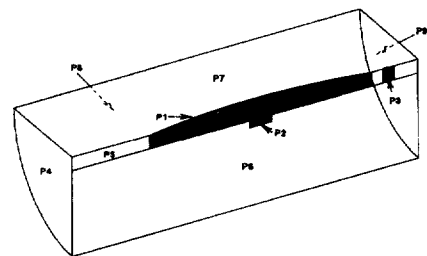
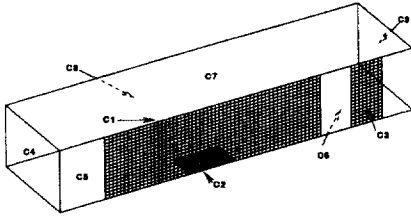


Fig. 1 Staggered grid system



(a) Physical Domain



(b) Computational Domain
Fig.2 Coordinate system and transfer
(Wigley-Keel Plate and Rudder)

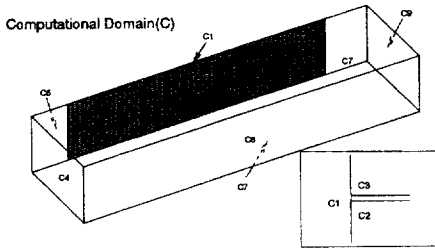
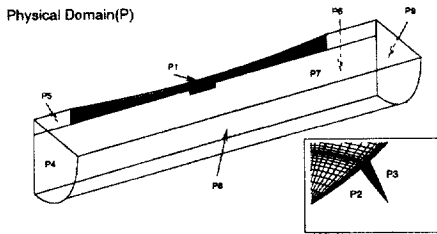


Fig.3 Coordinates system and transformation (Wigley-Fin)

이 때 사용된 격자계는 교차격자계(staggered grid system)로서 압력과 속도의 효율적인 연성을 위하여 Fig. 1 에 보인바와 같이 속도와 압력점을 서로 다른 점에 엇갈리게 정의한다.

선체주위의 유동장계산에 사용된 수치격자계의 형상으로는 Fig. 2,3과 같은 H-O형을 택하였다. 부가물의 종류에 따라 두 가지 경우에 대한 계산을 수행하였으며, 각 경우에 대한 물리영역과 계산영역의 대응관계를 Fig. 2,3에 도시하였다. 그림에서와 같이 부가물이 선저와 30도의 각을 갖고 있을 경우에는 경계면이 계산영역내에 놓이도록 하였다.

두가지 경우의 각 경계면에서의 경계조건들은 다음과 같다.

물체표면(C1, C2, C3)에서는 속도성분 $V_i = 0$ ($i = 1, 2, 3$), 압력의 법선방향성분 $P_n = 0$ 이 되도록 하였다. 유입 경계면(C4)에서 압력 경계조건으로는 $P_x = 0$, 속도는 $V_1 = 1$ 을 제외한 모든 속도성분들이 영이 되도록 하였다. 또한 대칭 경계면(C5, C6, C7)에는 속도, 압력의 법선방향 변화가 없다는 조건을 부가하였다. 측면경계(C8)에서는 압력은 0, 속도 $V_1=1, V_2=V_3=0$ 이 되도록 하였으며, 유출 경계면(C9)에서는 속도와 압력의 x방향 변화가 모두 0이라는 경계조건을 주었다.

4. 수치계산 및 결과

4.1 수치 계산

본 연구에서는 수식 선형인 Wigley선형에 여러 가지 부가물은 부착하여 그 주위의 유동장에 대한 수치계산을 수행하였다. 계산에 사용된 부가물의 종류는 선저판, 타, Fin이다. 부가물의 단면형상은 익단면의 형태를 , 길이 방향으로는 타원의 형상을 취하였다. 부가물이 부착된 계산선형의 형상으로는 다음과 같은 두 가지를 택하였다. 그 중 한 형상은 선저판과 타가 부착된 경우이고, 다른 형상은 Fin이 선저와 30도 각을 이루도록 부착된 경우이다. 앞으로 이들 형상을 편의상 각각 선형1, 2로 부른다.

