

## 병렬계산기법을 이용한 선체주위 점성유동장의 LES해석

최희종\* · 박종천\*\* · 윤현식\*\* · 전호환\*\* · 강대환\*\*\*

\*한국해양연구원 해양시스템안전연구소

\*\*부산대학교 조선해양공학과

\*\*\*STX중공업 블럭팀

## Large Eddy Simulation of Turbulent Flow around a Ship Model Using Message Passing Interface

HEE-JONG CHOI\*, JONG-CHUN PARK\*\*, HYUN-SIK YOON\*\*, HO-HWAN CHUN\*\* AND DAE-HWAN KANG\*\*\*

\*Maritime and Ocean Engineering Research Institute, KORDI, Daejeon, Korea

\*\*Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

\*\*\*STX Heavy Industry, Block Team, Changwon, Korea

**KEY WORDS:** Large-eddy simulation 대형와모사, Message passing interface 병렬처리기법, Single program multiple data programs 단일프로그램다중데이터프로그램, PC cluster 컴퓨터클러스터, FVM 유한체적법

**ABSTRACT:** The large-eddy simulation(LES) technique, based on a message passing interface method(MPI), was applied to investigate the turbulent flow phenomena around a ship. The Smagorinski model was used in the present LES simulation to simulate the turbulent flow around a ship. The SPMD(single program multiple data) technique was used for parallelization of the program using MPI. All computations were performed on a 24-node PC cluster parallel machine, composed of 2.6 GHz CPU, which had been installed in the Advanced Ship Engineering Research Center(ASERC). Numerical simulations were performed for the Wigley hull, and the Series 60 hull(CB=0.6) using 1/4-, 1/2-, 1- and 2-million grid systems and the computational results had been compared to the experimental ones.

### 1. 서 론

최근의 컴퓨터데이터처리속도의 급속한 발달로 인하여 실생활의 주변에서 발생하는 여러 가지 복잡한 유동현상을 전산유체역학(Computational fluid dynamics)의 도움을 얻어 수치해석 및 컴퓨터시뮬레이션을 통하여 구현하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 조선공학의 경우 자유수면 위를 항주하는 선박에 대하여 연구한다는 특수성으로 인하여 많은 조선공학자들이 전산유체역학에 관심을 가지고 있으며, 전산유체역학을 선박의 건조에 도입하여 우수한 성능을 가지는 선박을 개발하고자 노력하고 있다.

선박에 작용하는 저항성분은 크게 점성저항성분과 조파저항성분으로 구분할 수 있는데, 고속의 특수선을 제외한 대부분의 선박의 선체에 미치는 저항은 점성에 의한 저항성분이 지배적이며, 이와 같은 저항성분들을 해석하기 위한 선체주위 유동해석기법으로는 유체를 점성이 없는 이상유체라 가정하고 유동을 해석하는 포텐셜유동해석기법과 Navier-Stokes 방정식을 풀어 유동을 해석하는 점성유동해석기법으로 나뉜다.

포텐셜유동해석기법은 최근에 조파저항성분의 해석에 정량적, 정성적으로 상당히 개선된 결과를 보여주는 논문들이 발표되고 있다. 그러나 비점성유동해석이라는 한계로 인하여 보다 실제유동에 가까운 해를 얻을 수 있는 점성유동해석에 많은 연구가 진행되고 있는 실정이며, 더욱이 최근의 컴퓨터데이터처리속도와 CFD기술의 비약적인 발전으로 인하여 수치해석에 의한 저항의 정성적, 정량적 수치해석이 어느 정도 가능하게 되었으며, 특히 최근의 여러 가지 난류모델의 개발과 MPI(Message passing interface)기법의 도입은 점성유동해석의 발전에 적지 않은 영향을 미치고 있다(반석호와 김형태, 1994; 윤현식 등, 2003; Kim et al., 2000; Park et al., 2004).

