

## 받음각을 갖는 축대칭 물체의 후류 유동 계산

김희택\*, 이평국\*, 김형태†\*

충남대학교 선박해양공학과\*

### Computation of Wake Flow of an Axisymmetric Body at Incidence

Hee-Taek Kim\*, Pyoung-Kuk Lee\* and Hyoung-Tae Kim†\*

Dept. of Naval Architecture & Ocean Eng., Chungnam National Univ.\*

#### Abstract

The turbulent wake flow of an axisymmetric body at incidence of  $10.1^\circ$  is investigated by commercial CFD code, Fluent 6.2. Reynolds stress turbulence model with wall function is applied for the turbulent flow computation. For the grid generation, the Gridgen V15 is used. Numerical predictions are compared with experimental data for the validation. The computed results show good agreements with the experimental measurements, implying that the CFD analysis is a useful and efficient tool for predicting turbulent flow characteristics of wake field of an axisymmetric body at incidence.

※Keywords: Turbulent wake flow(난류 후류 유동), Axisymmetric body(축대칭 물체), CFD(전산유체역학), Finite volume method(유한체적법), Reynolds stress turbulence model(레이놀즈 스트레스 난류 모델),

#### 1. 서언

선박, 자동차, 항공기 등의 후류(wake) 유동은 종방향 볼티시티와 3차원 난류전단유동(turbulent shear flow)에 의해 특징지어진다. 물체 후류의 종방향 볼티시티는 흔히 물체 표면 경계층의 박리로부터 발생하여 종방향 볼텍스 유동 구조를

형성한다. 현재까지 후류 볼텍스 유동에 대한 많은 예측이 이루어졌지만, 대부분 물체에 근접한 영역으로 한정되어 있었고, 하류 먼 영역까지 예측된 경우는 거의 없었다. 국내에서는 주로 모형선 주위 평균유속에 대한 예측이 이루어졌다. 김병준 등(2005)은 풍동에서 5공 피토관을 사용하여 프로펠러에 의한 LNG 운반선 이중모형 선미의 유속변화를 예측한 바 있으며, 백부근과 이상준(2005)은 PIV 기법을 이용하여 자유표면과 수심 깊이가 프로펠러 주위 유동에 미치는 영향에 대한 연구를 수행한 바 있다. 한편, 축대칭 물체 주위의

접수일: 2005년 12월 5일, 승인일: 2006년 2월 5일

† 주저자, E-mail: h-tkim@cnu.ac.kr

Tel: 042-821-6629

유동 계측과 관련하여 Chesnakas and Simpson(1997)은 타원체 주위 3차원 유동 박리에 대해 조사하였고, Hyun and Patel(1991)은 축대칭 물체 프로펠러 주위의 유동 계측을 수행하였다. 또한 Kim and Patel(1998)은 풍동에서 열선유속계(Hot-wire)를 사용하여 받음각을 갖는 축대칭 물체(Lowa Body) 후류의 평균유속과 난류응력을 물체로부터 비교적 멀리 떨어진 후류까지 계측한 바 있다.

본 연구에서는 Kim and Patel(1998)의 실험과 동일한 조건의 유동에 대하여 수치 계산을 수행하고 계산 결과를 실험과 비교, 검토하여, 후류 유동에 대한 정보를 제공하고 상용 코드를 사용한 수치 계산에 의해 평균유속과 난류응력 분포를 어느 정도까지 정확히 추정할 수 있는지를 조사하였다.

2. 수치해석 방법

축대칭 물체(Lowa Body)는 길이가 1.5161m, 최대 직경이 0.1391m이며, 그 기하학적 형상을 Fig. 1에 간단히 나타내었다. 수치 계산은 실험과 동일한 레이놀즈 수인  $2.2 \times 10^6$ 에서 수행하였다. 여기서, 레이놀즈 수인  $R_e$ 는 다음과 같이 정의되며,  $U_0$ 는 유입속도이고,  $L$ 은 물체의 길이이다.

$$R_e = \frac{U_0 L}{\nu} \tag{1}$$

2.1 좌표계 및 지배방정식

기본 좌표계로는 Fig. 2에 도시한 바와 같이 Tail을 원점으로 유입속도 방향을 x축, 연직 상방향을 z축, 그리고 우현 방향을 y축으로 하는 직교 좌표계(Cartesian coordinates)를 사용하였으며, 지배방정식인 연속 방정식과 운동량 방정식은 다음과 같다.

