

# 대수응력 난류 모델의 선체주위 점성유동해석에의 적용

오 건 제\*<sup>1</sup>, 최 정 은\*<sup>2</sup>

## Application of Algebraic Stress Model to the Calculation of the Viscous Flow around a Ship

K.J. Oh and J.E. Choi

The flow around a ship is complex, especially, at the stern region of a full ship, where highly curved streamlines, hook-shaped iso-velocity contours, and strong secondary flow exist. To resolve this complex flow, an Algebraic Stress Model(ASM) is applied. The calculations are performed for the HSVA Tanker. The results are improved comparing with those of standard  $k-\epsilon$  turbulence model, but still show a little difference from the experiments.

**Key Words:** 대수응력모델(Algebraic stress model), HSVA tanker

### 1. 서 론

선체주위의 유동은 복잡하다. 특히 저속 비대선의 경우 선미부분의 급격한 선형의 변화로 인한 유선의 변화, hook형태의 축방향 속도등고선 및 강한 2차유동(secondary flow) 현상이 나타난다. 우수한 성능의 선형을 개발하기 위하여 이러한 선체주위 유동에 대한 이해가 필요하다. 이를 위하여 선체주위의 유동해석에 대한 실험적[1,2,3] 혹은 수치적 해석 방법[4,5]이 활용되고 있다. 그러나 최근 2차례에 걸친 CFD Workshop[6,7]의 계산결과를 살펴보면 대부분이 선미에서 일어나는 정성적인 유동 특성은 잘 나

타내주고 있지만 저속비대선에 나타나는 hook 현상을 제대로 해석하지 못하고 있다. 이러한 차이를 보이는 이유는 수치해석 방법상의 여러 가지 문제 때문일 수 있지만 난류모델 측면에서 보면 2차례의 CFD workshop[6,7]에서 가장 많이 사용된 와점도 난류모형이 선미 주위의 복잡한 유동을 합리적으로 예측하기에 적합하지 않기 때문으로 생각할 수 있다.

본 연구에서는 유선의 곡률이 심하거나 보텍스(vortex)가 형성될 경우에 장점이 있는 대수응력모델(Algebraic Stress Model)을 사용하여 선체 주위의 점성유동을 해석하였다. 계산대상은 HSVA Tanker이며 프로펠러 평면에서의 계산결과를 표준  $k-\epsilon$  모형에 의한 결과 및 실험결과와 비교하였다.

\*<sup>1</sup> 경남대학교 기계공학과

\*<sup>2</sup> 정회원, 현대중공업(주) 유체연구실

## 2. 지배방정식 및 경계조건

### 2.1 지배방정식

지배방정식은 연속방정식과 운동량방정식이며 배의 길이( $L_{PP}$ ), 속도( $U_0$ ) 및 밀도( $\rho$ )에 대해 무차원화 된 식은 Fig.1과 같은 우수 직교좌표계를 사용하면 아래와 같이 표현된다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{DU_i}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{1}{Re} \frac{\partial U_i}{\partial x_i} - \overline{u_i u_i} \right) \tag{2}$$

여기서  $U_i$  ( $i=1,2,3$ ) 및  $P$ 는 평균속도 및 평균 압력이며  $\overline{u_i u_j}$ 는 레이놀즈 응력이다.

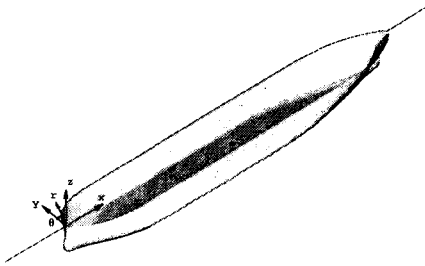


Fig. 1 Coordinate system

레이놀즈 응력은 아래 (3)식의 난류운동에너지( $k$ ) 방정식, (4)식의 난류운동에너지 소산률( $\epsilon$ ) 방정식, (5)식의 대수응력방정식을 함께 해석하여 구하게 된다[8,9,10].