본 연구의 목적은 병렬계산기법을 이용하여 선체주위에서 발생하는 점성유동을 예측하고자 하는 것이다. 수치해석에 적용된 병렬계산기법으로는 단일프로그램다중데이터프로그램(Single program multiple data programs, SPMD)기법을 사용하였으며, 난류유동해석에 사용된 난류해석기법으로는 LES(large eddy simulation)법이 사용하였으며, Wigley선형과 Series 60(C<sub>B</sub>=0.6)선형에 대한 수치해석을 수행하고 그 결과를 모형시험의 결과와 서로 비교하였다. 수치해석은 24-노드 PC 클러스터를 사용하여 수행하였다.

교신저자 박종천: 부산광역시 금정구 장전동 산 30  
051-510-2480 jcpark@pusan.ac.kr

## 2. 이론적 연구

### 2.1 지배방정식

LES 유동해석에 대한 지배방정식을 유도하기 위하여 유동변수들을 다음과 같이 분해한다.

$$f = \bar{f} + f' \quad (1)$$

위의 식에서  $\bar{f}$ 는 resolvable grid scale(GS) 성분을 나타내고,  $f'$ 는 residual sub-grid scale(SGS) 성분을 나타낸다.

본 연구에서는 GS 성분,  $\bar{f}$ 은 Top-Hat 필터,  $G$ 를 사용하여 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{f}(\mathbf{x}) = \iiint G(\mathbf{x}-\mathbf{x}') f(\mathbf{x}') dx' dy' dz' \quad (2)$$

여기서,

$$G(\mathbf{x}) = 1/(\Delta x \Delta y \Delta z)^3$$

식 (2)의 필터링 작업에 의하여 grid scale에 대한 비압축성 유동의 지배방정식인 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} = -\frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\tau_{ij} + 2\nu \bar{S}_{ij}) \quad (4)$$

위의 식에서  $\bar{S}_{ij}$ 는 변형속도 텐서의 GS 성분을 나타낸다.

$$\bar{S}_{ij} = \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

식 (4)의  $\tau_{ij}$ 는 LES 해법에 대한 SGS 성분에 대한 응력텐서를 나타내며, 식 (4)의 닫힌 문제를 해결하기 위하여 GS 성분의 항으로 나타내어져야 한다.

SGS 성분에 대한 응력텐서  $\tau_{ij}$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \tau_{ij} &= \overline{(u_i + u_i')(u_j + u_j')} - \overline{u_i u_j} \\ &= \underbrace{\overline{u_i u_j} - \overline{u_i u_j}}_{L_{ij}} + \underbrace{\overline{u_i u_j'} + \overline{u_i' u_j}}_{C_{ij}} + \underbrace{\overline{u_i' u_j'}}_{R_{ij}} \end{aligned} \quad (6)$$

위의 식에서 (')는 필터된 값에 대한 변동량을 정의한다. 첫 식의 우변 첫 번째와 두 번째 항은 Leonard 응력항( $L_{ij}$ ), 세 번째 항은 cross 응력항( $C_{ij}$ ), 그리고 마지막 항은 SGS Reynolds 응력항( $R_{ij}$ )를 나타낸다(Leonard, 1974). Leonard 응

력  $L_{ij}$ 는 GS 속도에 필터를 걸어서 구할 수 있지만,  $C_{ij}$ 와  $R_{ij}$ 는 모델이 필요하다.

### 2.2 Smagorinski 모델

Smagorinski 모델은 LES 해법에서 널리 채택되고 있는 SGS 난류모델로서 SGS 난류모델의 와점성계수,  $\nu_e$ 만을 택하여 난류에 의한 운동량 수송을 평가한다. SGS 모델에서는 SGS 응력  $\tau_{ij}$ 를 다음과 같이 모델화한다.

$$-\tau_{ij} = 2\nu_e \bar{S}_{ij} \quad (7)$$

위의 식에서  $\bar{S}_{ij}$ 는 앞에서 언급한 바와 같이 변형속도 텐서의 GS 성분을 나타내고 와점성계수,  $\nu_e$ 는 Smagorinski 모델 (Smagorinski, 1963)을 이용하여 다음과 같이 정의한다.

$$\nu_e = L_s^2 \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}} = L_s^2 |\omega| \quad (8)$$

위의 식에서  $\omega$ 는 와도를 나타내며, length scale  $L_s$ 는 Takakura et al.(1989)에 의해 다음 식으로 산출된다.

$$L_s = C_s \min(\Delta x, \Delta y, \Delta z) \quad (9)$$

위의 식에서  $C_s$ 는 Smagorinski 정수이며, 본 연구에서는 평균 간 난류유동에 적합한 0.1을 사용하였다. 그리고  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ 은 각각  $x$ ,  $y$ ,  $z$  방향의 격자간격이다.

