

사항중인 모형선 주위의 난류 유동 계산

Calculation of Turbulent Flows around a Ship Model in Drift Motion

김 연규¹⁾, 김 정중²⁾, 김 형태³⁾

Y.G. Kim, J.J. Kim, H.T. Kim

A numerical simulation method has been under development for solving turbulent flows around a ship model in maneuvering motion using the Reynolds Averaged Navier-Stokes equations. The method used second-order finite differences, collocated grids, pressure-Poisson equation and four-stage Runge-Kutta scheme as key components of the solution method. A modified Baldwin-Lomax model is used for the turbulence closure. This paper presents a preliminary result of the computational study on turbulent flows past a ship model in drift motion. Calculations are carried out for a Series 60 $C_B=0.6$ ship model, for which detailed experimental data are available. The results of the present calculations are compared with the experimental data for hydrodynamic forces acting on the model as well as velocity distributions at longitudinal sections. Only fair agreements has been achieved. The computational results show the complex asymmetrical shear flow patterns including three-dimensional separations followed by formation of bilge vortices both in bow and stern regions.

1. 서론

조종성능이 우수한 선형과 부가물의 설계를 위해서는 계열모형시험에 의한 데이터베이스의 구축 및 신뢰할 수 있는 조종성능 추정 프로그램의 확보가 필수적이고, 계열모형시험에 의한 데이터베이스를 구축하기 위해서는 많은 시간과 비용이 소요되므로 현실적으로 도입할 수 있는 선형 파라미터의 수를 제한할 수밖에 없다. 따라서 한정된 데이터베이스에 기반을 둔 조종성 추정 방법의 적용 범위와 추정 정도 및 신뢰도에 한계가 발생하게 된다.

이러한 문제점을 해결하기 위한 한가지 방법으로 직진시의 선체의 유동을 해석하는데 많이 이용되어 온 전산유체역학(CFD) 방법을 조종운동중인 선체의 유동을 해석하는데 확장하여 적용하는 것이다. CFD 방법을 사용하여 직진시의 선체의 유동을 계산하는 것은 국내에서도 반석호, 김형태[1] 등에 의하여 많이 수행되어 왔으며, 자유표면의 영향을 고려한 계산도 수행된 바 있다[2]. 그러나 조종운동중인 선체에 대한 유동 계산은 국내의 경우 김선영[3]에 의하여 수행된 것 외에는 없는 실정이다. 외국의 경우 이미 직진시 유동의 수치해석 방법을 조종운동중인 선체에 대하여 확장 적용한 문헌[4,5]이 다수 있으며, 자유표면을 고려하여 계산한 문헌[6,7]도 있다.

본 논문에서는 조종운동중인 선체 주위 난류유동의 수치해석을 위한 RANS 방정식을 정식화하고, RANS 방정식의 수치해석에 사용할 CFD 코드 및 수치격자 생성 프로그램을 개발하며, 수치격자를 생성하여 이 프로그램을 이용하여 생성된 수치격자에 대한 난류유동 시뮬레이션을 수행한다. 그리고 계산된 결과를 기존의 계산결과 및 실험결과와 비교, 검증하기 위하여 Series 60 선형에 대한 계산을 수행하였다.

2. 지배방정식과 수치해석 방법

2.1 지배방정식

본 논문에서는 조종운동중인 선체에 작용하는 유동장을 묘사하기 위하여 Fig. 1에 보인 바와 같이 직교 좌표계를 기본 좌표계로 사용하였다. 지배방정식인 RANS 방정식은 직교좌표, (x, y, z) 를

1) 한국해양연구소 선박해양공학연구소 (305-600, 대전광역시 유성구 장동 171, Tel: 042-868-7262)

2) 충남대학교 공과대학 선박해양공학과 대학원 (305-764, 대전광역시 유성구 궁동 220, Tel: 042-821-6629)

3) 충남대학교 공과대학 선박해양공학과 교수 (305-764, 대전광역시 유성구 궁동 220, Tel: 042-821-6629)