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ C_k \frac{k^2}{\epsilon} \frac{\partial k}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] - \overline{u_i u_i} \frac{\partial U_i}{\partial x_i} - \epsilon \tag{3}$$

$$\frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ C_\epsilon \frac{k^2}{\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] - C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \overline{u_i u_i} \frac{\partial U_i}{\partial x_i} - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} \frac{\overline{u_i u_j}}{k} (G - \epsilon) &= G_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \epsilon - C_1 \frac{\epsilon}{k} \\ (\overline{u_i u_j} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k) - C_2 (G_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} G_k) &+ \pi'_{ij,1} + \pi'_{ij,2} \end{aligned} \tag{5}$$

여기서  $G_{ij}$ 는 생성항이며  $\pi'_{ij,1}$  및  $\pi'_{ij,2}$ 는 벽효과를 나타내는 항으로 아래와 같이 표현된다.

$$G_{ij} = -\left( \overline{u_i u_i} \frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \overline{u_j u_i} \frac{\partial U_i}{\partial x_i} \right) \tag{6}$$

$$G = -\frac{1}{2} (G_{11} + G_{22} + G_{33}) \tag{7}$$

$$\begin{aligned} \pi'_{ij,1} &= C_1 \frac{\epsilon}{k} (\overline{u_i u_m} n_m n_j \delta_{ij} - \frac{3}{2} \overline{u_i u_i} n_i n_j) \\ &- \frac{3}{2} \overline{u_i u_j} n_i n_j f(\lambda/n_i r_i) \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} \pi'_{ij,2} &= C_2 (\pi_{\epsilon m,2} n_m n_j \delta_{ij} - \frac{3}{2} \pi_{i\ell,2} n_\ell n_j) \\ &- \frac{3}{2} \pi_{j\ell,2} n_\ell n_j f(\lambda/\ell_n) \end{aligned} \tag{9}$$

식(8)과 (9)에 표시된 함수  $f$ 는 관류동의 경우에 적용되는 함수를 사용하였으며  $n_i$ 와  $\ell_n$ 은 선체표면에 수직인 단위벡터 및 수직거리이고  $\lambda$ 는 특성 길이를 갖는 값이다[10].

난류운동에너지방정식, 난류운동에너지소산률방정식, 대수응력방정식에 나타나는 계수들은 아래와 같다.

$C_k$	$C_\epsilon$	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	$C_1$	$C_2$	$C_1'$	$C_2'$
0.09	0.07	1.44	1.92	1.8	0.6	0.5	0.3

### 2.2 경계조건

수치계산을 효율적으로 한다는 측면에서 선체의 후반부만 계산하였다. 상류경계면은 선체의 중간부에 위치하고 상류경계면에서의 경계조건은 표준  $k-\epsilon$  난류모델의 계산결과를 이용하였다. 하류경계면에서의 경계조건은 Neumann조건( $\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$ )을 사용하였다. 선체표면에서의 경계조건은 벽법칙 관계식을 이용하였다[11]. 바깥 경계면에서의 경계조건은 균일 유동으로 가정하였다. 대칭면 및 후류중심선에서의 경계조건은 대칭조건을 사용하였다.

## 3. 수치해석방법

식(5)의 대수응력방정식을 효과적으로 풀기 위하여 pseudo eddy viscosity( $N_i = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ )를

사용하였다. 즉 레이놀즈 응력을 아래와 같이 가정하면

$$-\overline{u_i u_t} = N_t \frac{\partial U_i}{\partial x_t} + (R_t)_{it} \quad (10)$$

지배방정식 (2), (3)과 (4)는 아래와 같이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_i}{\partial t} + U_t \frac{\partial U_i}{\partial x_t} = & -\frac{\partial P}{\partial x_i} \\ & + \frac{\partial}{\partial x_t} [(\nu + N_t) \frac{\partial U_i}{\partial x_t} + (R_t)_{it}] \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_t} [(\frac{N_t}{\sigma_k} + \nu) \frac{\partial k}{\partial x_t}] \\ - \overline{u_i u_t} \frac{\partial U_i}{\partial x_t} - \varepsilon \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_t} [(\frac{N_t}{\sigma_\varepsilon} + \nu) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_t}] \\ + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \overline{u_i u_t} \frac{\partial U_i}{\partial x_t} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서  $(R_t)_{it}$ 은 residual tensor이다. 식(12)과 (13)에 나타나는 계수  $\sigma_k$ 와  $\sigma_\varepsilon$ 의 값은 1.0과 1.2이다. 대수응력방정식 (5)는 대각선 항과 비대각선 항을 분리하여 계산하였다.

