

## 마찰저항감소를 위한 난류유동의 DNS/LES 해석기술의 개발

윤현식\*\*, 구본국\*\*, Osama A. El-Samni\*, 박종천\*\*, 전호환\*\*

부산대학교 첨단조선공학연구센터\*, 부산대학교 조선해양공학과\*\*

### Development of Numerical Tool for the DNS/LES of Turbulent Flow for Frictional Drag Reduction

H.S. Yoon\*\*, B.G. Koo\*\*, Osama A. El-Samni\*, J.C. Park\*\* and H.H. Chun\*\*

Advanced Ship Engineering Research Center, Pusan National University\*  
Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University\*\*

#### Abstract

The friction drag reduction of a ship is of prime importance for the design and production of high-valued/high-tech. ship. Thus, this study carried out the development of reliable numerical tools to identify the friction drag reduction mechanism for turbulent boundary layer on the ship surface and to deduce the optimum reduction technique by numerical experiment. The developed LES and DNS numerical tools were applied to simulate the turbulent channel flow. These results were very well matched with previous results not only qualitatively but also quantitatively. The parallelization using MPI (Message Passing Interface) technique implemented in the developed code to speed up the simulation and to obtain the accurate results from the fine grid system was testified its computational efficiency.

※Key words : CFD(전산유체역학), DNS(직접수치모사), LES(대형와모사), Channel Flow(채널유동), Friction Drag Reduction(마찰저항감소), Parallelization(병렬화)

#### 1. 서론

난류 경계층은 유체역학에서 가장 기본이 되는 유동현상으로 이를 분석/제어하고 공학적으로 응

용하려는 연구가 계속되어 왔다. 선체저항에 있어서 가장 많은 비중을 차지하는 마찰저항 역시 경계층유동의 대표적인 특성중의 하나이다. 선박의 저항을 감소시키기 위한 연구는 오래 전부터 수행되어 왔으나 특히, 국내에서는 선체 마찰저항을 감소시키는 문제에 대한 연구는 비교적 뒤늦게 시작되었다 (장진호/김효철 1999, 김덕수 등 2002, 김덕수 등 2003). 최근에는 컴퓨터의 발달과 더불어

접수일: 2003년 11월 3일, 승인일: 2003년 12월 27일

†주저자, E-mail: lesmodel@pusan.ac.kr,

Tel: 051-510-3673

어 활발해진 직접 수치 모사(Direct Numerical Simulation)방법을 통해 난류 경계층 내부의 응집 구조(coherent structure)가 밝혀지면서 이를 제어 해 난류경계층의 표면 마찰을 감소시키려는 연구 (polymer injection, microbubble, riblet surface, EMTC, wall oscillation, etc) 가 활발히 진행되고 있다.

따라서, 장기적으로 수치해석을 통한 선체 표면 마찰 저항을 일으키는 역학적인 원인 규명과 최적의 감소 기법을 도출하기 위한 다양한 수치 실험들을 수행하고자 한다. 이를 위해 본 연구에서는 선박의 마찰저항을 감소시키는 기술을 개발하기 위한 기초 연구로서, 3 차원 비정상 난류 유동 해석을 위한 수치 해석기법의 개발을 수행하였다.

수치해석 가속화와 많은 격자를 사용하여 고정도의 결과를 확보하고자 병렬 처리를 위한 MPI(Message Passing Interface)기법을 도입하였다. 스펙트럴(spectral) 방법과 유한체적법 (finite volume method)을 기반으로 직접 수치 모사법과 대형 와 모사법(LES, Large Eddy Simulation)의 수치해석 기법을 개발하였다. 각 기법들을 사용하여 완전히 발달된 난류 채널 유동해석을 통해 얻은 결과들은 이전의 결과들과 비교 검증 및 경계층 난류 구조 해석에 사용되었다. 본 연구에서 사용된 수치해석방법, 경계조건, 시간간격 및 난류통계처리에 관한 더 자세한 내용은 박종천 등 (2003)에서 참고할 수 있다.