사용해서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \left[\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right] \tag{2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \left[\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right] \tag{3}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \left[\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right] \tag{4}$$

$$\tau_{xx} = 2\nu_l \frac{\partial u}{\partial x}, \tau_{yy} = 2\nu_l \frac{\partial v}{\partial y}, \tau_{zz} = 2\nu_l \frac{\partial w}{\partial z}, \tag{5}$$

$$\tau_{xy} = \nu_l \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \tau_{xz} = \nu_l \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right), \tau_{yz} = \nu_l \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)$$

단, $\nu_l = \nu_e + \frac{1}{Re}$ 이다.

위의 방정식에서 모든 변수들은 선속 V_s , 배 길이 L 그리고 유체의 밀도 ρ 및 점성 계수 μ 로 무차원화 되었으며, P 는 $p + \frac{2}{3}k$ 로 정의된 변수를 나타낸다. 여기서, p 는 정압, 그리고 k 는 난류 운동에너지이다. 와점성 계수 ν_e 는 Chima[8] 등이 제안한 수정된 Baldwin-Lomax 모델을 사용하여 계산하였고, 선미 유동장의 예측을 개선하기 위해 Sung[9]등이 제안한 와점성 감소 기법을 적용하였다.

2.2 수치해석 방법

선체 주위의 점성 유동과 같이 복잡한 형상의 경계면을 갖는 유동 영역에 대한 수치 계산을 용이하게 하기 위해 물체 맞춤 좌표를 도입하고 지배방정식의 좌표변환을 수행하였다.

본 논문에서 사용한 수치 해석 방법은 김진, 김형태[10]가 이중모형 유동의 해석에 사용했던 것을 사항중인 선체에 적용할 수 있도록 확장한 것으로서 물체 맞춤 좌표계로 좌표 변환된 지배방정식의 공간 도함수들을 이산화하기 위하여 압력 구배 및 점성항들은 3점 중심 유한 차분을 사용하였고, 대류항은 2차 정도의 풍상 차분을 사용하여 근사하였다.

시간 진행에 대한 수치 해법으로 4단계 Runge-Kutta법을 사용하였으며, 시간 진행법의 수렴 속도를 향상시키기 위해서 잔여항 평균(implicit residual smoothing) 기법을 사용하였다[11].

2.3 경계조건 처리

수치 계산에 사용한 각 경계면(Fig. 1 참조)에서의 경계조건은 다음과 같다.

- (1) 입구면, 출구면, 바깥경계면 : 속도 성분은 균일류 조건 ($u = \cos \beta, v = \sin \beta, w = 0$)을 사용하고, 압력에 대해서는 Neumann 경계 조건을 적용하였다.
- (2) 선수 전방 및 선미 후방 중심면과 keel 면 : 좌표 변환 관계식의 처리 및 압력 성분의 계산에 어려움을 피하고 계산의 편의를 위하여 이 면에서의 속도와 압력 성분은 직접 계산하지 않고 주변의 값을 평균하여 구하였다.
- (3) 수면 : 조종 운동의 해석에 있어서 일반적으로 자유표면에 의한 영향은 무시하며, 본 논문에서도 이중 선체 유동에 대하여 계산을 수행하였다. 따라서 이 경계면에 대하여 유동이 대칭이라는 가정에 근거하여 z -축 방향 속도 성분은 영, 그 밖의 속도 성분 및 압력의 법선 방향 도함수가 영이라는 경계 조건을 사용하였다.
- (4) 선체 표면 : 속도 성분에 대해서는 물체 표면과의 상대 속도가 영이라는 경계 조건 ($u = v = w = 0$)을 적용하고, 압력에 대해서는 Neumann 경계 조건을 적용하였다.