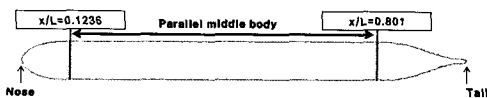


Fig. 1 Configuration of lowa body

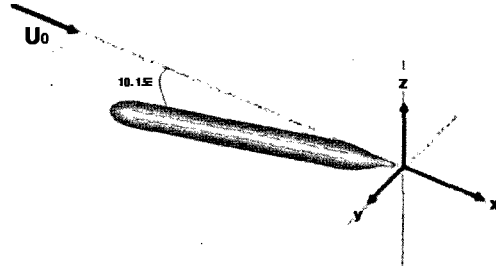


Fig. 2 Coordinate system

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{2}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) \\ &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \\ & \quad + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_j u'_i}) \end{aligned} \tag{3}$$

여기서,  $u = (u, v, w)$ 는 각 좌표축  $x = (x, y, z)$  방향의 평균속도 성분,  $\mu$ 는 동점성계수,  $p$ 는 정압,  $-\rho \overline{u'_j u'_i}$ 는 Reynolds stresses를 나타낸다. Reynolds stresses에 대한 수송방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u'_i u'_j})}_{\text{Local Time Derivative}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k \overline{u'_i u'_j})}_{C_{ij} = \text{Convection}} \tag{4}$$

$$= -\underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k}[\rho \overline{u'_i u'_j u'_k} + p(\delta_{kj} \overline{u'_i} + \delta_{ik} \overline{u'_j})]}_{D_{T,q} = \text{Turbulent Diffusion}}$$

$$+ \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \mu \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u'_i u'_j}) \right]}_{D_{L,q} = \text{Molecular Diffusion}} - \underbrace{\rho (\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k})}_{P_{ij} = \text{Stress Production}}$$

$$+ p \left( \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u'_j}}{\partial x_i} \right) - 2\mu \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_k} \frac{\partial \overline{u'_j}}{\partial x_k} + S_{user}$$

$\phi_{ij} = \text{Pressure Strain} \quad \epsilon_{ij} = \text{Dissipation}$

계산 영역의 유입 경계는 Nose로부터 물체길이의 1배, 외부 경계는 중심축으로부터 1배 떨어진

곳에 잡았으며, 이는 선박에 통상 적용되어온 방법이다. 유출 경계는 물체로부터 비교적 멀리 떨어진 후류 유동에 대한 정보를 얻기 위해 Tail로부터 3배 떨어진 위치에 정하였다.

2.2 난류모형 및 이산화

수치계산은 실험조건과 동일하게 10.1도 받음각을 갖는 Iowa Body에 대해 수행하였으며, 상용 코드인 Fluent를 사용하였다. 본 연구에서는 실험에서 계측된 난류응력(Reynolds stresses)을 직접 비교, 검토하기 위하여 Kim(2001)에 의해 개선된 Reynolds stress 난류모형을 사용하였으며, Launder and Spalding의 wall function을 적용하였다. 지배방정식의 대류항은 3차 정도의 QUICK (Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinematics) 방법으로, 확산항은 2차 정도의 중심차분법으로 보간하고, 2차 정도의 수치 적분을 사용하여 이산화하였다. 압력에 대해서는 Rhie and Chow의 방법을 수정한 Fluent의 표준 방법을 사용하였고, 속도-압력 연성은 SIMPLEC 방법을 사용하였다. 반복계산의 수렴을 위한 완화계수로는 압력의 경우 0.3, Momentum은 0.7, Turbulence kinetic energy 및 Turbulence dissipation rate는 0.8, Reynolds stresses는 0.5를 사용하였다.

2.3 수치 격자계

유동 계산을 위한 수치 격자는 상용 코드인 Gridgen을 사용하여 다블록 격자계로 생성하였다. 물체 표면에 길이 방향과 폭 방향 그리고 거스 방향으로 188×43×49 개의 격자를 분포시켰으며, 사용된 총 격자수는 약 40만개이다. 또한, Fig. 3에 보인 것처럼 후류 볼텍스 유동의 이동 경로를 고려하여 격자를 집중시켜 분포하였고,  $y^+$ 는 30~80 범위를 유지하도록 하였으며,  $y^+$ 는 아래와 같이 정의된다.

$$y^+ = U_\tau y / \nu \tag{5}$$

여기서,  $U_\tau (= \sqrt{\tau_w / \rho})$ 는 벽 마찰속도이고,  $y$ 는 표면으로부터 떨어진 최소격자 간격이다. Fig. 4는 사용된 격자의  $y^+$  분포를 보여주고 있다.

