

선체주위 난류유동장의 해석에 관한 연구

A Study on Turbulent Flow Fields around Ships

박 종진¹, 이 승희²
J.J. Park and S.H. Lee

Three dimensional turbulent flow fields around ships are simulated by a numerical method. Reynolds Averaged Navier-Stokes equations are used where Reynolds stresses are approximated by Baldwin-Lomax and Sub-Grid Scale(SGS) turbulence models. Body-fitted coordinate system is introduced to conform three dimensional ship geometries.

The governing equations are discretized by a finite volume method. Temporal derivatives are approximated by the forward differencing and the convection terms are approximated by the QUICK or Kawamura scheme. The 2nd-order centered differencing is used for other spatial derivatives. Pressure and velocity fields are simultaneously iterated by the Highly Simplified Marker-And-Cell method.

To verify the numerical method and turbulence models, flow fields around ships are simulated and compared to the experiments.

1. 서 론

자유수면상을 항주하고 있는 선체주위의 유동장은 파도와 점성유동이 상호 작용하는 복잡한 물리적 특성을 지니고 있다. 특히 선미부에서는 경계층의 박리와 빌지 보오텍스의 발생 등과 같은 복잡한 유동현상이 나타나기 때문에 선미의 난류유동장에서 작동하고 있는 추진기, 타 또는 선체 부가물 들의 특성을 파악하고 이를 선박설계에 적용하려면 선체주위의 유동현상을 상세히 이해하고 있어야 한다.

과거에는 선체주위의 유동장을 경계층이론에 의하여 해석하고자 하는 노력이 진행되어 왔으나 경계층이 비교적 얇은 경우에만 타당한 결과를 줄 뿐이고, 경계층이 두꺼워지는 뚱뚱하고 복잡한 기하학적인 형상의 물체에는 적용이 곤란한 경우가 많으며, 따라서 최근에는 고속전산기의 급격한 발달에 따라, 3차원 Navier-Stokes 또는 RANS방정식을 이용하여 점성유동장을 해석하는 것이 일반적인 경향이다.

최근, 수치해석 결과를 비교할 수 있는 실험결과들이 Wigley, Series 60 및 HSA 선형 등에 대하여 발표된 이후[1, 2, 3], 선체주위의 유동계산은 주로 이들 선형을 대상으로 수행되어 왔다. 1990년 SSPA-CTH-IIHR이 공동주최한 Workshop[4]에서는 HSA 와 Mystery 선형주위의 난류유동 특성에 대한 수치계산 결과 들에 대한 토의가 있었다. 그 계산결과 들을 보면 대체로 선체 주위의 전체적인 유동현상은 비교적 잘 예측하고 있으나 대부분의 결과 들이 대상 선형의 실험결과에서 볼 수 있는 선미유동 특성인 'hook' 현상을 재현하지 못하였다. 그 원인으로는 차분법상의 문제, 격자계의 부정확성, 부적절한 난류모형 등이 지적되었다. 그 후 Deng et. al.[5]은 일련의 수치계산을 통하여 위에 언급한 원인들 중 난류모형이 가장 큰 영향을 미치고 있음을 보이고 기존의 난류모형을 개선하면 'hook' 현상을 예측할 수 있음을 보였다.

1994년 Tokyo에서 일본 SRI가 주최한 CFD Workshop [6]에서는 Series 60 및 HSA 선형주위의 난류유동장에 대한 수치계산 결과들이 발표되어 실험 및 다른 결과 들과 비교, 검토되었다. 이 때 발표된 대부분의 수치계산 결과들은 난류모형의 개선 및 Reynolds 응력 closure model 등의 사용으로 이전보다 개선된 결과를 보였다. 그러나 Abdallah et. al.[6] 등은 수치해석 기법상의 문제점에 더 비중을 두는 등 아직 확실한 원인이 밝혀지지 못하였으므로 앞으로 이 부분에 대한 더 많은 계산 및 검토가 필요한 것으로 보인다.