## 2. MPI 를 이용한 병렬화

본 연구에서 사용한 병렬 계산은 MPI를 이용한 SPMD (single program multiple data programs) 이다. 이것은 고성능 네트워크로 연결되어 있는 프로세서들에서 단일 프로그램을 동시에 실행하여 각기 다른 데이터를 생산하여 실행하는 것이다. 즉, 영역 분할법으로 병렬화시 영역들의 경계에서의 연속성을 만족시키거나 혹은 경계 조건으로 사용하기 위해 데이터를 이웃한 영역들간에 주고 받아야 하는데 이와 같은 것들을 위해 MPI를 사용한다.

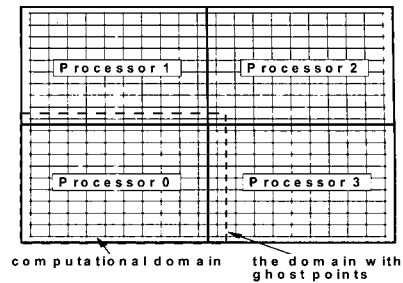


Fig. 1 Virtual topology

### 2.1 MPI 프로그래밍 기법

본 연구에서는 이러한 MPI 프로그래밍 기법 중 하나인 virtual topology 방법을 사용하였다. Virtual topology란 Fig. 1처럼 병렬 계산에 참여하는 프로세서들을 2차원 배열 혹은 3차원 배열로 가상 배치하는 것으로 각각의 프로세서들은 고유의 독립된 좌표를 가지게 된다. 예를 들어 Fig. 1에선 0번 프로세서가 (1,1)을, 1번 프로세서는 (1,2)를, 2번 프로세서는 (2,2)를, 3번 프로세서는 (2,1)이라는 좌표를 가지게 되는 것이다. 이러한 기법을 사용함으로써 병렬 계산 중 이루어지는 프로세서들 사이의 데이터 교환이 더욱 용이하게 되고 병렬 계산에 참여시킬 프로세서수에 유동적으로 대처할 수 있다.

### 2.2 병렬프로그램 성능평가

일반적으로 병렬 프로그램의 성능 평가는 속도 향상비(speed-up ratio)를 사용하며, 속도 향상비는 동시성과 통신이 병렬 알고리즘에 미치는 영향을 나타낸다. 병렬 프로그램의 성능평가를 위해서 2차원 cavity문제를 풀었다. Fig. 2에서 보이는 것처럼 프로세서의 수가 증가하면 이상적인 속도 향상비보다 성능이 떨어지는 것을 알 수 있다.

단일 프로그램을 병렬화하여 고성능의 계산 속도를 얻기 위해 다수의 영역으로 분할하게 되는데, 일반적으로 이때 각 프로세서에 할당되는 계산량은 개수가 늘어날수록 줄어 들게 된다. 그러나 영역 경계가 늘어남으로 교환되어야 하는 메시지 양이 증가하게 되고 이것에 기인하여 속도 저하가 일어난다. 따라서 고성능의 네트워크 장치로 연결되어 있는 시스템에서는 프로세서의 수가 증가하

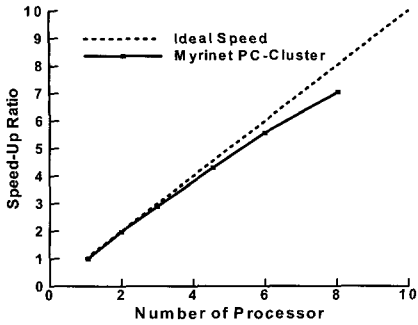


Fig. 2 Speed – up ratio.

도 비교적 우수한 성능 향상율을 보인다.

본 병렬처리 기법은 4 장에 설명 되어질 FVM 을 이용하는 DNS 에 의한 채널내에서 난류 유동 장 해석에만 적용되었다.

### 3. Spectral DNS 를 통한 채널내의 난류 유동장 해석

#### 3.1 지배방정식 및 수치해석 방법

일정 물성치의 비압축성 유동에 대한 지배방정식으로 아래의 무차원화된 운동량보존 방정식 및 연속 방정식이 본 계산에서 사용되었다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re_\tau} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (1)$$