한편, 출구와 바깥 경계면에 대한 경계조건은 수치격자의 크기가 충분히 크다는 가정하에 균일류 조건을 사용하였으나, 수치격자가 충분히 큰 영역을 나타내지 못할 경우에는 문제가 발생할 여

지가 있다. 따라서 출구면과 바깥 경계면의 경계 조건에 대한 연구를 좀더 수행할 필요가 있다. 또한 선수 전방 및 선미 후방 중심면과 keel 면에 대한 속도와 압력 성분을 주변의 값을 이용하여 구하는 방법을 사용하였는데, 실제로 이들은 내부 영역에 속하므로 이들을 지배 방정식을 사용해서 직접 계산하는 기법에 대한 연구도 필요하다.

3. 수치 계산 결과

본 논문에서는 선체 주위의 3차원 난류 유동에 대한 RANS 방정식의 수치 계산을 위하여 널리 사용되고 있는 O-O형 수치 격자를 생성하는 방법을 선택하였으며, O-O형 수치 격자는 선수와 선미 형상을 정확히 표현해 줄 뿐 아니라 선체 표면 부근에 격자를 효율적으로 집중하여 분포시킬 수 있는 장점이 있다. 본 논문에서 사용한 격자는 3차원 Poisson 방정식을 풀어서 생성하였으며, 선체 주위의 격자 조절은 Sorenson의 방법을 3차원으로 확장하여 적용하였다[12]. 본 논문에서는 실험 자료[13]가 비교적 풍부한 Series 60 ($C_B=0.6$) 선형을 대상으로 자유 수면의 효과를 무시하고 대칭면(symmetry)으로 처리한 이중모형 유동에 대하여 수치 해석을 수행하였다. 레이놀즈 수는 1.7×10^6 로 고정하고, 편류각 β 가 각각 2.5° , 5° , 7.5° , 10° 인 경우에 대해서 계산하였으며, 계산에 사용된 수치 격자 ($121 \times 35 \times 21$)는 Fig. 2와 같다.

먼저, 수치해석 결과로부터 얻은 각 편류각에서의 유체력을 실험 자료[13] 및 김선영의 계산결과[3]와 비교하여 Fig. 3에 보였다. 그림에서, C_X , C_Y 는 $1/2\rho V_s^2 S$ 로, C_N 은 $1/2\rho V_s^2 L^3$ 으로 무차원화 되었다. 계산된 종 방향 힘은 비교된 모든 편류각에 대해서 실험보다 작게 나타났고, 횡 방향 힘(side force)도 실험값 보다 작게 나타났다. 또, yaw 모멘트 역시 실험보다 작게 추정되었다. 이러한 차이는 대체로 수치해석 결과의 부정확성에 기인하는 것으로 보이나, 한편으로는 실험 자료가 자유 수면이 존재하는 수조 실험으로부터 얻은 결과이고, 또 모형선의 침하(sinkage), 트림(trim) 그리고 횡경사(heel)가 허용된 상태인 반면에, 수치해석 결과는 이중 모형 유동의 가정 하에서 얻어진 데 기인한 것으로도 볼 수 있다.

Fig. 4에서는 $x/L = -0.1, 0.1, 0.4, 0.5$ (AP) 단면에 대하여 x-축 방향 속도(u) contour를 실험 결과와 본 계산 결과를 비교해서 보여주고 있다. 또한, Fig. 5에서는 같은 단면 위치에서 횡방향 속도(v-w) 벡터를 동일한 방식으로 보였다. 계산 결과에서는 전반적으로 계측 결과보다 보오텍스의 세기가 약하게 나타나는 것을 볼 수 있으며, 선수에서 발생한 보오텍스의 경우 선체 중앙으로부터 더욱 많이 벗어난 것을 알 수 있다. 그리고 편류각이 없는 상태에서 직진하는 선체에서 나타나는 좌우 대칭 선미 보오텍스는 편류각이 있을 경우 windward side의 보오텍스는 그 크기가 매우 약해져서 존재가 불분명할 정도이며, $x/L > 0.6$ 에서는 보이지 않는다. 그와는 반대로 lee side의 보오텍스는 그 세기가 더욱 강해져서 비교적 완전하게 형성된 모습을 보이고 있다. lee side 경계층의 두께는 선수부로부터 midship까지는 실험 결과에서의 얇은 형상을 본 계산 결과가 잘 쫓아가고 있지만, midship을 지나면서 실험 결과에서 경계층이 두꺼워지는 현상을 본 계산 결과가 잘 쫓아가지 못하는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 본 계산에 바깥 경계면에서의 경계조건으로 균일류 조건을 사용하면서 선미부분에서의 경계층의 발달을 약화시킨 데 기인하는 것으로 생각되며, 바깥 경계면에 대한 경계조건의 적용에 대한 연구가 추후 수행되어야 할 것으로 생각된다.