이와 함께 벽면에서 다음과 같은 Van Driest형의 감쇄함수를 사용해서 벽면으로 향하는 길이 스케일  $\Delta$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta = \Delta \left( 1 - \exp\left(-\frac{y^+}{26}\right) \right) \quad (10)$$

SGS 난류모델의 적용조건으로서 물체에 가장 근접한 격자점들은 점성저층 내에 있어야 한다. 평판의 경우에는 용이하게 이 조건을 만족시킬 수 있지만, 일반적으로 복잡한 형상을 가지는 물체에 대해서는 반드시 격자점을 점성저층 내에 배치시킬 수 없는 경우도 있다. 또한 속도분포의 대수법칙이 형성되어 있지 않는 경우에 감쇄함수가 과잉으로 적용되는 경우가 있기 때문에 본 연구에서는 벽함수를 도입하였다. 벽면 근처의 속도 프로파일을 나타내기 위하여 Spalding(1961)의 Universal 모델을 적용하였으며, 다음 식으로 표현된다.

$$y^+ = u^+ + 0.1108 \left[ e^{0.4u^+} - 1 - 0.4u^+ - \frac{(0.4u^+)^2}{2} - \frac{(0.4u^+)^3}{6} - \frac{(0.4u^+)^4}{24} \right] \quad (11)$$

벽면으로부터 가장 근접한 법선방향의 거리  $y$ 와 그 점에서의

유속의 크기를  $|u|$ 라고 하면, 그 점에서 계산된 마찰속도  $u_\tau$ 를 이용해  $y^+$  와  $u^+$ 의 관계식을 다음과 같이 도출할 수 있다.

$$u_\tau = \frac{y^+}{y Re} \text{ and } u^+ = \frac{|u|}{u_\tau} \tag{12}$$

### 3. 병렬계산기법

본 연구에서 사용한 병렬계산기법은 SPMD인데 이것은 고성능 네트워크로 연결되어 있는 프로세서들에서 단일 프로그램을 동시에 실행하여 각기 다른 데이터를 생산하여 실행하는 것이다.

Fig. 1은 병렬계산 시 사용된 프로세서들의 계산을 위한 가상 위상을 나타낸다. 계산 시 프로세서 0은 (1,1)의 좌표, 프로세서 1은 (1,2), 프로세서 2은 (2,1) 그리고 프로세서 3은 (2,2)의 좌표를 가지게 된다. 일반적으로 병렬계산의 효율은 속도향상비(Speed-up ratio)를 사용하여 나타내는데, 속도향상비는 동시성(Synchronization)과 통신(Communication)이 병렬알고리즘에 미치는 영향을 나타낸다.