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

무차원화를 위한 특성길이 및 특성 속도로 반높이,  $\delta$  와 전단속도  $u_\tau$  가 사용되었다. 본 연구에서 사용된 레이놀즈수는  $Re_\tau = u_\tau \delta / \nu = 150$  이다. 지배방정식의 해를 구하기 위해 시간차분에 대해 semi-implicit방법이 사용되었다. 정성항에 대해서는 Crank-Nicolson 방법, 대류항에 대해서는 3차 Runge-Kutta방법이 사용되었다. 공간 차분에는 벽면 수직방향으로는 Chebyshev-tau방법, 주유동방향과 횡방향으로는 dealiased Fourier 방법이 적용되었다. 본 연구에서 사용된 스펙트럴 방법은 Kim et al.(1987)이 사용한 것과 동일하다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 x, y와 z는 주유동방향, 벽면수직방

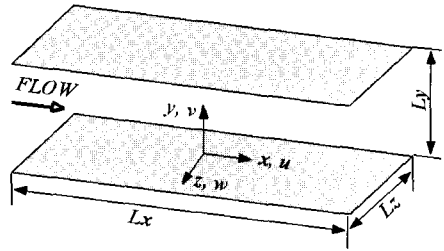


Fig. 3 Schematic diagram of computational domain.

향과 횡방향좌표를 각각 나타내고. 각 방향에 대응하는 속도는 u, v와 w이다.

계산 영역은 주유동방향, 벽면수직방향과 횡방향으로  $4\pi\delta \times 2\delta \times \pi\delta$  이며 사용된 격자계는  $64 \times 65 \times 64$  이다. 유동방향과 폭방향에 대해서 주기조건을 부여하였고, 위/아래 벽면들에는 점착조건이 적용되었다. 또한 모든 계산은 주유동방향으로 압력구배를 일정하게 하였다.

#### 3.2 결과 및 고찰

Fig. 4 는 벽면의 전단속도에 의해 무차원화된 주유동방향 평균속도분포를 보여주고,  $Re_\tau = 180$  에서의 Kim et al.(1987)의 결과와 비교되었다. 본 계산 결과는 Kim et al.(1987)의 조밀한 그리드( $192 \times 129 \times 160$ )에서 얻은 결과를 잘 재현하며, 점성아영역, 완충영역, 대수영역에서 기존 법칙들을 잘 따르고 있다.

Fig. 5는 난류운동에너지 수치를 보여준다. 벽에서 확산( $D_k$ )과 소산율( $\epsilon_k$ )의 평형이 쉽게 보여진다. 생성( $P_k$ )은 벽면에서 15정도 떨어진 지점에서 최대값을 보인다.

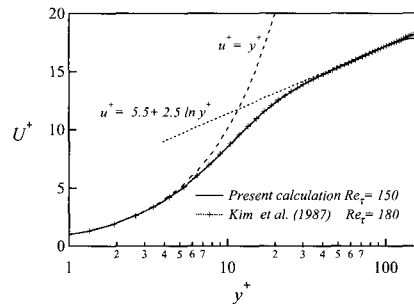


Fig. 4 Streamwise mean velocity profile.

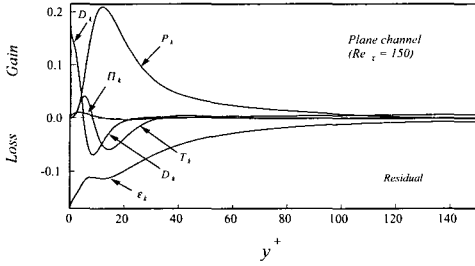


Fig. 5 Budgets of the turbulent kinetic energy.

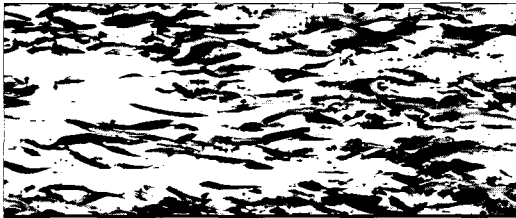


Fig. 6 Coherent structures near the wall.

즉, 이 지점에서 벽 근처 난류 유동이 가장 활발하다. 나머지 다른 항들은 난류 운동에너지의 생성에 작은 역할을 한다.

Fig. 6은 속도 구배 텐서의 두 번째로 큰 고유값(eigenvalue)과 주유동방향 와도를 이용하여 얻어진 난류 채널유동의 벽근처 ( $y^+ \approx 15$ ) 조직적 구조를 가시화한 것이다. 가시화에서 고유값(짙은색)과 주유동방향 와도(열은색)에 의해서 얻어진 응집구조가 서로 잘 일치함을 알 수가 있다.