계산 대상 선형인 Wigley 선형은 Cartesian 좌표계(x, y, z)에서,

$$\frac{y_s}{L} = \frac{1}{2(L/B)} \left[1 - \left(\frac{2x}{L} \right)^2 \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{z}{L} \right)^2 \left(\frac{L}{D} \right)^2 \right]$$

여기서, L=1, L/B=10, L/D=16과 같이 표현되며, 선저판 및 타 그리고 Fin의 횡단면 형상인 NACA 날개단면의 형상과 종단면 형상인 타원 형태는

$$y = \frac{t}{0.2} \left[1 - \left(\frac{z}{d} \right)^2 \right] \cdot \left[0.2969 \left(\frac{x+0.05}{l} \right)^{\frac{1}{2}} - 0.126 \left(\frac{x+0.05}{l} \right) - 0.3537 \left(\frac{x+0.05}{l} \right)^2 + 0.2843 \left(\frac{x+0.05}{l} \right)^3 - 0.1015 \left(\frac{x+0.05}{l} \right)^4 \right]$$

여기서,

- 선저판 : l/L=0.1, t=0.01, d/L=0.09375
(수선면 이하)
- 타 : l/L=0.05, t=0.006, d/L=0.125
(수선면 이하)
- Fin : l/L=0.1, t=0.006, d/L=0.06875
(비 경사시 수선면 이하)

의 수식을 이용하여 표현하였다. 타의 시작 위치는 선미 후방으로 배 길이의 0.05위치에 있으며, 선저판과 Fin은 중앙이 배 길이 방향으로 배의 중심과 일치하도록 하였다. 계산에 사용된 좌표계의 원점은 x축은 배의 중심을, y, z 축은 각각 대칭경계면과 수선면으로 하였다.

계산영역은 배 길이 방향으로는 선수 전방으로 배 길이의 반만큼, 선미 후방으로 선형 1, 선형2의 경우 각각 배 길이의 1.5, 2.0배만큼을 취하고, 폭 방향으로는 배 길이 만큼을 취하였다.

계산은 난류영역인 $Rn=1.0 \times 10^6$ 에 대해서 수행하였다.

계산에 사용된 격자는 선체 및 부가물에 가까운 곳에는 격자간격을 좁게 하여 집중시키고 멀어질수록 격자간격을 크게 하였으며, 물체 근처에서의 최소격자 간격은 2.3×10^{-4} 로 하였으며, 사용된 격자수는 선형1과 선형2 각각 ξ, η, ζ 방향으로 107 x 35 x 30, 89 x 35 x 43 개다.

Fig.4에는 생성된 선체 표면에서의 격자계를, Fig. 5에는 여러 횡단면에서의 격자계들을 보였다.

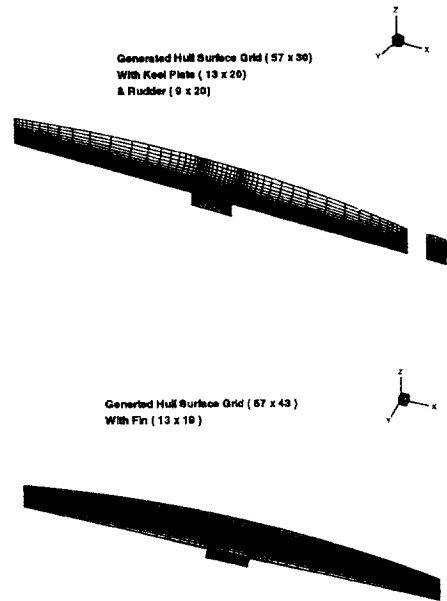


Fig. 4 Generated hull surface g (Upper : hull form 1, Lower : hull f

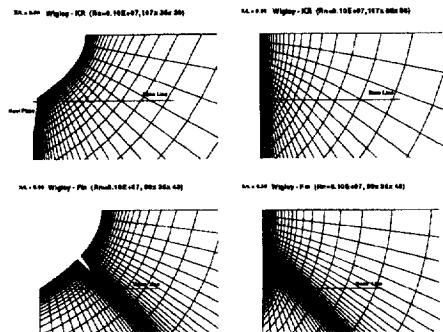


Fig. 5 Generated grid system (Cross-section , X/L = 0.0, 0.5

4.2 계산결과 및 고찰

- 선형 1. (Wigley with Keel Plate and Rudder)