지배방정식을 수치해석하기 위해서 검사체적에 기초한 유한체적법[12]을 사용하였으며 비선형항인 대류항을 처리하기 위하여 QUICK 수치기법을 사용하였다[13]. 속도-압력은 수정은 SIMPLE방법을 사용하였다[12].

#### 4. 계산 결과 및 검토

계산은 모형선 레이놀즈 수에 대하여 수행하였으며 프로펠러 평면( $x=1.007$ )에서의 유동현상을 표준 k- $\varepsilon$  모델에 의한 결과 및 실험결과와 비교하였다. 계산 격자계는 각 단면의 x-축좌표가 일정한 O-H 형태로 타원형 격자생성법을 사용하였다(Fig. 2).

프로펠러 평면에서의 축방향속도 등고선을 Fig. 3에 나타내었다. 실험에서 나타나는 가장 특징적인 현상은 프로펠러 평면에서 형성되는 hook 현상이다.

즉, 대칭면 부근에서,  $(y, z)=(0.0, -0.04)$ , 저속 영역이 형성되고 선체 부근의 경계층과 만나면서 속도의 등고선이 S자 형을 가진 현상을 보여주고 있다. 이러한 현상은 프로펠러 평면에서 형성되는 보텍스 때문에 발생하는 것으로 생각된다. 계산결과를 보면

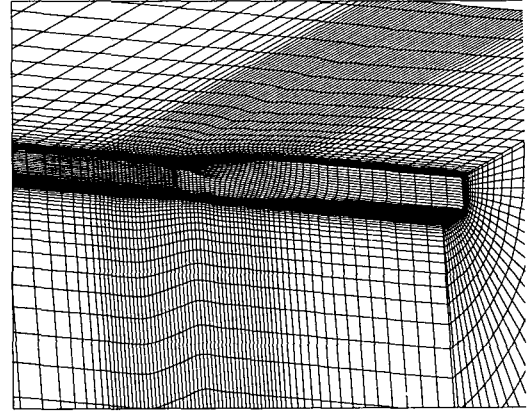


Fig. 2 Partial view of computational grids of a model ship

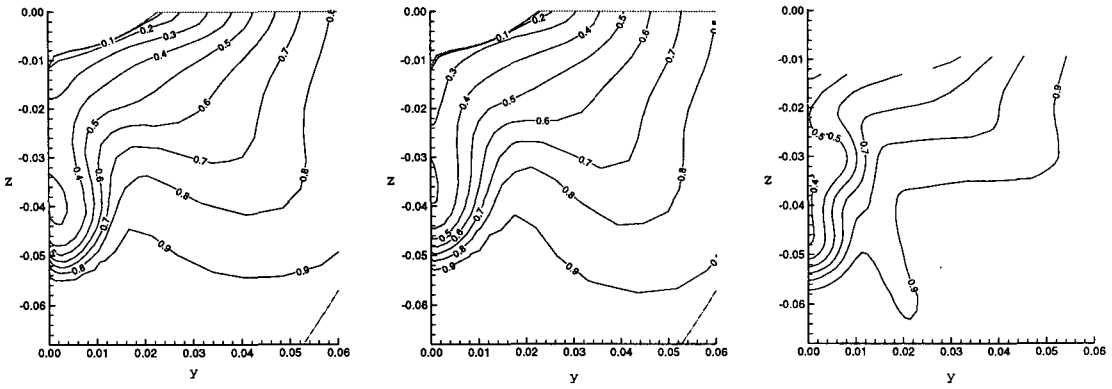
실험결과와 약간의 차이를 보여주고 있다. 그러나 대수응력모델에 의한 결과가 표준 k- $\varepsilon$  모델에 의한 결과보다 축방향 속도 등고선이 S자형에 가깝게 형성됨을 볼 수 있다.