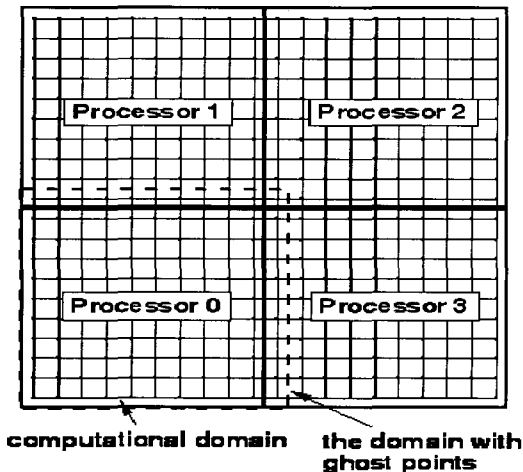


Fig. 1 Virtual topology

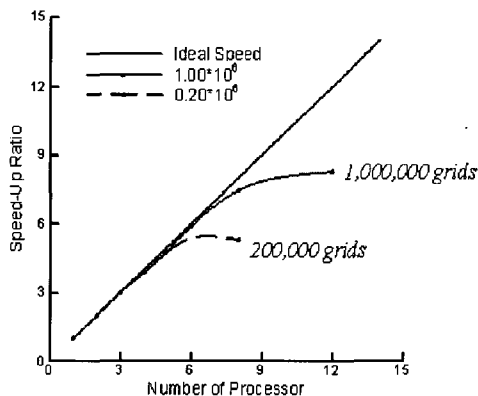


Fig. 2 Speed-up ratio

본 연구에서 채택한 병렬알고리즘의 속도향상비를 알기 위하여 2차원 캐비티유동(Cavity flow)에 대한 유동해석을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 보이는 것처럼 프로세서의 수가 증가하면서 이상적인 속도향상비보다 떨어지는 것을 알 수 있다. 단일 프로그램을 병렬화하여 고성능의 계산속도를 얻기 위해 다수의 영역으로 분할하게 되는데 일반적으로 이때 각 프로세서에 할당되는 계산량은 프로세서의 개수가 늘어날수록 줄어들게 된다. 그러나 영역경계가 늘어남으로 교환되어야하는 메시지 량이 증가하게 되고 이것으로 인하여 속도 저하가 일어나게 된다.

### 4. 수치해석

본 연구를 위하여 개발된 선체주위 점성유동해석 프로그램의 타당성을 검증하기 위하여 Wigley선형과 Series 60( $C_B=0.6$ ) 선형에 대하여 수치해석을 수행하고 그 결과를 실험값과 비교하였다.

선체주위 유동장을 구성하는 격자계는 상용격자생성프로그램인 Gridgen을 사용하여 생성하였다. 계산영역은 길이방향으로  $-1.5L \sim 2.5L$ , 선측방향으로  $0 \sim L$  그리고 깊이방향으로  $-L \sim 0$  이고, 격자계의 형상은 OH-형이다. 격자계를 구성하는 격자들 중에서 선체에 가장 인접한 격자계의 선측방향 최소격자길이를  $0.5 \times 10^{-5}$ 로 두었으며, 이는  $y^+ \approx 5$ 에 해당하는 값이다.

수치해석을 위하여 24-노드 병렬컴퓨터가 사용되었으며, 각 프로세서는 2.6GHz의 CPU의 성능을 가진다.

유동이 정상상태에 도달하기 위한 가속시간은  $t=1$ 이고 전체 수치해석은  $t=5$ 이다. 이와 같은 방법으로 격자수  $2 \times 10^6$ 개에 대하여 12-노드의 병렬컴퓨터를 사용하여 수치해석을 수행하였을 때 7.5시간이 걸리는 것을 알 수 있었으며, 단일 프로세서를 사용하였을 경우 소요되는 시간과 비교하여 10배정도 빠르다는 것을 알 수 있었다.

#### 4.1 Wigley선형

Wigley선형에 대한 수치해석은  $Re=4.5 \times 10^6$ 에서 수행하였으며, 각각  $2 \times 10^5$ ,  $5 \times 10^5$ ,  $10 \times 10^5$ ,  $20 \times 10^5$ 개의 격자계에 대하여 수치해석을 수행하고 그 결과를 서로 비교하였으며, Fig. 3은 Wigley선형의 수치해석에 사용된 격자계를 나타낸 것이다.

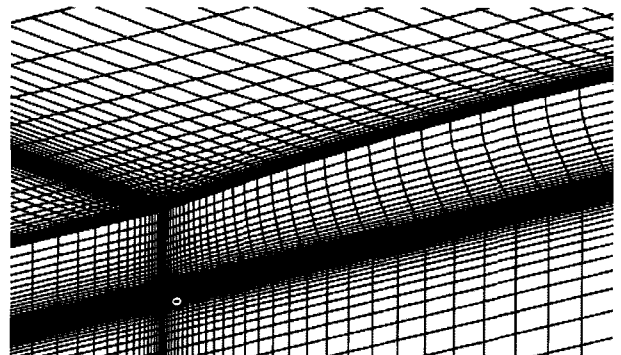
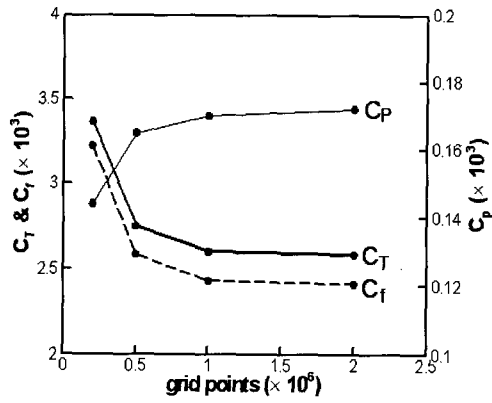