본 연구에서는 HSA와 Mystery 선형에 대한 계산을 통하여 수치해석법 및 난류모형을 비교, 검토하였으며 궁극적으로는 계산정도가 높은 수치해석법을 개발함으로써, 선수를 포함한 선체 주위의 난류유동장을 해석할 수 있는 능력을 확보함을 그 목적으로 하였다.

1. 인하대학교 대학원 선박공학과(402-751, 인천시 남구 용현동 253, Tel: 032-860-8385)

2. 인하대학교 선박해양공학과(402-751, 인천시 남구 용현동 253, Tel: 032-860-7337)

2. 문제의 정식화

2.1 지배방정식

난류유동을 Navier-Stokes 방정식으로 예측할 수는 있지만, 난류유동을 시간과 공간상의 모든 점에서 동시에 묘사한다는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 Reynolds의 평균유동 개념을 이용하여 속도 벡터 V_i 와 압력 P^* 를 각각 시간평균성분(mean) U_i , P 와 시간에 따른 변화량, 즉 교란성분 (fluctuation) u_i , p 로 나누어 쓰면 평균속도에 대한 방정식인 Reynolds 방정식이 얻어진다. 즉,

$$\begin{aligned} V_i &= U_i + u_i \\ P^* &= P + p \end{aligned} \quad (1)$$

라고 하면

물체적합좌표계 $\xi_i (i = 1, 2, 3)$ 에서 지배방정식들은 다음과 같이 표현된다.

연속방정식

$$\frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi^i} (S^i_j V^j) = 0 \quad (2)$$

Reynolds 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial U^j}{\partial t} &= -\frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi^i} (S^i_k P \delta^{jk}) - \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi^i} (S^i_k U^k U^j) \\ &\quad + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi^i} (S^i_k \frac{2}{Rn} \Sigma_{ik} + S^i_k \overline{u_i u_k}) \end{aligned} \quad (3)$$

When

$$\Sigma_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right), \quad S^i_j = J \frac{\partial \xi^i}{\partial x_j} \quad (4)$$

여기에서 J 는 Jacobian, δ_{ij} 는 Kronecker delta를 뜻하며, $\overline{u_i u_j}$ 는 Reynolds 응력 tensor로서, 이 응력성분들 자체는 미지수이며 원래의 Navier-Stokes 방정식으로 부터는 더 이상의 방정식을 도출해 낼 수 없기 때문에 Σ_{ij} 와 Reynolds 응력사이의 관계를 모형화하여 계산을 수행할 수밖에 없다.

2.3 난류모형

레이놀즈 응력 $\overline{u_i u_j}$ 을 근사하기 위한 난류모형으로는 Baldwin-Lomax[7] 와 SGS(Sub-Grid Scale)모형을 사용하여 난류모형의 차이가 선미유동에 미치는 영향을 비교하였다.

Baldwin-Lomax모형으로는 Cebeci-Smith모형에서 변형된 것을 수정없이 사용하였으며, SGS모형은 다음과 같다.

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

여기서, Δ 는 filter의 폭을 뜻하며 다음과 같이 정의된다.

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

Smagorinsky[8]에 의하면 SGS 와점성 계수 ν_s 는 아래와 같으며

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

여기에서,

$$L_s = 0.5 \min (\Delta x_1 \Delta x_2 \Delta x_3) \quad (8)$$

로 근사할 수 있다[9].

3. 수치해석 방법

본 연구에서는 유한체적법(Finite Volume Method) [10]을 선택하여 비정상 RANS방정식을 이산화하였다. 시간에 관한 미분항은 전진차분법을, 해의 안정성에 큰 영향을 미치는 대류항은 QUICK[11] 또는 Kawamura-Kawahara [12] 방법을 이용하여 차분하였다. 그외의 공간에 관한 미분항들은 2차 정도의 중심차분 또는 1차 정도의 전진차분법을, 압력의 연성을 위하여는 속도와 압력을 동시에 반복적으로 푸는 HSMAC(Highly Simplified MAC) [13]방법을 사용하였다.