#### 4. FVM 을 이용하는 DNS 에 의한 채널내에서 난류 유동장 해석

##### 4.1 지배방정식 및 수치해석방법

본 장에서 사용된 지배방정식은 3장의 식(1), (2)와 같다. 본 계산에서는 계산 속도의 가속화 및 많은 수의 격자를 사용하기 위해서 병렬처리를 수행하였다. 사용된 레이놀즈수는  $Re_\tau = 140$  이고,  $64 \times 97 \times 96$  격자계와 계산영역  $3\pi(L_x) \times 2(L_y) \times \pi(L_z)$  이 사용되었다. 시간차분에 대해서 time-splitting, 공간차분은 2차 중심 차분법을 적용하였다. 점성항에 대해서는 Crank-Nicolson 방법, 비선형항에 대해서는 2차 Adams-Bashforth 방법을 사용하였다.

#### 4.2 결과 및 고찰

Fig. 7에서 벽면 전단속도에 의해 무차원화된 난류강도(turbulence intensities)를 Lee/Choi (2001)의 DNS결과와 비교하였다. 본 계산의 결과가 Lee/Choi (2001)의 결과와 매우 잘 일치함을 볼 수가 있다.

Fig. 8은  $y^+ \approx 10$  에서  $x$ - $z$ 평면에서의 주유동방향의 변동속도( $u''$ )의 등고선을 보여준다. (이하 언급이 없는한 위치자 "은 시간평균성분에서 순간성분을 뺀 변동성분을 의미한다.) 여기서 양의 값은 실선으로, 음의 값은 점선으로 나타나 있다. Fig. 8에서의 유동패턴의 특징은 낮은 속도(파란색) 영역 근처에 위치해 있는 높은 속도(빨간색) 유동이 상당히 길게 뻗어 있다는 것이다. 점성아 영역은 횡방향으로 번갈아 가면서 높고 낮은 속도 띠(streak)들의 구조로 구성된다

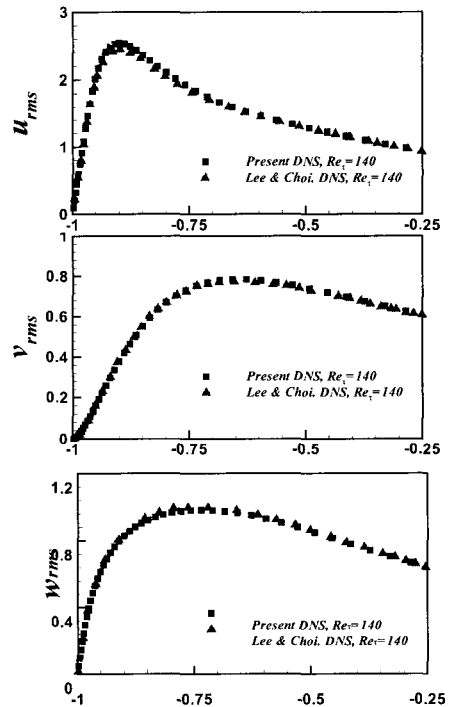


Fig. 7 RMS values of turbulent fluctuations.

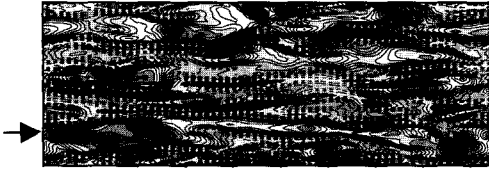


Fig. 8 Contours of  $u$  fluctuation in the  $(x, z)$  plane at  $y^+ \approx 10$

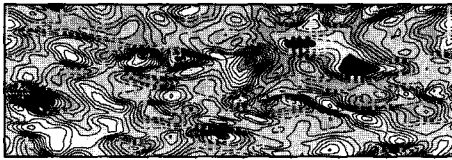


Fig. 9 Contours of  $u$  fluctuation in the  $(x, z)$  plane at  $y^+ \approx 85$ .



Fig. 10 Contours of  $u$  fluctuation in the  $(x, y)$  plane.