프로펠러 평면에서 발생하는 2차유동을 살펴보기 위하여 속도벡터를 조사하였다(Fig. 4). 프로펠러 평면에서는 선체의 단면이 급격히 줄어들면서 2차유동으로 회전성분을 가진 보텍스가 나타난다. 계산결과를 보면 속도 등고선의 코어가 존재한 영역에 보텍스가 형성됨을 알 수 있으며 대수응력에 의한 결과가 표준 k- $\varepsilon$  모델의 결과보다 보텍스의 영역과 크기를 좀더 크게 예측됨을 알 수 있다.

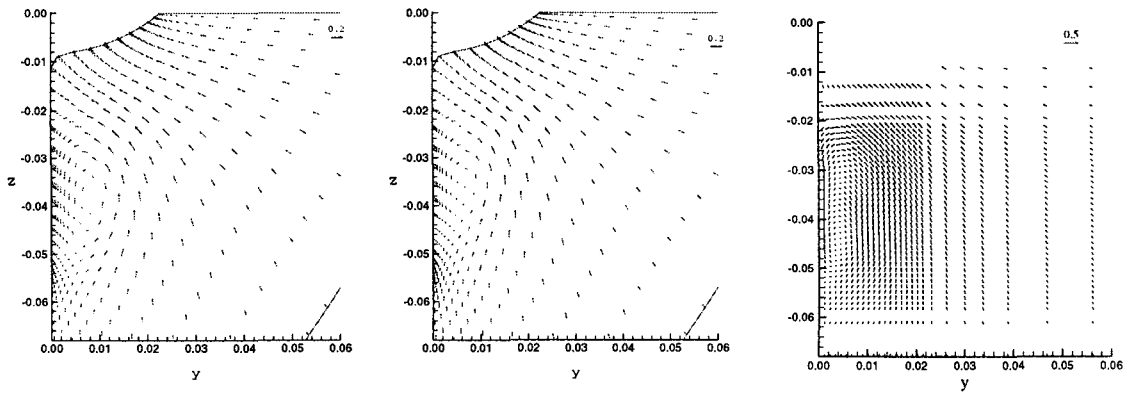
Fig. 5에 난류운동에너지의 분포를 나타내었다. 난류운동에너지의 최대값이 보텍스의 코어 부분에서 나타나고 있으며, 보텍스 영역의 아랫부분으로 갈수록 난류운동에너지의 크기가 커지고 구배가 커짐을 볼 수 있다. 대수응력모델과 표준 k- $\varepsilon$  모델에 의한 결과를 보면 보텍스 영역 내에서 상대적으로 큰 차이를 보여주고 있으며 대수응력모델이 난류운동에너지의 값을 전반적으로 크게 예측함을 알 수 있다.

#### 5. 결론

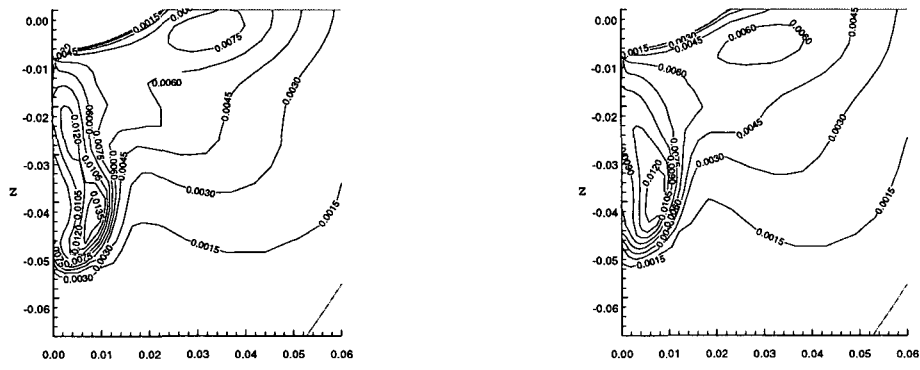
대수응력모델과 표준 k- $\varepsilon$  모델에 의한 결과 모두 실험결과와 차이를 보여주고 있지만 대수응력모델이 보텍스의 영향을 어느 정도 반영하여 그 영역과 세기를 좀더 크게 예측함을 알 수 있다. 난류에너지 양 및 축방향의 레이놀즈응력 분포도 대수응력모델이