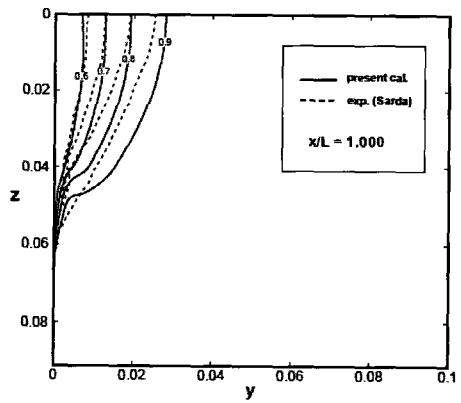
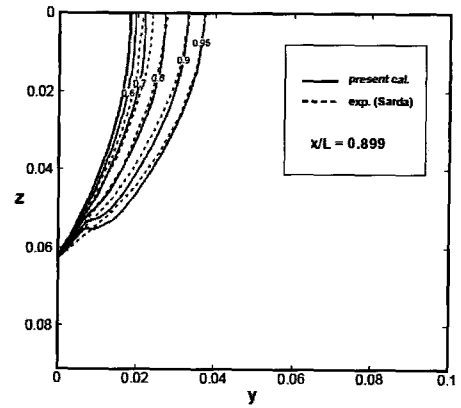
Fig. 3 Grid system of Wigley hull

**Table 1** Resistance components with different grid points

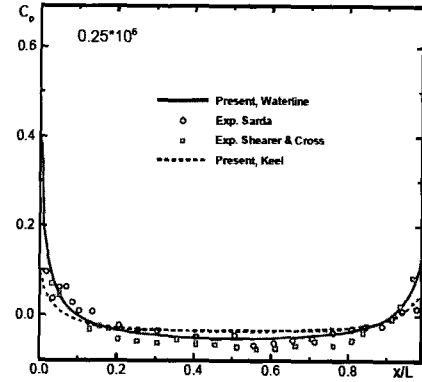
Grid no. ( $\times 10^5$ )	$C_T (\times 10^3)$	$C_P (\times 10^3)$	$C_f (\times 10^3)$
2	3.366	0.144	3.222
5	2.750	0.165	2.585
10	2.601	0.170	2.431
20	2.538	0.172	2.411



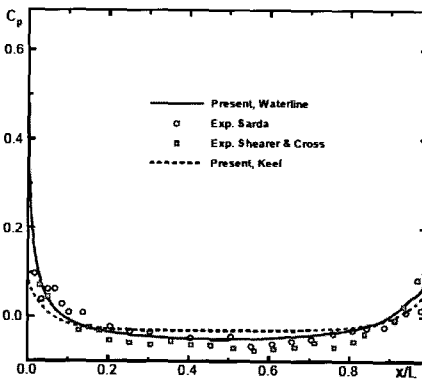
**Fig. 4** Drag components of Wigley hull vs. grid points used



(a) RANS

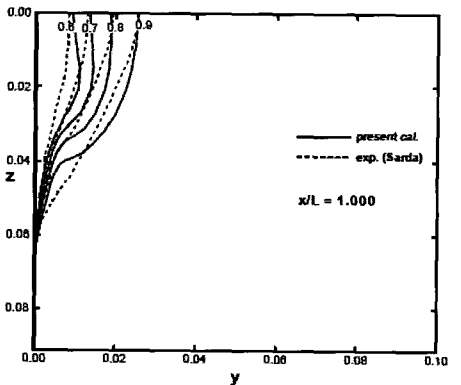
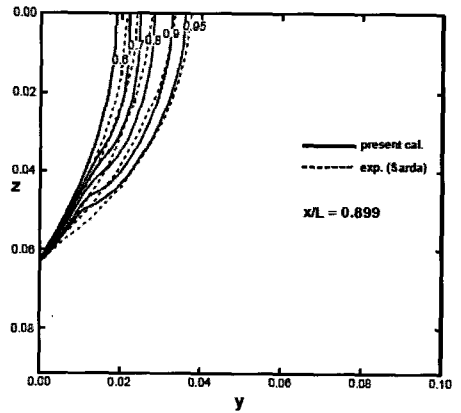