Fig. 6에는 편류각 변화에 따른 선체 길이방향의 x-축 방향 속도 분포를 보여주고 있으며, 선체 길이 방향을 따른 경계층 및 후류의 발달 과정을 잘 나타내고 있다. 편류각에 따른 x-축 방향 속도 분포를 이용하여 선수 발지에서의 3차원 유동 박리에 따른 종방향 보오텍스의 발달 과정을 비교하여 보면, 편류각이 큰 경우 선수 발지 보오텍스의 세기가 약간 과도하게 계산되어진 것으로 판단되며, 특히 $\beta = 10.0^\circ$ 에서 이러한 경향을 명확히 알 수 있다. 현재로서는 이와 같은 현상의 원인을 정확히 알 수는 없으나 선수 부근의 수치격자와 난류모형에 기인한 것으로 짐작된다.

4. 결론

본 논문에서는 RANS 방정식의 수치 해법을 사용해서 편류각을 갖고 사항중인 선체 주위의 난류 유동장을 시뮬레이션할 수 있는 프로그램을 개발하였으며, 개발된 프로그램을 이용하여 실험



결과가 있는 Series 60 선형에 대한 계산을 수행하였다. 얻어진 계산 결과를 실험 및 기존의 계산 결과와 비교, 분석하였다.

본 논문의 결과로부터 확인된 문제점 및 이의 해결을 위한 앞으로의 연구 방향은 다음과 같다.

◆ 본 계산 결과에 있어서 확인된 문제점은 선수 벌지에서 형성된 보오텍스의 과도한 추정과 선미 벌지 보오텍스 및 선미 경계층의 부정확한 추정을 들 수 있으며, 이로 인하여 편류각에 따른 유체력들이 실험값과 잘 일치하지 않는 것을 볼 수 있었다.

◆ 본 계산에서 사용한 O-O형 수치격자 대신 선수 벌지 보오텍스의 정확한 추정을 위한 새로운 수치격자를 도입하는 것이 필요하다. 그리고 본 계산에서 바깥 경계면의 경계조건으로 사용한 균일류 조건을 물리적으로 적합한 경계조건으로 개선하는 것에 대한 연구가 필요하며, 편류각이 있는 경우에 선체 주위에서 발생하는 3차원 박리 현상과 선미부의 두꺼운 비대칭 경계층 및 후류를 잘 재현할 수 있는 난류모형의 적용에 대한 연구를 수행해야 한다. 마지막으로 계산 영역의 크기 및 수치격자의 해상도에 따른 유동 해석 결과의 변화를 조사해야 한다.

후기

본 논문은 충남대학교 학연 박사과정중에 수행된 연구결과의 일부이다.