Fig. 6,7은 선체와 부가물에서의 표면 압력분포를 보여주고 있다. 전체적으로 선형의 변화가 심한 선수와 선미에서 압력이 급격히 변화하고 있으며, 선저판 및 타의 앞부분에서 압력이 높아지는 현상을 보이고 있다. 선체에 부착된 타 및 선저판 주위의 압력분포를 정성적으로 잘 나타내주고 있는 것으로 보인다. Fig. 8은 수선면 상의 선체 표면에서의 압력계수(C_p)분포를 보이고 있으며, 선저판의 영향으로 중앙에서 C_p 값이 약간 내려가고 있음을 볼 수 있다. 또한 타의 존재로 인한 선미부의 압력 변화가 제대로 예측되고 있음을 알 수 있다. 즉 선미부에서의 압력 회복, 선체후방에서의 압력 하락, 그리고 타의 영향에 의한 압력 증가 등의 정성적인 경향을 보여주고 있다. Fig. 9는 수선면 상에서의 선미와 타 근처에서의 속도 벡터를 보이고 있으며, Fig. 10은 각 단면에서의 종방향 등속도 분포를 보이고 있다. 선저판에 의한 등속도 분포의 변화 및 선미에서의 영향 등을 보여주고 있다. Fig. 11은 위와 같은 단면에서의 속도 벡터를, 선저판과 선체가 만나는 부근에서의 vorticity 분포를 보여준다.

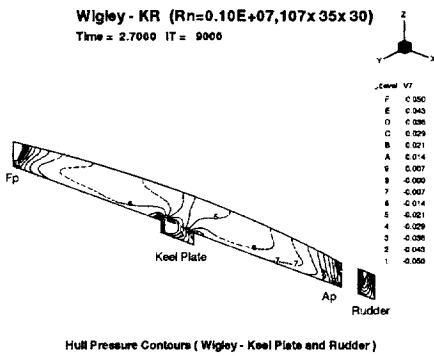


Fig. 6 Hull surface pressure distr (Hull Form 1)

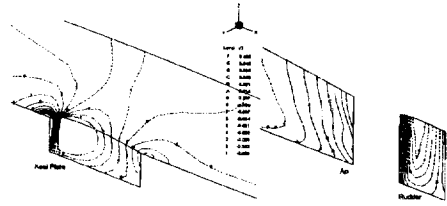


Fig. 7 Pressure distribution around appendages

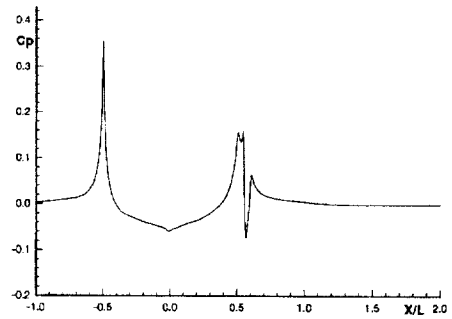


Fig. 8 Pressure coefficient along water line

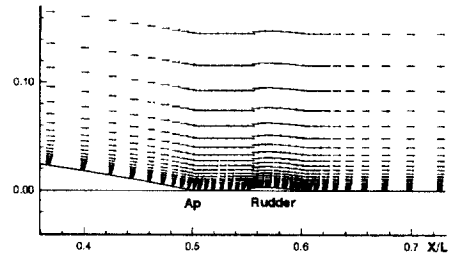


Fig. 9 Velocity vectors on the water-plane

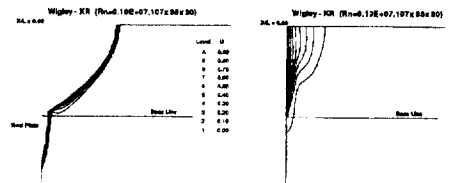


Fig. 10 U-velocity contours on a cross section ($X/L = 0.0, 0.5$)

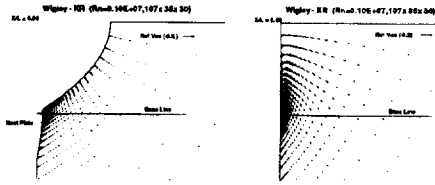


Fig. 11 Velocity vectors on vario cross section (X/L = 0.0, 0.5)

- 선형 2.(Wigley with Fin)

Fig. 12는 선체 표면에서의 압력 분포로 Fin에 의한 선체 표면에서의 압력 변화를 보이고 있다. Fig. 13은 수선면 상의 선체 표면에서의 압력분포로, 중앙부에서는 Fin의 영향으로 Cp값이 약간 내려가고 있음을 알 수 있으며, 그 영향은 Fig. 12에도 잘 나타나고 있다. Fig. 14는 Fin 표면에서의 압력 분포로서, Fin 아래 부분에서의 압력 분포가 윗 부분 보다 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이에 따라 부착된 Fin이 양력을 받고 있다. 선체의 기하학적 형상에 의하여 유동장이 Fin 앞쪽에서 약간의 각도를 갖고 들어온다는 것을 예측할 수 있다. Fig. 15는 선체 표면 근처에서의 속도 벡터 보여주고 있다. Fin과 선체의 영향으로 Fin 근처에서는 유동 속도가 국부적으로 가속되고 있으며, 이러한 현상은 접합부에서의 난류유동 특성[3]과 일치하는 것으로 보인다. 보다 정확한 계측을 위해서는 더 많은 격자를 Fin 주위에 집중시킬 필요가 있다.