(a) RANS



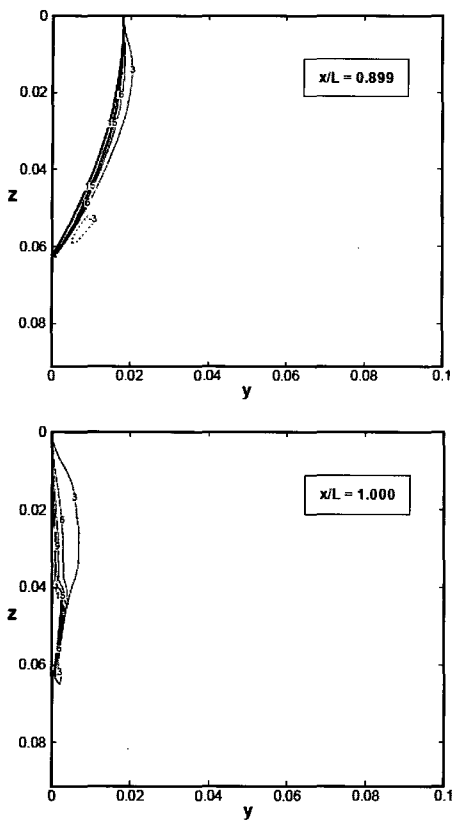
(b) LES

**Fig. 5** Pressure coefficient along the waterline and keel

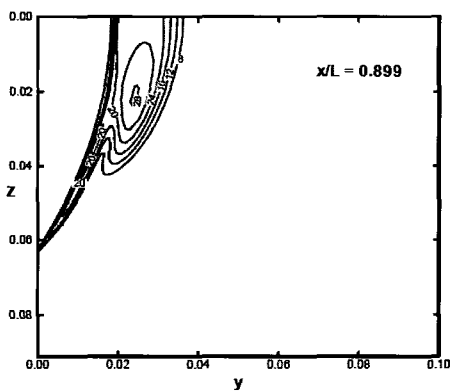
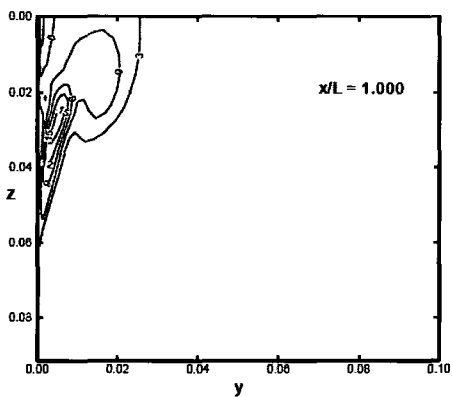


(b) LES

**Fig. 6** Wake distribution at the transverse sections



(a) RANS



(b) LES

Fig. 7 Computed turbulent eddy viscosity(as a multiple of the molecular viscosity)

Table 1과 Fig. 4는 격자 개수의 변화에 따른 저항성분값을 서로 비교한 것으로, 격자수가 증가함에 따라 각 저항성분은 특정한 값으로 수렴하는 경향을 보인다. 이 결과를 토대로 하여 격자수가  $10 \times 10^5$ 인 경우의 수치해석결과를 실험값과 비교하였다.

Fig. 5는 Sarda(1986)와 Shearer and Cross.(1965)의 실험결과인 수선과 키일(Keel)에서의 압력분포를 각각 LES와 RANS를 사용하여 구한 수치해석결과와 서로 비교한 것이다. 선수와 선미 부근에서 실험결과와 비교하여 수치해석결과가 다소 차이가 있는 것을 볼 수 있으나, 전반적으로 정성적, 정량적인 면에서 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. Fig. 6는  $x/L=0.899$ 와 1.0에서 Wake분포를 Sarda(1986)의 실험결과와 비교한 것이다. RANS의 경우에는 전반적으로 잘 일치하고 있으나 LES의 경우,  $x/L=0.899$ 에서는 비교적 좋은 일치를 보이고 있는 반면,  $x/L=1.0$ 에서는 실험결과에 비해 약간 부풀어 오른 경향을 보인다. 이러한 Wake분포는 Fig. 7의 와점성계수,  $\nu_t$ 와 밀접한 관련이 있다.