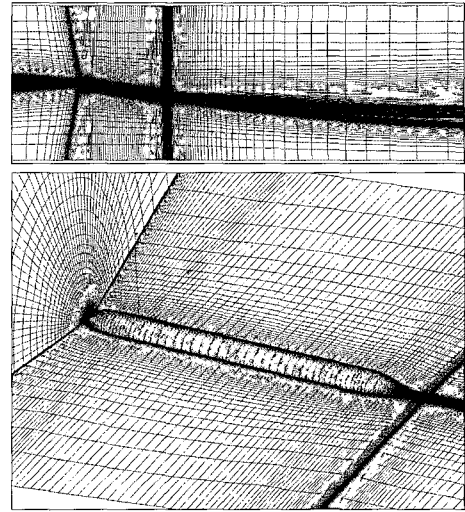


Fig. 3 Multi-block structured grid system around Iowa body

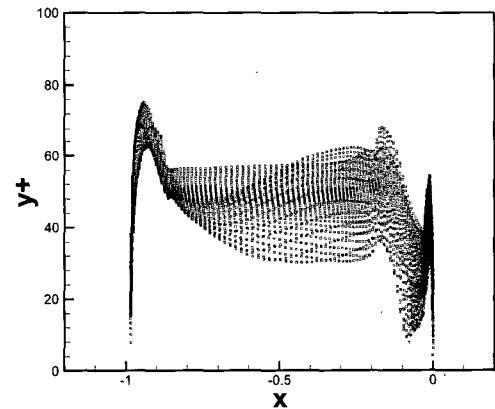


Fig. 4 Distribution of  $y^+$  on the Iowa body surface

3. 수치해석 결과

3.1 Iowa Body 주위 유동특성

Fig. 5는 바람맞이뒀면(leeward side) 중심선을 0도로 하고 거스(girth) 방향으로 45도씩 돌아가며 길이 방향으로 자른 Iowa Body 표면의  $C_p$  분포를 나타낸 것이다. 우선, 받음각으로 인해 물체 표면 압력계수 분포가 거스 방향에 따라 달라지는 것을 볼 수 있다. 또 Nose 부근의 정체점에서  $C_p$ 값이

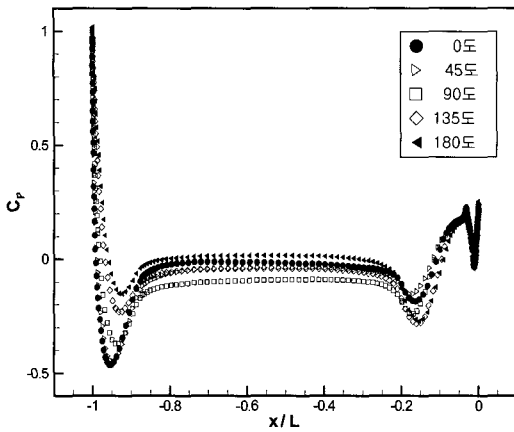


Fig. 5 Longitudinal variation of surface pressure on the lowa Body at different longitudes

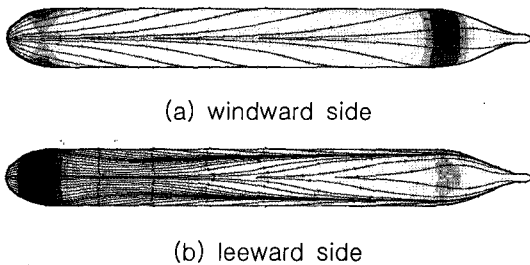


Fig. 6 Limiting streamlines on the lowa body

최대였다가 유동이 가속되면서 급격히 낮아지고, 이후  $C_p$ 값이 다시 증가하여 중앙평행부(parallel middle body)에서 거의 일정한 값을 유지하며, 단면 반경이 작아지면서 잠시 낮아지다 Tail로 가면서 다시 증가한다. 프로펠러의 장착을 고려한 Tail형상의 곡률 변화로 인해서 증가하던 압력이 급격히 감소했다가 회복되는 특징을 볼 수 있다.

Fig. 6에는 물체 표면에서의 벽마찰 응력의 방향으로 정의된 한계유선(limiting streamlines)을 보여주고 있다. 바람맞이면의 한계유선은 Fig. 6(a)와 같이 거스 방향의 압력구배에 의해 물체 표면 중앙의 유선을 중심으로 대칭을 이루면서 양쪽으로 갈라지며 배후면 쪽으로 이동하고, Fig. 6(b)에 나타난 것처럼 바람맞이뒷면(leeward side)

에서 한계유선이 모여 detachment line을 형성한다. 바람맞이면에서 배후면 쪽으로 돌아 올라오며 발달된 측면유동(cross flow)은 바람맞이뒷면 중앙에서 아래쪽으로 내려오는 측면유동과 만나 detachment line에서 물체 경계층의 3차원 박리가 발생하여 한 쌍의 종방향 볼텍스를 형성하는 것을 알 수 있다.

### 3.2 후류유동 특성

Fig. 7과 같이 lowa Body의 Tail로부터  $x/L=0.007, 0.8, 2.35$  떨어진 위치에서 평균 유속과 레이놀즈 응력(Reynolds stresses)을 실험과 비교하여 도시하였으며, 유속은 유입속도( $U_0$ )로, 평면상의  $y, z$ 좌표는 lowa Body의 최대 직경( $D_{max}$ )으로 무차원화 하였다.

#### 3.2.1 평균유속 분포

Fig. 8에는 평균유속 분포를 실험과 비교하여 도시하였다. Fig. 8(a)는  $x$ -축 방향 속도( $U$ ) 분포를 나타낸 것으로 회전 방향이 서로 반대인 한 쌍의 종방향 볼텍스에 의한 영향이 명확하게 나타나며, 이 후류 볼텍스의 영향은  $x/L=2.35$ 인 위치까지도 지속된다.  $x/L=0.007$  위치에서 최소치는  $0.76U_0$ 로 실험보다 6%정도 크게 계산되었고, 계산과 달리, 실험에서는 모형을 고정한 wire 후류의 흔적이 나타난다. 한편, 계산과 실험 모두 볼텍스가 하류( $x/L=2.35$ )로 가면서 수평방향보다 수직 방향으로 더 빠르게 확산되는 것을 볼 수 있다. Fig. 8(b)는  $y$ 축 방향 속도( $V$ ) 분포로서  $x/L=0.007$ 에서 계산된 속도 범위는  $-0.32U_0$ 에서  $0.06U_0$ 이고, 최소치가 실험보다 약간 크게 추정되었으며,  $x/L=2.35$ 에서는 조금 더 작은 값까지 계산된 것을 볼 수 있다.