Fig. 16은 각 단면에서의 종방향 등속도 분포로, Fin의 영향에 의해 선미에서의 Wake가 두꺼워졌음을 볼 수 있다. Fig. 17은 Fig. 16과 같은 단면에서의 속도 벡터장을 보이고 있으며, Fin 아래 부분에서의 vorticity 분포를 잘 보여주고 있다.

선형1, 2와 부가물이 부착되지 않은 Wigley선형의 선미에서의 반류 분포를 Fig. 18에서 비교하였으며, Fig. 19는 동일한 경우에 대한 선미에서의 유선을 3차원 형상으로 도시하여, 부가물이 선미 유동장에 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

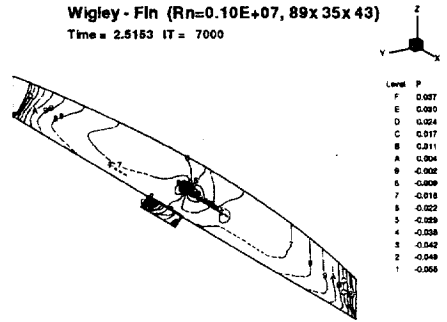


Fig. 12 Hull surface pressure distribution (Hull Form 2)

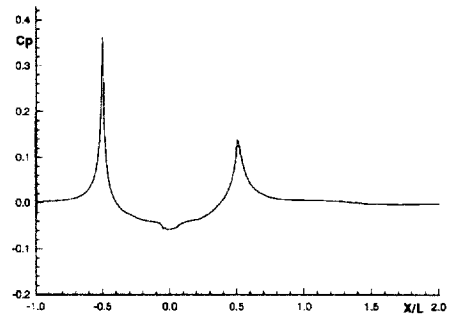


Fig. 13 Pressure coefficient along line

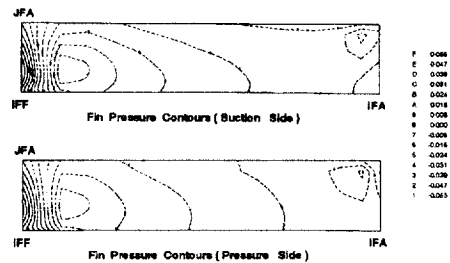


Fig. 14 Pressure distribution on surface (Upper : suction side, Lower : pressure side)

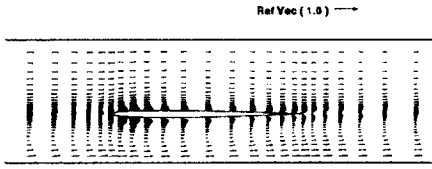


Fig. 15 Velocity vectors near h surface and fin

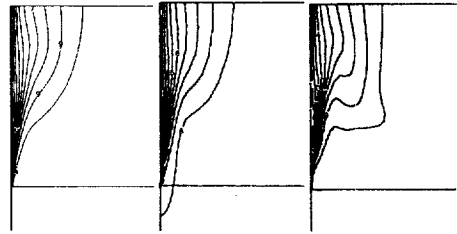


Fig. 18 Comparison of uniform U-velocity contours on a cross section (X/L=0.5

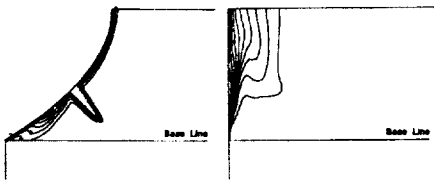


Fig. 16 U-velocity contours on a cross section (X/L = 0.0, 0.50

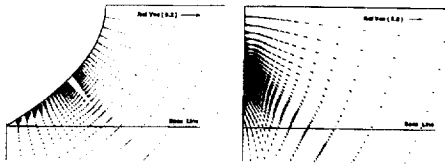


Fig. 17 Velocity vectors on vario cross section (X/L = 0.0, 0.50

5. 결 언

본 논문에서는 선체-부가물 주위의 난류유동장에 대한 수치해석을 수행하였다. 난류유동의 해석을 위한 지배방정식으로는 물체적합좌표계에서 표현된 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다. 수치계산을 위하여 지배방정식은 유한체적법을 이용하여 차분화 하였다.

부가물이 부착된 Wigley 선형주위의 난류유동을 $Rn=1.0 \times 10^6$ 에서 계산하였으며 그 계산결과를 검토하여 부가물의 종류에 따른 두 가지 계산을 통하여 본 계산 조직이 선체 - 부가물 주위의 난류유동 현상을 제대로 예측할 수 있음을 보였다.