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

이때 사용된 격자계는 교차격자계(staggered grid system)로서 압력과 속도의 효율적인 연성을 위하여 Fig. 1에 보인바와 같이 속도와 압력을 서로 다른점에서 엇갈려 정의한다.

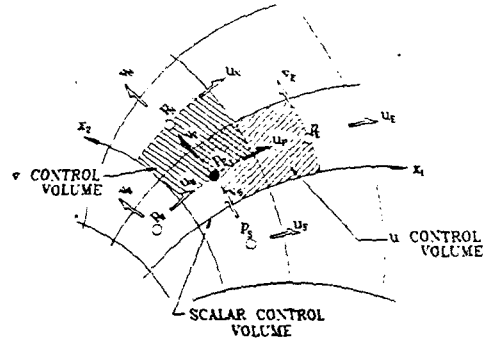


Fig. 1 Staggered grid system

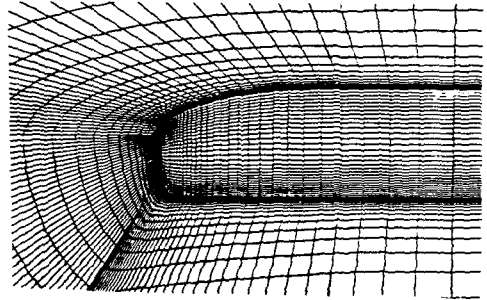


Fig. 2 Generated grid system (C-0 TYPE)

3.1 경계조건

선체 주위의 유동장 계산에 사용된 수치격자계의 형상으로는 선수부에서의 계산정도를 향상시키기 위하여 Fig. 2과 같은 C-0형을 택하였다.

본 연구에서는 선체 주위의 점성유동장을 계산할 때에 자유수면의 영향을 무시하고 있으므로 즉, 선체를 이중 모형으로 근사하고 있으므로 선체 주위의 유동은 교란되지 않은 정수면에 대하여 대칭된다고 볼 수 있다. 이때 각 경계면에서 만족되어야 할 경계조건은 아래에 보인 바와 같다.

선체표면에서는 속도성분 $v_i = 0$, 압력의 법선방향성분 $P_n = 0$ 이라는 조건을 주었다. 대칭경계면 ($\xi=1, \xi=-1, \xi=\xi_{max}$)에서는 속도, 압력의 법선방향미분치가 모두 0이 된다는 조건을 부가하였다.

측면 경계면 ($\eta=\eta_{max}$)에서는 압력은 0, 속도 $v=1$, $v=0$ 이라는 조건을 주었다. 유출경계면에서는 속도와 압력의 변화가 모두 0이라는 Neumann조건을 주었다.

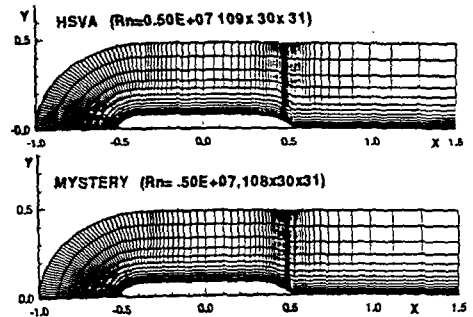


Fig. 3 Generated grid system (Waterplane View)

4. 계산조건 및 결과

4.1 계산 조건

본 연구에서는 선체주위의 난류 유동장의 계산을 위한 수치해석법 및 계산에 적용된 난류모형들에 대한 검증을 수행하고 수치해석법의 유용성을 알아보기 위하여 HSVA와 Mystery선형에 대한 계산을 수행하였다.