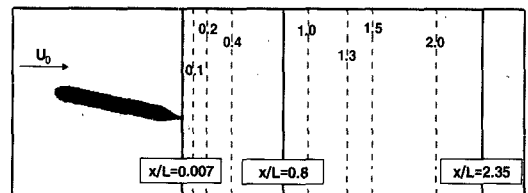


Fig. 7 Positions for comparison

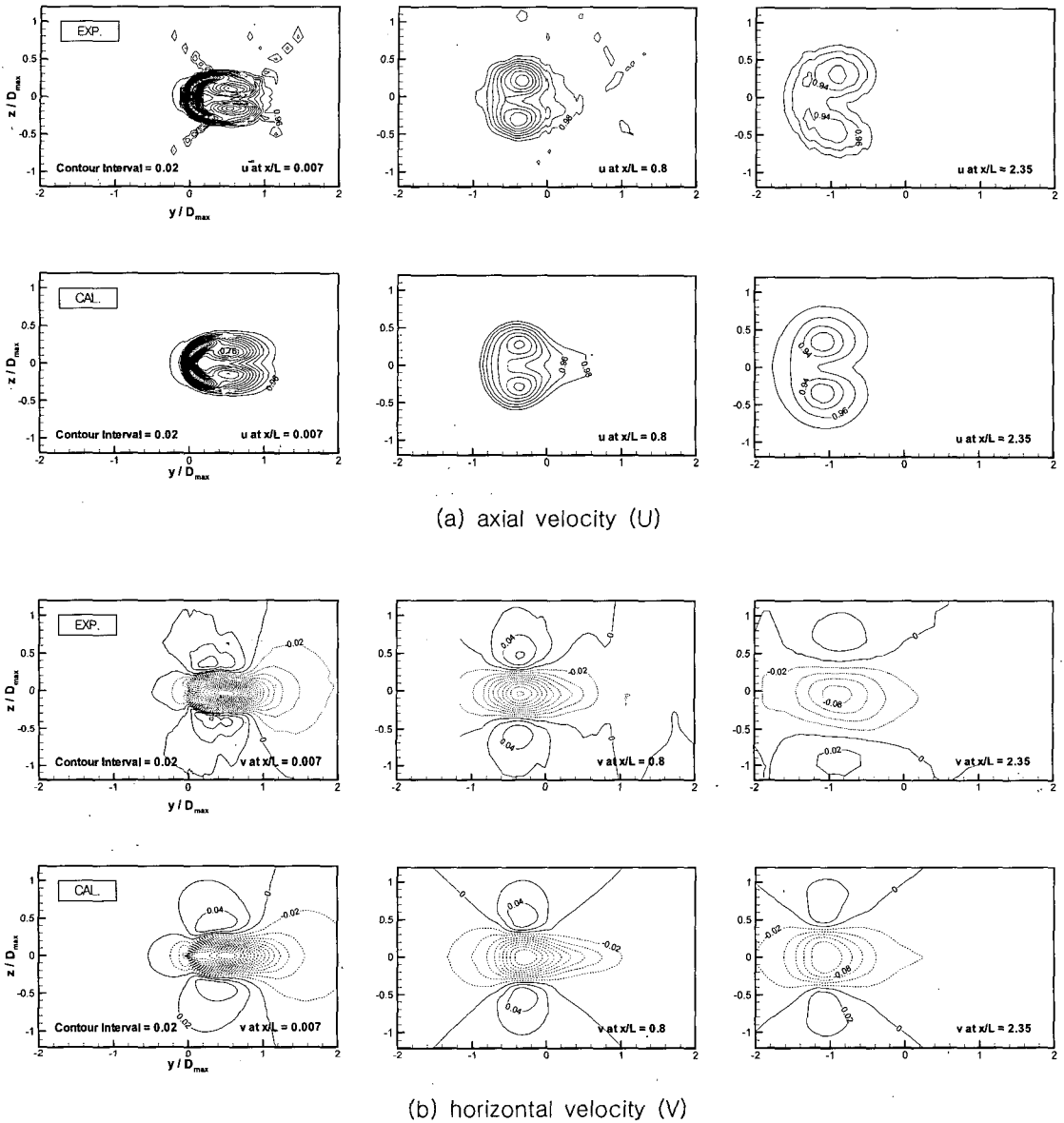


Fig. 8 Mean velocity and axial vorticity

Fig. 8(c)는 z-축방향 속도(W) 분포를 나타낸 것으로 하류로 가면서 4개의 타원 형상을 띠고 있으며 볼텍스 쌍의 영향으로 인해 첫 번째와 세 번째 원은 음의 값을 두 번째와 네 번째 원은 양의 값을 갖는다.