참고문헌

- [1] Van, Suak-Ho and Kim, Hyong-Tae, "A Computational Study on Turbulent Flow Characteristics around Full-form Tankers", J. of Hydropace Tech., Vol. 2 No. 2, 1996
- [2] Kim, J. J., Kim, H. T. and Van, S. H., "RANS Simulation of Viscous Flow and Surface Wave Fields around Ship Models", Proceedings of 3rd Osaka Colloquium on Advanced CFD Applications to Ship Flow and Hull Form Design, 1998. 5.
- [3] 김 선영, "사항중인 선박 주위의 점성유동 계산", 대한조선학회 98년도 추계학술대회 논문집, 1998, 11.
- [4] Sato, T., Izumi, K. and Miyata, H., "Numerical Simulation of Maneuvering Motion", Proceedings of the 22nd Symposium on Naval Hydrodynamics, Washington, D.C., 1998. 9.
- [5] Hochbaum, A. Cura, "Computation of the Turbulent Flow Around a Ship Model in Steady Turn and in Steady Oblique Motion", Proceedings of the 22nd Symposium on Naval Hydrodynamics, Washington, D.C., 1998. 9.
- [6] Alessandrini, B. and Delhommeau, G., "Viscous Free Surface Flow Past a Ship in Drift and in Rotating Motion", Proceedings of the 22nd Symposium on Naval Hydrodynamics, Washington, D.C., 1998. 9.
- [7] Tahara, Y., Longo, J., Stern, F. and Himeno, Y., "Comparison of CFD and EFD for the Series 60 $C_B=0.6$ in Steady Yaw Motion", Proceedings of the 22nd Symposium on Naval Hydrodynamics, Washington, D.C., 1998. 9.
- [8] Hamasaki, J., Himeno, Y., and Tahara, Y., "Application of Computational Fluid Dynamics to Ship Hull Optimization Problem," Proceedings, 2nd International Conference on Hydrodynamics, Hong Kong, Vol. 1, 1996, p23.
- [9] Tahara, Y. and Stern, F., "A Large-Domain Approach for Calculating Ship Boundary Layers and Wakes and Wave Fields for Nonzero Froude Numbers," Journal of Computational Physics, Vol. 127, 1996, p. 398.
- [10] 김 진, 김 형태, "선체주위 난류유동 계산에서 H-O와 O-O형 격자의 비교", 대한조선학회 96년도 추계학술대회 논문집, 1996, 11.
- [11] Jameson, A. and Schmidt, W. "Some Recent Developments in Numerical Methods for Transonic Flows", Computer Methods in Applied Mech. and Eng., 51, 1985
- [12] 김 우진, 김 도현, 반 석호, "선체주위의 점성유동 계산을 위한 3차원 공간 격자 생성방법", 대한조선학회 논문집, Vol. 36, No. 1, 1999. 2.

[13] Longo, J. and Stern, F., "Yaw Effects on Model-Scale Ship Flows", Proceedings of 21st Symposium on Naval Hydrodynamics, Trondheim, 1996. 6.

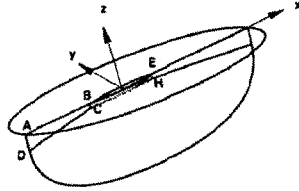


Fig. 1 Coordinate system and physical domain.

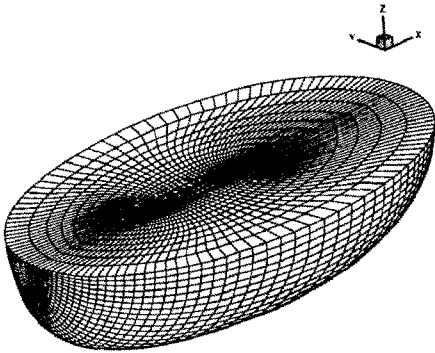


Fig. 2 Numerical grid for a Series 60 model (121 × 35 × 21)