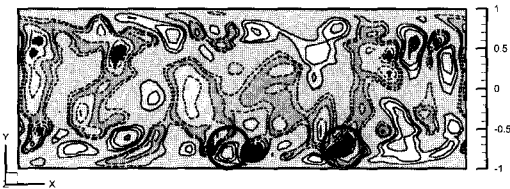


Fig. 11 Contours of  $v$  fluctuation in the  $(x, y)$  plane.

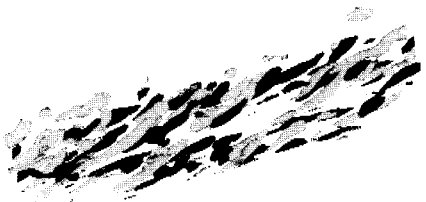


Fig. 12 Coherent structures defined by streamwise vorticity near the wall.

Fig. 9는 벽에서 좀더 떨어져 있는( $y^+ \approx 85$ )  $x$ - $z$ 평면에서  $u$ 의 등고선을 보여준다. 이 영역에서는 Fig. 8의 띠들의 정형화된 구조들은 더 이상 나타나지 않는다. 따라서, 띠들은 난류경계층의 독특한 특성이고 벽에서 멀어지면 띠들은 나타나지 않는다.

Fig. 10과 Fig. 11은 Fig. 8의 왼쪽 아래 모서리 부분(화살표)의 빠른 속도 영역을 통과하는  $x$ - $y$  평면에서  $u$ 와  $v$ 를 나타낸다. Fig. 11에서는 양의  $v$  값(실선)은 양의  $y$ 방향 유동을 나타내고 음의  $v$  값(점선)은 음의  $y$ 방향 유동을 나타낸다. 벽 근처에서 고속유동의 성분들( $u \cdot \nabla 0$ )은 sweep(Fig. 10과 Fig. 11의 빨간색 원)사건과 대응된다. 즉 아래 벽면근처에서는  $v < 0$  이고 윗 벽면 근처에서는  $v > 0$  이다. 다른 한편으로 저속도 유동의 성분은 일반적으로 벽 영역으로부터 분출(ejection, Fig. 10과 Fig. 11의 파란색 원)한다. 따라서 sweep 과 ejection event는 난류 운동에너지의 생성에 영향을 준다.

Fig. 12는 벽면 근처에서 주유동방향의 와들에 의한 응집구조를 보여준다. 주유동방향의 와들은 벽면과 약 13도의 기울기를 가지면서 발달되어져 가는 것을 볼 수가 있다.

이상의 결과는 Moin/Kim 등(1982)의 결과와 잘 일치한다.

### 5. FVM 을 이용한 LES 에 의한 채널내에서 난류 유동장 해석

#### 5.1 지배방정식 및 수치해석방법

일정 물성치의 비압축성 유동에 대한 지배방정식으로, 아래의 격자 필터링이 되어진 운동량 보존 방정식 및 연속 방정식이 본 계산에서 사용되어졌다.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\text{Re}_\tau} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0. \quad (4)$$

여기서  $\bar{u}_i$ 는 격자 필터링으로 얻어진 대형 스케일의 유동을 나타낸다. 식 (3)에서  $\tau_{ij}$ 는 subgrid 스

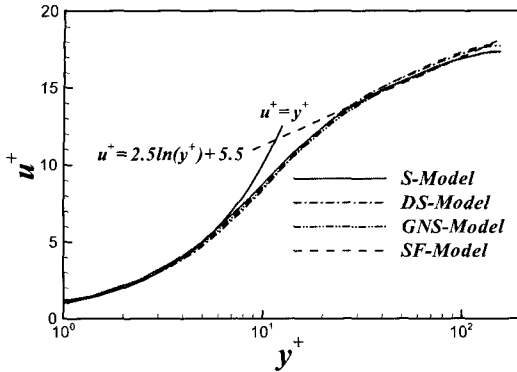


Fig. 13 Mean velocity profiles using different turbulent models.

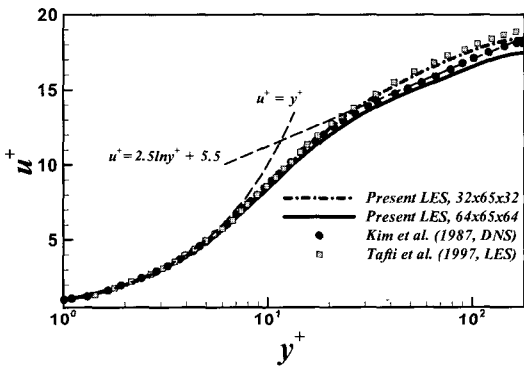


Fig. 14 Mean velocity profiles using DS model.