x/L=0.007에서 속도 범위는  $-0.08U_0$ 에서  $0.08U_0$ 이고 최대값은 실험보다 약 12% 작게 나타

났다. 이상의 평균유속 분포를 통해 실험에서의 결과와 대체로 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 8(d)는 axial vorticity 분포로 한쌍의 볼텍스가 명확하게 보이며 x-축방향 속도 분포와 마찬가지로 x/L=2.35인 위치까지 유지되는 것을 확인하였다. 또한 x/L=2.35인 위치에서는 더 작은 값

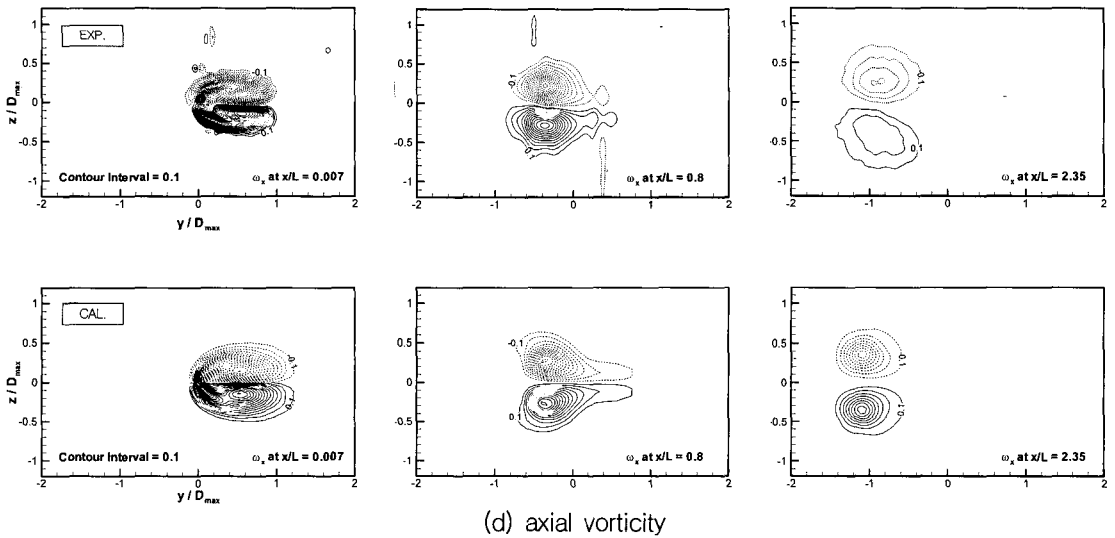
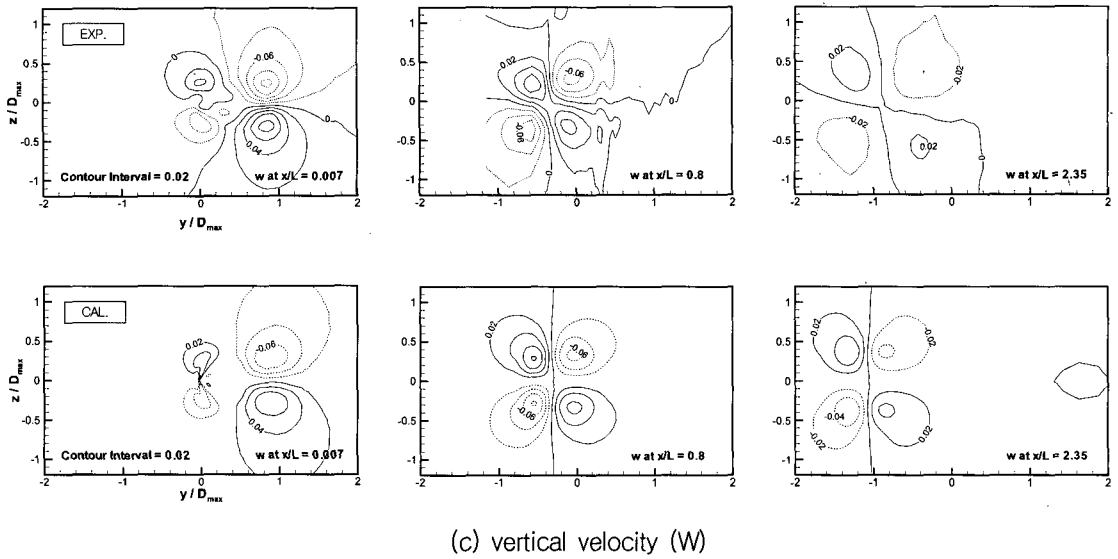


Fig. 8 Mean velocity and axial vorticity(continued)

까지 계산된 것을 볼 수 있다.

lowa Body Tail에 근접한 후류영역( $x/L \leq 0.1$ )에서는 실험과 같이 빠르게 선형적으로 감소하다가, 이후 하류( $x/L=2.35$ )로 갈수록 완만하게 감소하는 것을 볼 수 있다. Fig. 10과 11은 볼텍스 내의 최소 속도점의 위치를 나타낸다. Fig. 10에 보인 것처럼 Tail에 가까운 후류 영역에서는 받음각(10.1도)보다 3도 정도 작은 각을 이루고, 하류

( $x/L=2.35$ )로 가면서 점차 균일유동 방향으로 근접하여 균일유동과 약 2도 정도의 차이를 나타내고 있다.