계산영역은 배 길이방향으로는 선수전방으로 배 길이의 반 만큼, 선미후방으로 배 길이만큼을 취하고, 반경방향으로는 배 길이의 1/2을 취하였다. 계산은 난류영역인 $Rn=5.0 \times 10^6$ 에 대해서 수행하였다.

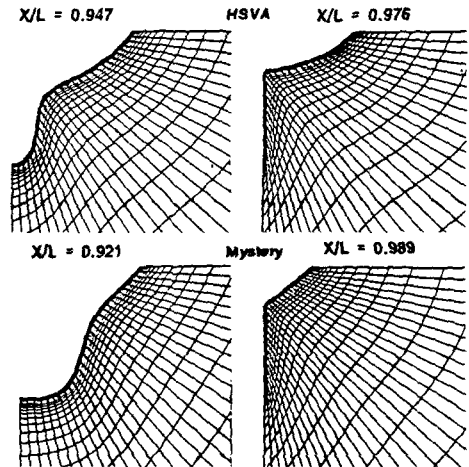


Fig. 4 Generated grid system (Sectional View)

계산에 사용된 격자는 선체에 가까운 곳에는 격자간격을 좁게하여 집중시키고 선체에서 멀어질수록 격자간격을 크게하였다. 계산에 사용된 격자에서는 선체가 가까이 있는 격자의 η 방향 최소간격을 $T_{min} = 5 \times 10^{-5}$ 로 하였다. 사용된 격자는 HSV4와 Mystery선형 각각 ξ, η, ζ 방향로 $109 \times 30 \times 31, 108 \times 30 \times 31$ 개를 사용하였다. Fig. 3에서는 수평면상에서의 격자계를 Fig. 4에서는 횡단면상에서의 격자계들을 보이고 있다.

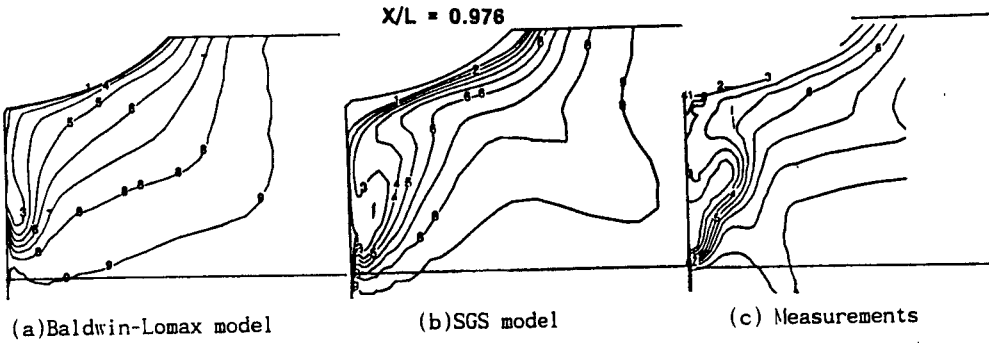


Fig. 5 Comparison of uniform U-velocity contours on cross section (HSVA)

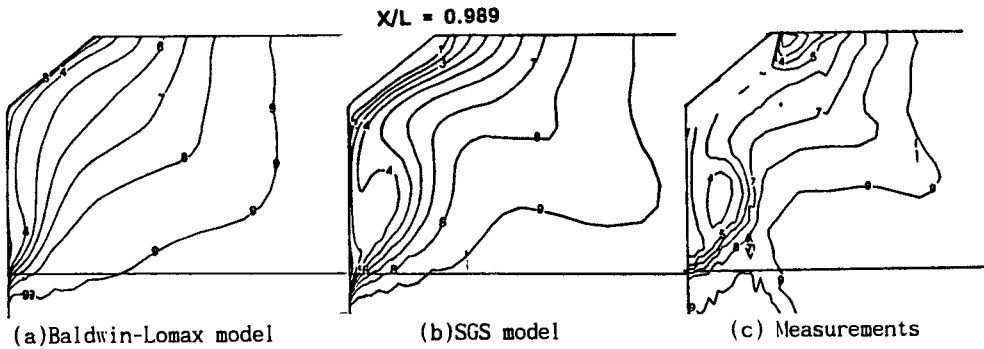


Fig. 6 Comparison of uniform U-velocity contours on cross section (Mystery)