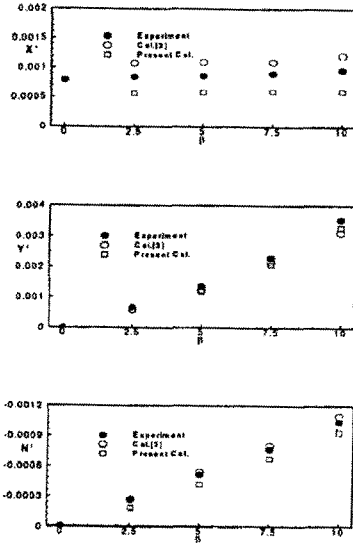
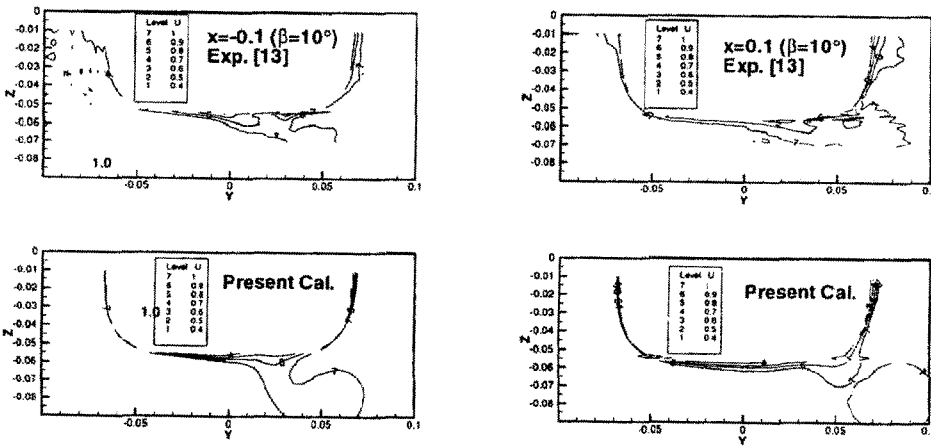


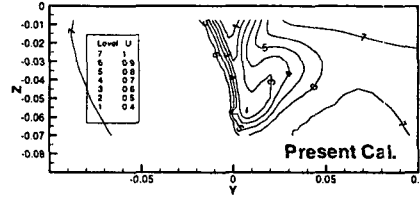
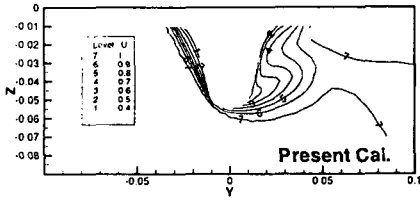
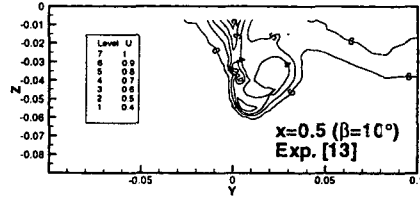
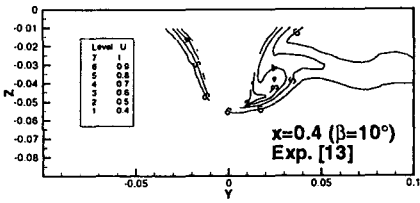
Fig. 3 Longitudinal and transverse forces and yaw moment.



(a) $x/L = -0.1$

(b) $x/L = 0.1$

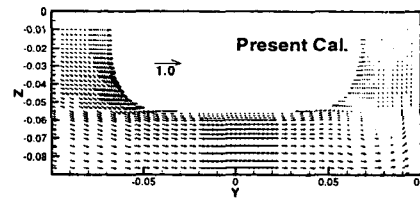
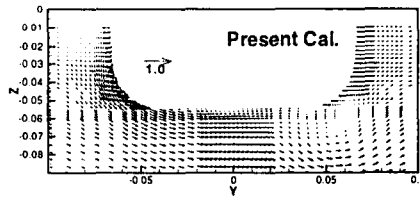
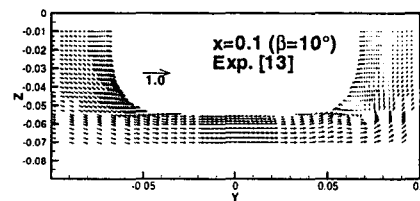
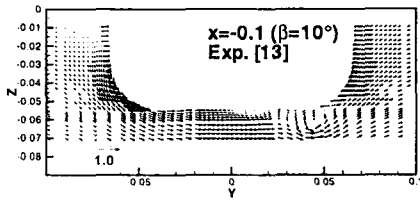
Fig. 4 Comparison of axial velocity contours ($\beta = 10^\circ$, $R_e = 1.7 \times 10^6$).