### 3.2.2 종방향 후류 볼텍스의 영향

Fig. 9는 볼텍스 내에서 x축 방향 속도가 최소인 점에 대한 속도 결손의 변화를 나타낸 것이다.  $x/L \geq 1.5$  영역에서 실험보다 약 10% 정도 작게

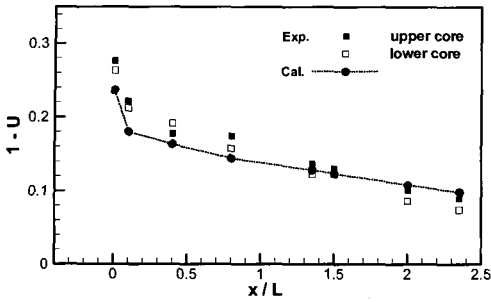


Fig. 9 Recovery of velocity defect

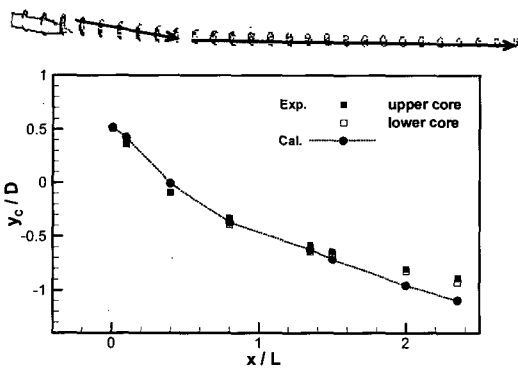


Fig. 10 y-coordinates of vortex core ( $y_c$ )

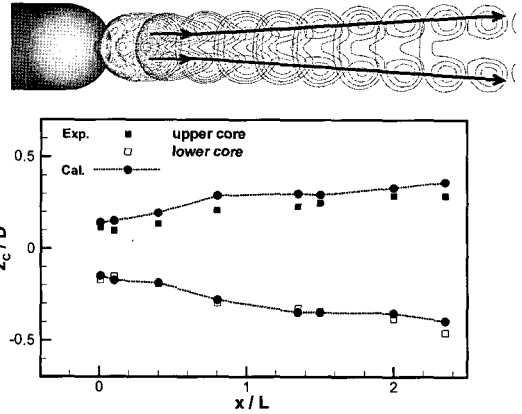


Fig. 11 z-coordinates of vortex core ( $z_c$ )

추정되었다. 한편, 하류로 가면서 두 볼텍스의 간격이 증가하며, Tail 부근에서는 최대 직경의 약 30%, 하류( $x/L=2.35$ )에서는 약 75% 떨어진 것으로 나타났다. 실험에서는 볼텍스가 비대칭이며 위쪽 볼텍스(upper vortex)의 경우, 계산에 비해 약 20% 안쪽 위치로 계속되었다.

3.2.3 레이놀즈 응력

Fig. 12와 Fig. 13은 각각 난류운동에너지와 레이놀즈 응력을 나타내었다.