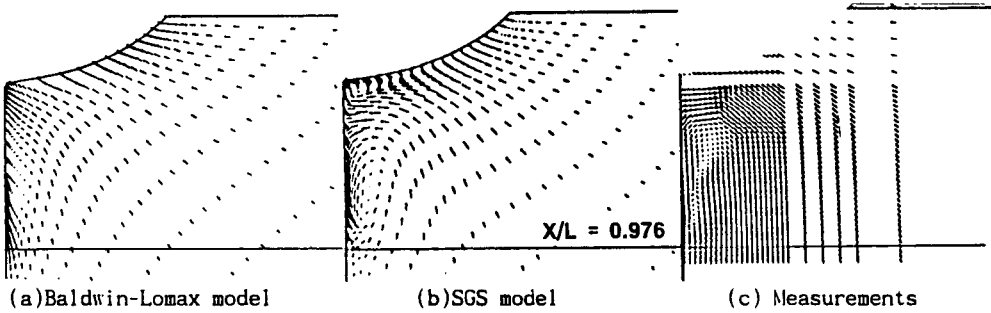


Fig. 7 Comparison of velocity vectors on cross section (HSVA)

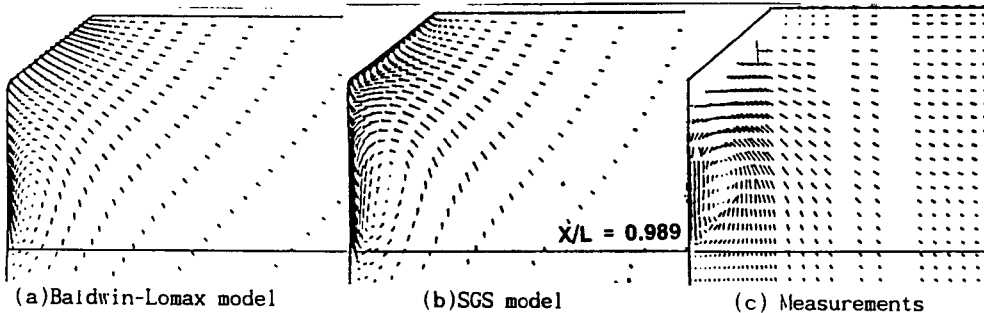


Fig. 8 Comparison of velocity vectors on cross section (Mystery)

4.2 계산결과 및 고찰

Fig. 5, 6은 단면에서의 종방향 등속도 분포를 보여주고 있다. 같은 위치에서의 실험결과 등과 비교해 볼 때 전체적으로 유사한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그러나 Baldwin-Lomax모형의 경우에는 대상선형과 같이 선미가 L형인 선형에서 볼 수 있는 유동특성인 'hook' 형태를 제대로 예측할 수 있었으나, SGS모형을 사용하면 보다 개선된 결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 7, 8은 위와 같은 단면에서의 속도 벡터를 실험값과 비교하였다. 계산된 와류의 중심이 실험값과 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 특히 선미형상이 L형에 가까운 Mystery선형에서는 와류가 더욱 강하게 일어남을 알 수 있다.

Fig. 9, 10은 선체의 수선과 기저선에서의 압력계수를 나타낸다. HSVA선형의 경우 정성적인 경향은 실험값과 일치하고 있고, 최저 압력의 경우 계산결과가 실험값에 비하여 약간 높은 경향을 보이고 있다. 이에 비해 Mystery선형의 경우는 실험결과와 보다 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 대체로 Baldwin-Lomax모형을 사용한 경우에 선미에서의 압력회복이 더 빠른 경향을 보이고 있다.