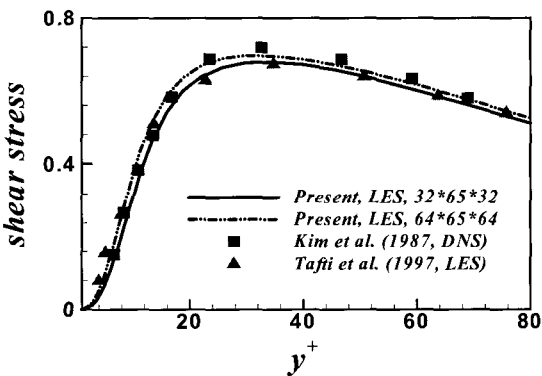


Fig. 15 Reynolds shear stress in wall coordinates.

케일 유동이 대형 스케일 (resolved scale) 유동에 미치는 영향을 나타내며, 다음과 같이 표현되어진다.

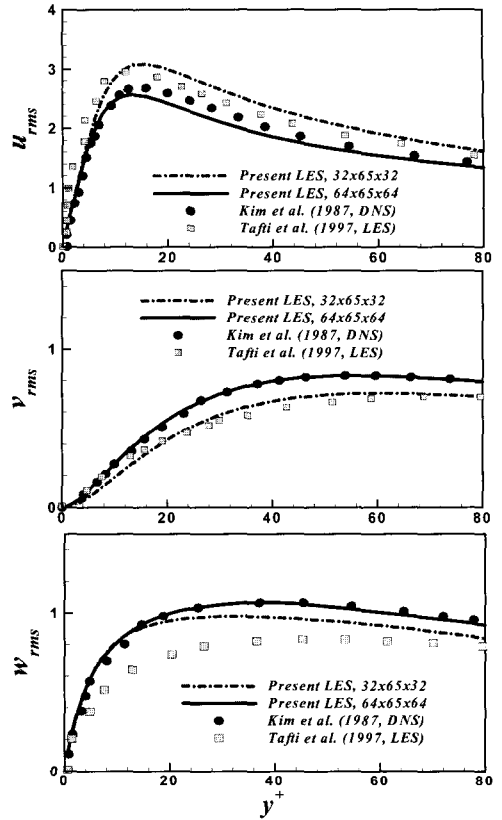


Fig. 16 RMS velocity fluctuations.

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \overline{u_i} \overline{u_j} \quad (5)$$

여기서 subgrid stress scale tensor  $\tau_{ij}$  는 Germano et al.(1991)이 제안한 dynamic model 을 사용하여 구한다.

본 장에서 사용된 레이놀즈 수는  $Re_\tau = 180$  이고,  $32 \times 65 \times 32$  와  $64 \times 65 \times 64$  의 두 격자계를 사용하였다. 나머지 수치해석방법은 4.1절에 설명된 방법과 동일하다.

### 5.2 결과 및 고찰

Fig. 13은 여러 가지 난류모델을 사용하여 나타난 평균속도 분포이다. 여기서 S-Model은 smagorinsky model, DS-Model은 dynamic smagorinsky model, GNS-Model은 generalized normal stress model, SF-model은 structure

function model을 의미한다 (박종천 등 2003). 여러 가지 모델중에 Dynamic 모델이 로그법칙과 벽법칙을 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Dynamic 모델을 사용하였다.

Fig. 14는 벽면 전단속도에 의해 무차원화 된 평균속도의 분포를 보여준다. 현재 계산결과들은 Kim et al.(1987)과 Tafti/Vanka(1997)의 결과들과 비교 되었다. 벽면 근처 점성 아경계층에서는 현재 계산결과들과 Kim et al.(1987)과 Tafti/Vanka(1997)의 계산결과가 일치한다. 그러나 벽면에서 떨어진 대수영역에서는 부족한 해상력에 의해 LES결과들이 정도가 떨어짐을 볼 수가 있다. 따라서 그리드가 많은 본 LES 결과가 벽법칙과 로그 법칙을 더욱더 잘 만족시키는 것을 알 수가 있다.