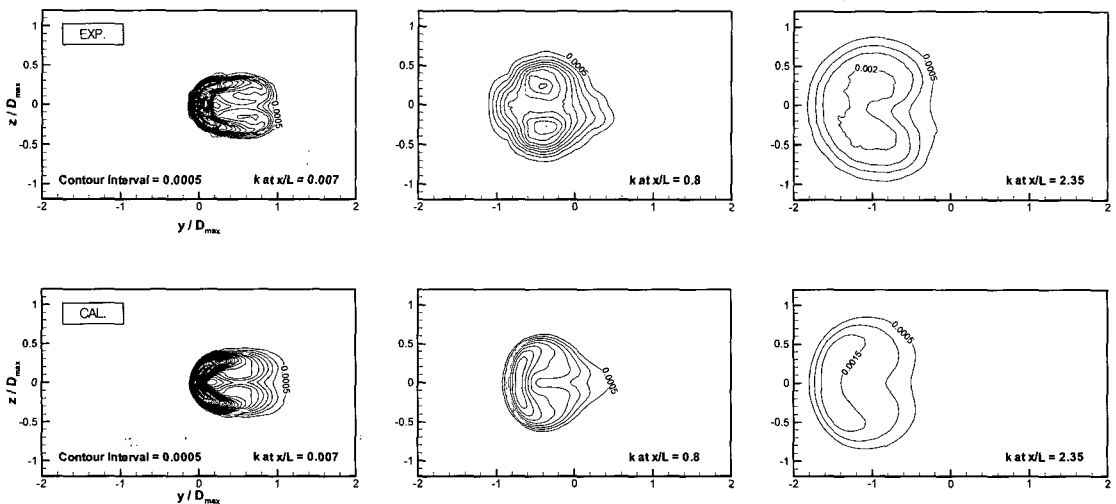
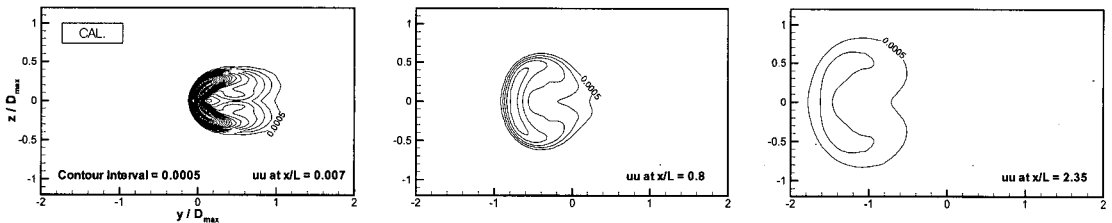
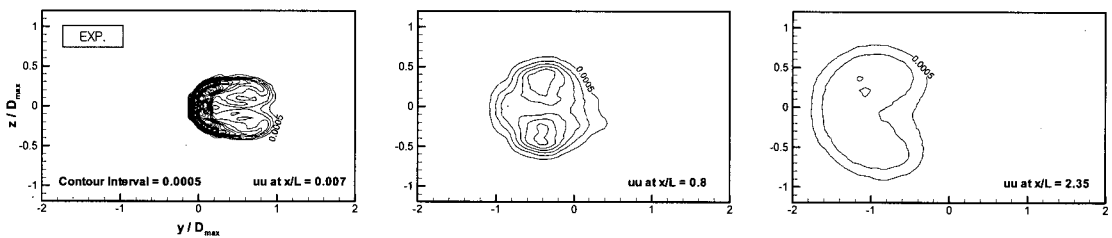


Fig. 12 Turbulence kinetic energy

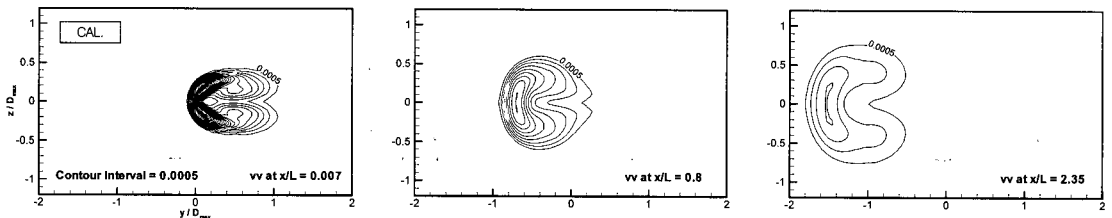
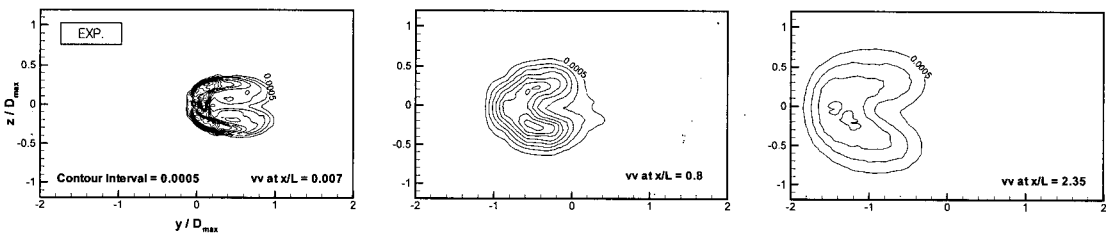
난류운동에너지는  $x/L=0.007$ 에서는 비교적 잘 일치하지만,  $x/L=0.8$ 에서는 분포 형상 및 값에서 차이를 보이고 있다.

Fig. 13(a)는 법선응력 중  $\overline{uu}$ 를 나타낸 것으로 난류운동에너지 분포와 유사한 경향을 보이고 있으며 마찬가지로  $x/L=0.8$ 인 지점에서 차이를 보이고 있다. Fig. 13(b)는  $\overline{vv}$  성분을 도시한 것으로 실험과 대체로 잘 일치하며  $\overline{uu}$ 에 비해 값이 약간 크게 추정되었다. Fig. 13(c)는  $\overline{ww}$  성분을 나타낸

것으로  $x/L=0.8$  이후에서 형상과 값에서 실험과 차이를 보이고 있다. 각 법선응력 성분의 크기를 살펴보면  $\overline{wv}$ ,  $\overline{uu}$ ,  $\overline{ww}$  순이다. Fig. 13(d)와 (f)는 각각 전단응력  $\overline{uv}$ ,  $\overline{uw}$  성분을 나타낸 것으로  $\overline{uw}$ 의 분포는 하류로 가면서 수직으로 배열된 4개의 섬 모양을 보이고, 부호가 번갈아 가면서 바뀌는데, 이는 볼텍스 쌍의 상반된 회전 방향에 기인한다. Fig. 13(e)는 계산으로부터 얻어진  $\overline{wv}$  성분으로 실험 계측치가 없어서 비교하지 못하였다.