Fig. 11은 선체표면에서의 압력분포를 실험값과 비교하고 있다. 3차원의 선체표면을 $x^* = x, y^* = 1.5\sqrt{2}(y+z)$ 식을 통하여 2차원으로 전개하였다. 이 그림에서는 선형의 변화가 심한 선수와 선미부에서 압력의 변화가 급격히 일어남을 보여주고 있다. 또한 선미의 형상이 변함에 따른 압력분포의 변화를 보여주며, 두 모형 모두 Mystery선형이 HSVA선형의 경우보다 선미에서의 압력분포가 더 낮은 형태를 보이고 있다.

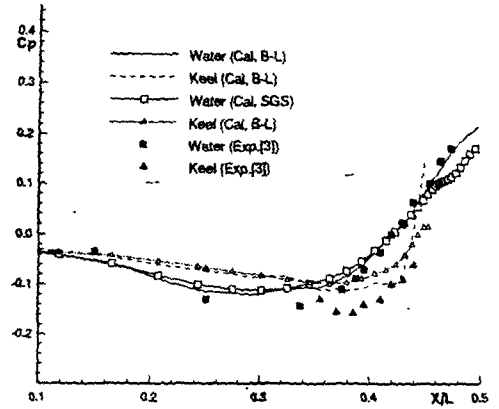


Fig.9 Pressure coefficient along water and keel line (HSVA)

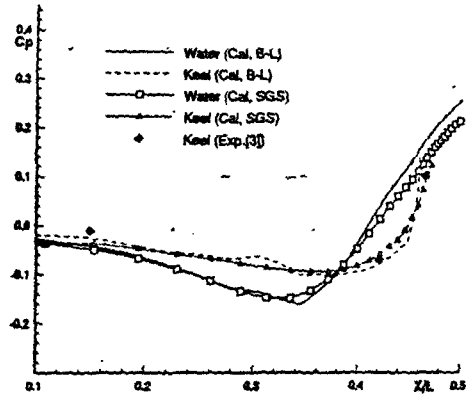


Fig.10 Pressure coefficient along water and keel line (Mystery)