(c) $x/L = 0.4$

(d) $x/L = 0.5$

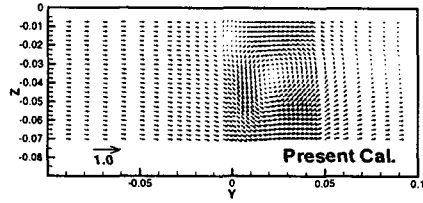
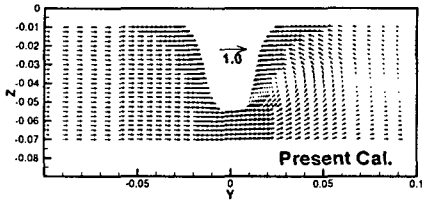
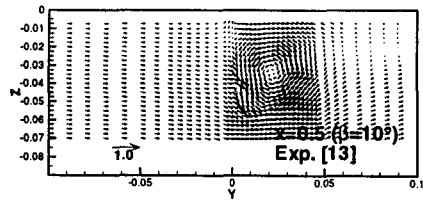
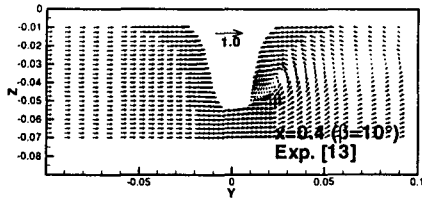
Fig. 4 Continued



(a) $x/L = -0.1$

(b) $x/L = 0.1$

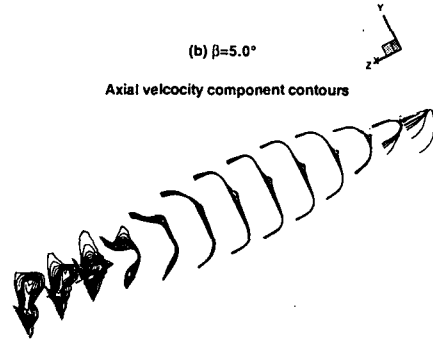
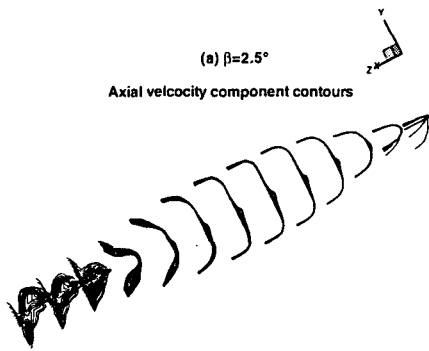
Fig. 5 Comparison of transverse velocity vectors ($\beta=10^\circ$, $R_e=1.7 \times 10^6$).



(c) $x/L = 0.4$

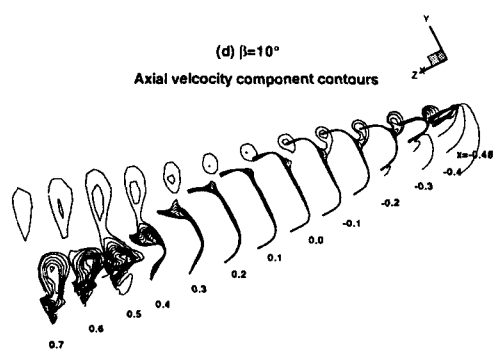
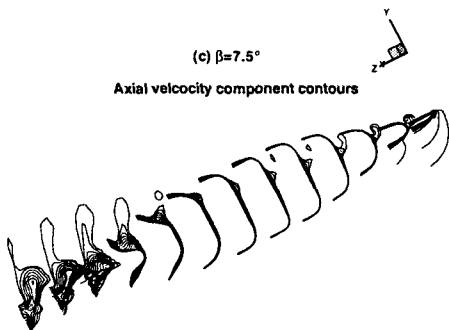
(d) $x/L = 0.5$

Fig. 5 Continued



(a) $\beta = 2.5^\circ$

(b) $\beta = 5.0^\circ$



(c) $\beta = 7.5^\circ$

(d) $\beta = 10^\circ$

Fig. 6 Longitudinal variation of axial velocity contours