(a) ASM (b)  $k-\epsilon$  (c) Experiment  
Fig. 3 Axial velocity contours on the propeller plane of a model ship



(a) ASM (b)  $k-\epsilon$  (c) Experiment  
Fig. 4 Projected velocity vectors on the propeller plane of a model ship



(a) ASM (b)  $k-\epsilon$   
Fig. 5 Turbulent kinetic energy on the propeller plane of a model ship

전반적으로 크게 예측하여 비교적 실험결과와 일치하였다. 그러나 프로펠러주위의 유동현상을 더욱 정확히 예측하려면 선미형상을 좀더 잘 나타낼 수 있는 격자계의 사용, 더 높은 차원의 난류모델의 적용, 혹은 다른 수치해석방법 차원에서의 연구가 더 필요하다고 생각된다.

### 참고문헌

- [1] Van, S.H., Kim, W.J., Yim, G.T., Kim, D.H., and Lee, C.M., "Experimental Investigation of the Flow Characteristics around Practical Hull Forms", Third Osaka Colloquium on Advanced CFD Applications to Ship Flow and Hull Form Design, 1998.
- [2] Choi, J.E., Seo, H.W., and Han, B.W., "Experimental Study on the Flow around a Full Slow-Speed Ship", Proc. of Fourth Japan-Korea Joint Workshop on Ship & Marine Hydrodynamics, pp.141-148, 1999.
- [3] Van, S.H., Kim, W.J., Kim, H.R., and Lee, S.J., "Wind Tunnel Test on Flow Characteristics of KRISO 300K VLCC Double Model", Proc. of Fourth Japan-Korea Joint Workshop on Ship & Marine Hydrodynamics, pp.157-163, 1999.
- [4] Van, S.H. and Kim, H.T., "A Computational Study on Turbulent Flow Characteristics around Full Form Tankers", J. of Hydrospace Technology, Vol.2, No.2, 1996.
- [5] 김우전, 반석호, 김도현, 김형태, 김정중, "실용적인 상선의 선미 반류 예측을 위한 난류유동 계산", 98년도 춘계 학술대회 논문집, pp.385-388, 1998.
- [6] Larsson, L., Patel, V.C., and Dyne, G., "Ship Viscous Flow : Proceedings of 1990 SSPA-CTH-IIHR Workshop," FLOWTECH INTERNATIONAL AB, Gothenburg, Sweden, 1991.
- [7] Proceedings of CFD Workshop Tokyo 1994, Tokyo, Japan, 1994.
- [8] Rodi, W., "Turbulence Models and Their Application in Hydraulics," International Association for Hydraulic Research, Rotterdamseweg, The Netherlands, 1984.
- [9] 이창훈, "대수용력모델에 의한 축대칭 엔진 실린더 내의 유동 및 열전달 해석," 서울대학교 석사학위논문, 서울대학교, 1987.
- [10] Gibson, M. M., and Launder, B. E., "Ground Effects on Pressure Fluctuations in the Atmospheric Boundary Layers," J. Fluid Mechanics, Vol. 86, part 3, 1978.
- [11] Gosmann, A.D., and Ideriah, F.J.K., TEACH-2E Computation Code Manual Dept. of Mechanical Engineering, Imperial College, England, 1976.
- [12] Patankar, S.V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Mcgraw-Hill, 1980.
- [13] Choi, J.E., "Hybrid-QUICK Scheme Using Finite-Volume Method", J. of Hydrospace Technology, Vol.2, pp.57-67, 1996.