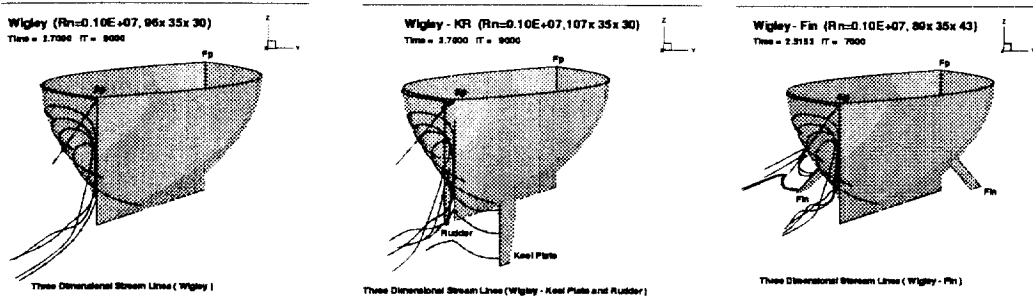


Fig. 19 Comparison of three dimensional streamline

본 계산 조직은 선박의 타 및 고속선 등의 운동, 조종 성능 향상을 위한 제어판 등의 유체역학적 특성 해석에 유용하게 사용될 수 있으며, 또한 잠수함, 어뢰 등의 Conning Tower 등의 유동 특성 해석 등에도 활용 될 수 있을 것이다.

앞으로 복합 지지형 초고속선 등과 같은 다수의 부가물이 복합적으로 부착된 선체주위의 유동 해석을 위한 계산조직 및 수치격자생성법의 연구가 필요하며, 계산조직을 자유수면을 포함한 선체주위의 유동장을 계산할 수 있도록 확장할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 인하대학교의 1995년도 교내연구 연구비 지원으로 이루어졌다. 연구지원을 하여준 인하대학교에 심심한 사의를 표한다.

참 고 문 헌

[1] Larsson L., Partel V. C. and Dyne G., Proceedings of 1990 SSPA-CTH-IIHR Workshop on Ship Viscous Flow, Flowtech Int. Report No 2., 1991.
 [2] Mori K.H., Proceedings of CFD Workshop, Tokyo, Japan, 1994.
 [3] Ohasih, K.M and Chen, C.J., "Prediction of Laminar and Turbulent Flow a Past Single and Twin Hydrofoils", IIHR Report No. 317, Iowa Univ., 1987
 [4] Sun-Yong Kim, "A Study on the Flow around a Strut Mounted on the Plate", P.H. Thesis, Hiroshima Univ., 1993

[5] Smagorinsky J., Manebe S. and Hollowat J.L., "Nmerical Results from a Nine-Level General Circulation Model of the Atmosphere", Monthly Weather Review, 93, Dec., 1965.
 [6] Takakura Y., Ogawa S., and Ishiguro T., "Turbulence Model for Transonic Viscous Flow", AIAA paper No, 89-1952 CP., 1989.
 [7] Van Driest, E.R., "On Turbulent Flow Near a Wall", Jour. Aero. Sci., Vol.123, pp 1007-1011, 1954
 [8] Warsi, Z.U.A., "Conservation Form of the Navier-Stokes Equations in General Nonsteady Coordinates", AIAA J., Vol. 19, No. 2, 1981
 [9] Leonard, B.P., "A Stable and Accurate Convective Modeling Procedure Based Quadratic Upstream Interpolation", Computational Methods Appl. Mech. Eng. 19, 1979
 [10] Kang K. J., "Numerical Simulations of the Viscous Flows around Ships in a Generalized Coordinate System", PH Thesis, Inha Univ. Korea, 1991
 [11] Nichols, B.D., Hirt, C.W. and Hotchkiss, R.S., "SOLA-VOF: A Solution Algorithm for Transient Fluid Flow with Multiple Free Boundaries", Los Alamos Scientific Laboratory Report, LA-8355, 1980
 [12] Kang, K.J., Park, Y.J. and Cho, K.J., "Study on the Differencing Scheme For Convection Terms of the 2-Dimensional Navier-Stokes Equation", Proc., SNAK Spring Meeting 1991.
 [13] Hayase, T., Humphrey, J.A.C. & Greif, R., "A Consistently Formulated QUICK Scheme for Fast and Stable Convergence Using Finite-Volume Iterative Calculation Procedures", JCP. Vol 98, 1992