4.2 Series 60( $C_B=0.6$ )선형

Series 60( $C_B=0.6$ )선형에 대한 수치해석은  $Re=4.0 \times 10^6$ 에서 수행하였으며, 수치해석에 사용된 격자점의 수는  $5 \times 10^5$ 개이다.

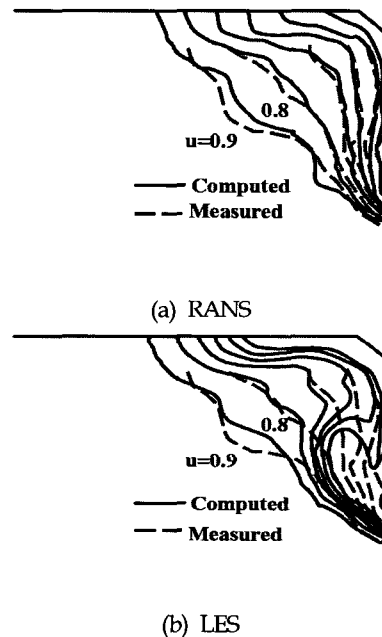


Fig. 8 Wake distributions at  $x/L=1.0$

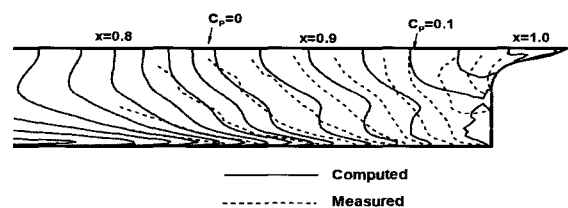


Fig. 9 Comparison of measured and computed pressure contours at stern

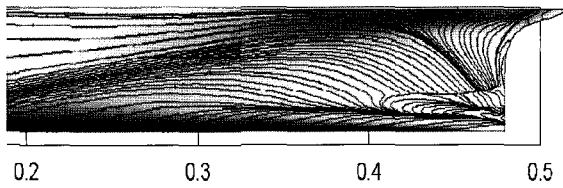


Fig. 10 Limiting streamline on hull surface at stern

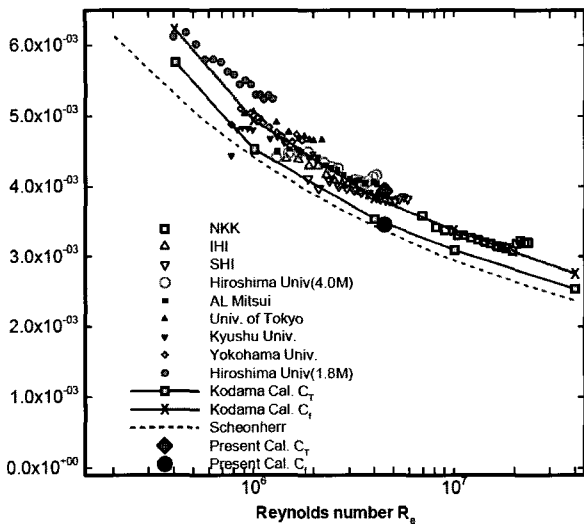


Fig. 11 Comparison of the measured and computed total drag of series 60( $C_B=0.6$ ) hull(Kodama, 1992)