Fig. 15는 레이놀즈 스트레스 보여준다. 모든 결과들이 레이놀즈 스트레스의 최대값의 위치와 채널 높이 방향으로 선형적으로 변하는 레이놀즈 스트레스의 경향을 잘 묘사한다. Fig. 12에서와 마찬가지로 그리드가 많은 본 LES 결과가 Kim et al.(1987)의 결과를 잘 재현한다.

Fig. 16은 벽 근처에서의 주유동방향, 횡방향 그리고 벽면수직방향의 각각의 RMS값들을 보여준다. 격자수가 많은 현재 계산결과와 Kim et al. (1987)의 결과가 모든 방향에서 잘 일치한다. 격자수가 적은 경우의 계산결과는 DNS결과와 비교 시 주유동방향에서는 값이 크고, 횡방향 및 벽면 수직방향의 값은 작게 나온다. 이것은 적은 그리드에서 LES모델 사용시 과도한 수치소산에 기인되는 전형적인 결과이다.

## 6. 결론

본 연구에서는 선박의 마찰저항을 감소시키는 기술을 개발하기 위한 기초 연구로서, 3 차원 비정상 난류 유동 해석을 위한 수치 해석기법의 개발을 수행하였다.

병렬화를 위해 도입한 MPI 기법의 성능테스트를 통해 거의 선형적인 CPU 대 성능비를 얻었다.

개발된 각 수치해석기법들을 채널 난류 유동 해석에 적용하였다. 해석 결과들은 선행 연구 결

과들과 정성 및 정량적으로 잘 일치하였다. 따라서 개발된 수치해석의 기법들의 타당성을 검증할 수가 있었다.

향후, 본 연구에서 검증된 기법을 사용하여 선체 표면 마찰저항을 일으키는 역학적인 원인 규명과 최적의 감소 기법을 도출하기 위한 다양한 수치 실험들을 수행하고자 한다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단의 첨단조선공학연구센터의 지원으로 수행되었다.

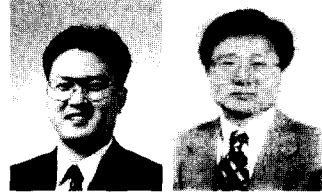
## 참 고 문 헌

- 김덕수, 김우전, 김형태, 2002, “ 폴리머와 미소 기포 주입에 의한 난류마찰저항 감소에 대한 연구,” 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp. 136-139.
- 김덕수, 김형태, 김우전, 2003, “ 미소기포 주입에 의한 마찰저항 감소에 대한 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 40 권, 제 3 호, pp. 1-8.
- 박종천, 강대환, 김방은, 윤현식, 전호환, 2003, “ 점성 수치파랑수조 구축을 위한 LES 기술의 평판간 난류유동의 적용,” 한국해양공학회 추계학술대회 논문집, pp. 204-212.
- 장진호, 김효철, 1999, “ 선체에 부착된 공기 공동에 의한 선박의 저항감소에 관한 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 36 권, 제 2 호, pp. 1-8.
- Kim, J., Moin, P. and Moser, R., 1987, “ Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number,” J. Fluid Mech., Vol. 177, pp. 133-166.
- Germano, M., Piomelli, U., Moin, P. and Cabot, W. H., 1991, “ A Dynamic Subgrid-Scale Eddy Viscosity Model,” Phys. Fluids, A3, No. 3, pp. 1760-1765.
- Lee, D. H. and Choi, H. C., 2001, “ Magnetohydro-dynamic turbulent flow in a channel at low magnetic Reynolds number,” J. Fluid Mech., Vol. 439, pp. 369-394.

- Moin, P. and Kim, J., 1982, " Numerical investigation of turbulent channel flow," J. Fluid Mech., Vol. 118, pp. 341-377.
- Tafti , D. K. and Vanka, S. P., 1990, " Large Eddy Simulation of Channel Flow using Finite-Difference Techniques," CFD Lab., Dep. Me. & Ind. Eng., UIUC, Report No. CFD 90-01.



< 윤 현 식 > < 구 본 국 > < Osama >



< 박 종 천 > < 전 호 환 >