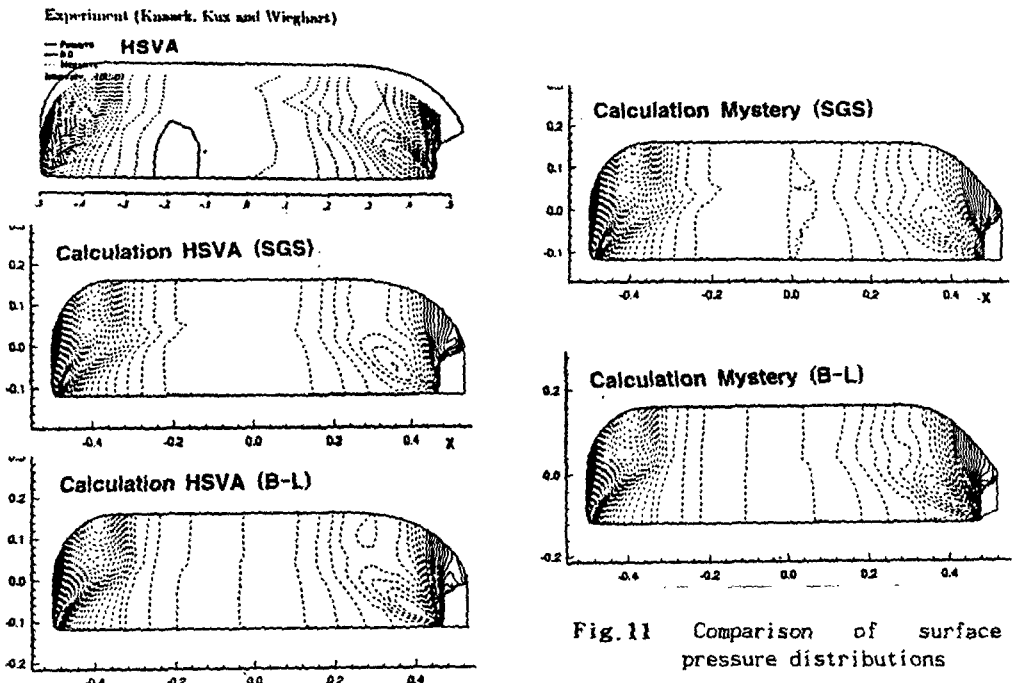


Fig.11 Comparison of surface pressure distributions

5. 결 론

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

수치해석법 및 난류모형의 검증은 위하여 HSA와 Mystery 선형주위의 난류유동을 $Rn=5.0 \times 10^6$ 에서 계산하였다. 그 계산결과를 실험결과와 비교, 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 두 선형의 계산결과를 실험결과와 비교하고 선미형태의 변화에 따른 유동장의 변화를 정성적으로 예측할 수 있음을 보였다.

(2) 난류모형의 비교를 통하여 SGS모형은 계속적인 검증이 필요하겠지만 본 계산에 적용해 본 결과에 의하면 적어도 정성적으로는 유용하게 사용될 수 있는 것으로 보인다.

(3) 앞으로 더 많은 수치계산을 통해 본 계산의 검증 및 난류모형의 비교, 검토가 계속 이루어져야 할 것이다.

(4) 또한 본 계산조직을 확장하여 자유수면, 부가물등을 포함한 선체 주위의 유동장을 계산할 수 있도록 확장시킬 필요가 있다.

참 고 문 헌

- [1] Wieghart K. & Kux J., "Nomineller Nachstrom auf Grund von Windkanal ver suchen," *Jahrbuch der Schiffbautechnischen, Gesellschaft(STG), Springer Verlag*, 1980.
- [2] Knnack T., "Laser-Doppler Velocity Measurements on a Double Model of a Ship in a Wind Tunnel," (in German) Inst. Schiffbau, Univ. Hamburg, Report 439, 1984.
- [3] Hoffman H. P., "Investigation of the 3-Dimensional Turbulent Boundary Layer on a Double Model of Ship in a Wind Tunnel," (in German) Inst. Schiffbau, Uni., 1976.
- [4] 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.
- [5] Deng G. B., Queutey P. and Visonneau M., "Navier-Stokes Computations of Ship Stern Flows: A Detailed Comparative Study of Turbulence Models and Discretization Schemes", Proc. 6th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Iowa City, IA, USA, 1993
- [6] Mori K.H., *Proceedings of CFD Workshop*, Tokyo, Japan, 1994.
- [7] Baldwin, B.S & Lomax, H., "Thin Layer Approximation and Algebraic Model For Separated Turbulent Flows", AIAA Paper 78-257, 1978
- [8] Smagorinsky J., Manabe S. and Hollowat J.L., *Americal Results from a Nine-Level General Circulation Model of the Atmosphere*, Monthly Weather Review, 93, Dec., 1965.
- [9] Takakura Y., Ogawa S., and Ishiguro T., *Turbulence Model for Transonic Viscous Flow*, AIAA paper No. 89-1952 CP., 1989.
- [10] Warsi, Z.U.A., "Conservation Form of the Navier-Stokes Equations in General Nonsteady Coordinates", *AIAA J.*, Vol. 19, No. 2, 1981
- [11] Leonard, B.P., "A Stable and Accurate Convective Modeling Procedure Based Quadratic Upstream Interpolation", *Computational Methods Appl. Mech. Eng.* 19, 1979
- [12] Kawamura T. and Kuwahara K., "Computation of High Reynolds Number Flow around a Circular Cylinder with Surface Roughness", AIAA Paper, No. 81-0112, 1981
- [13] 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