$x/L=1.0$ 의 위치에서 Wake분포를 Toda et al.(1988)의 실험결과와 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. 전반적으로 좋은 일치율을 보이고 있으나, LES 계산에서는 과도한 갈고리 모양(Hook-shaped)의 부분 형태가 나타나고 있다. Fig. 9는 Toda et al.(1988)의 실험과 LES 계산에 의한 선체표면에서의 압력분포를 비교한 것이다. 용골(Keel)과 선미끝단에 가까운 부근을 제외하고는 좋은 일치율을 보이고 있다. Fig. 10은 선미에서의 유선을 보여주고 있다. Wake분포의 과도한 부분 형상 때문에, 흐름이 역류하는 부분이 넓게 분포하고 있음을 알 수 있다. Fig. 11은 전저항값과 마찰저항값을 서로 비교한 것이다. Kodama(1992)의 RANS와 실험결과의 범위 내에서 현재 계산결과가 잘 맞고 있음을 보여준다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 선체주위의 점성유동장에 대한 수치해석을 수행하기 위하여 병렬계산기법, LES 등을 적용하여 점성유동장 유동해석프로그램을 개발하였으며, 타당성을 검증하기 위하여 Wigley선형과 Series 60( $C_B=0.6$ )선형에 대하여 계산격자수를 변화시켜가면서 수치해석을 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 기존의 계산기법과 비교하여 병렬계산기법을 도입함으로써 계산속도의 관점에서 상당한 성능향상 효과를 볼 수 있었다.
- 2) 수치해석결과와 실험결과의 비교를 통하여 본 연구에서 채

택한 알고리즘을 사용하여 개발된 프로그램의 타당성을 검증할 수 있었다.

3) 본 연구에서는 단순선형인 Wigley선형과 series 60( $C_B=0.6$ )선형에 대하여 수치해석을 수행하였으나, 향후 보다 복잡한 선체의 형상을 가지는 선박에 대하여도 개발된 프로그램을 적용하여 수치해석을 수행할 예정이다.

### 후 기

본 연구는 삼성중공업-첨단조선공학연구센터(ASERC) 산학연구의 지원으로 수행된 연구결과임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

반석호, 김형태 (1994). "정규격자계와 4단계 Runge-Kutta 법을 사용한 Wigley선형 주위의 난류유동계산", 대한조선학회논문집, 제31권, 제3호, pp 87-99.

윤현식, 구본국, O.A.A. El-Samni, 박종천, 전호환 (2003). "마찰저항감소를 위한 난류유동의 DNS/LES 해석기술의 개발", 대한조선학회, 추계학술대회논문집, pp 204-210.

Kim, M.H., Niedzwecki, J.M., Roesset, J.M., Park, J.C., Tavassoli, A. and Hong, S.Y. (2000). "Fully Nonlinear Multi-Directional Wave Simulations By 3D Numerical Wave Tanks", J. of OMAE, ASME transaction, Vol 123, pp 124-133.

Kodama, Y. (1992). "Computation of Ship's Resistance Using an NS Solver with Global Conservation Flat Plate and Series 60 ( $C_B=0.6$ ) Hull", J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol 172, pp 147-155.

Leonard, A. (1974). "Energy cascade in large eddy simulations of turbulent flows", Adv. Geophys, Vol 18, pp 237-248.

Park, J.C., Uno, Y., Sato, T., Miyata, H. and Chun, H.H. (2004). "Numerical Reproduction of fully nonlinear multi-directional waves by a viscous 3D Numerical Wave Tank", Ocean Engineering, Vol 31, pp 1549-1565.

Sarda, O.P. (1986). "Turbulent Flow Past Ship Hulls An Experimental and Computational Study", Ph.D. Thesis, Mech. Eng., Univ. of Iowa.

Shearer, J.R. and Cross, J.J. (1965). "The Experimental Determination of the Components of Ship Resistance for a Mathematical Model", Trans. Royal Institute of Naval Archi., Vol 107.

Smagorinsky, J. (1963). "General Circulation Experiments with the Primitive Equations. I. The Basic Experiment", Monthly Weather Review 91, pp 99-164.

Spalding, D.B. (1961). "A Single Formula for the Law of the Wall", J. Applied Mech, pp 455-458.

Takakura, Y., Ogawa, S. and Ishiguro, T. (1989). "Turbulence Models for Transonic Viscous Flow", AIAA paper, No 89-1952CP.

Toda, Y., Stern, F., Tanaka, I. and Patel, V.C. (1988).

"Mean-Flow Measurements in the Boundary Layer and Wake of a Series 60  $C_B=0.6$  Model Ship With and Without Propeller", IIHR Report No 326.

---

2000년 6월 29일 원고 접수

2000년 8월 22일 최종 수정본 채택