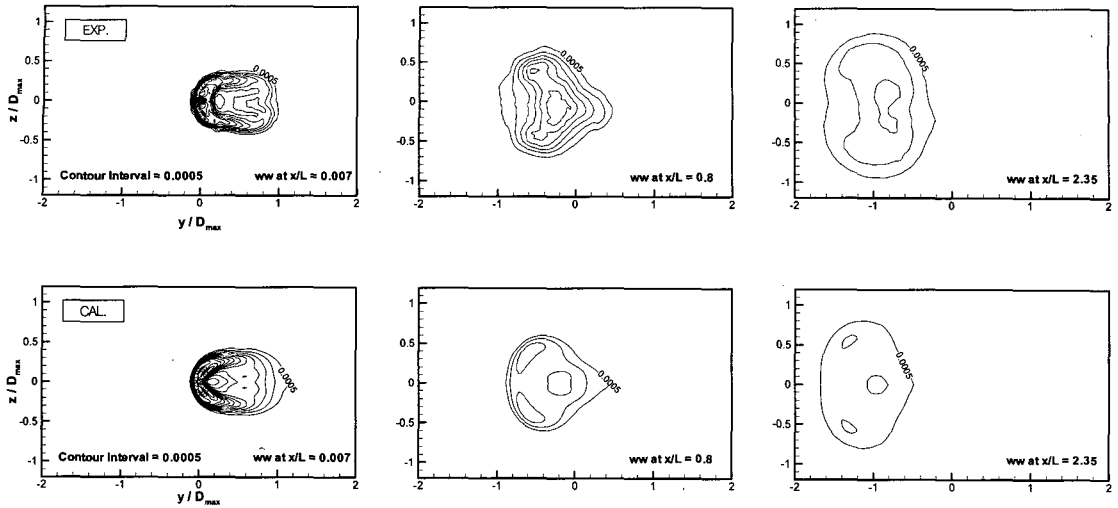
(a) axial component ( $\overline{uu}$ )



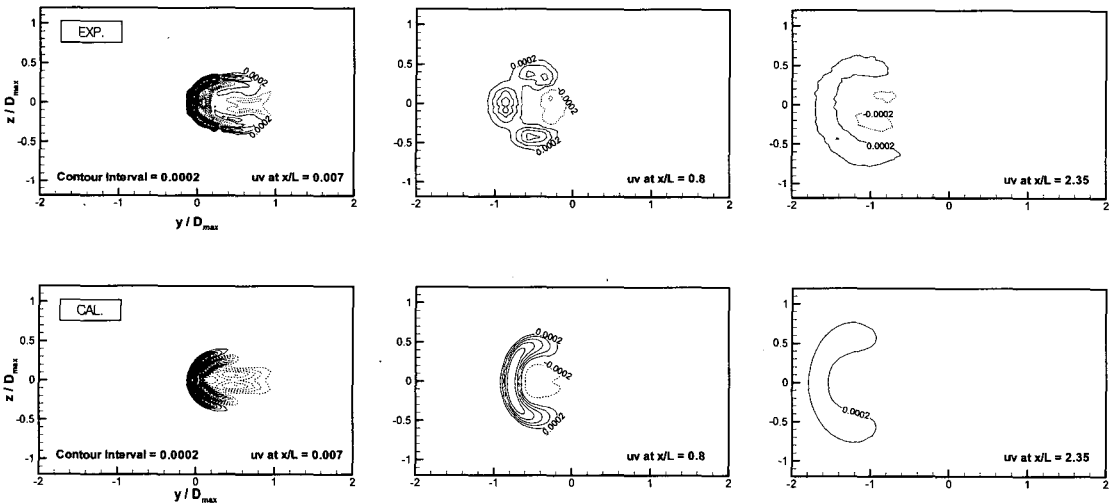
(b) horizontal component ( $\overline{vv}$ )

Fig. 13 Reynolds stresses

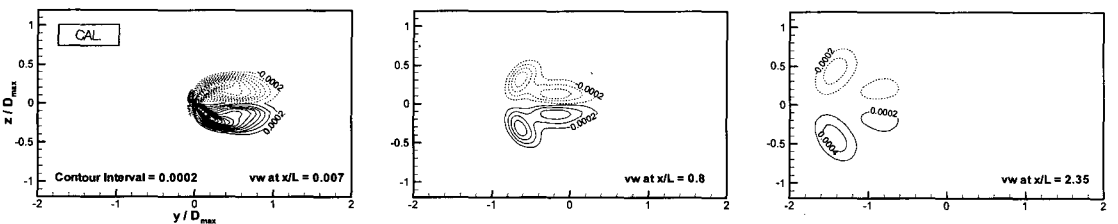




(c) vertical component ( $\overline{uw}$ )

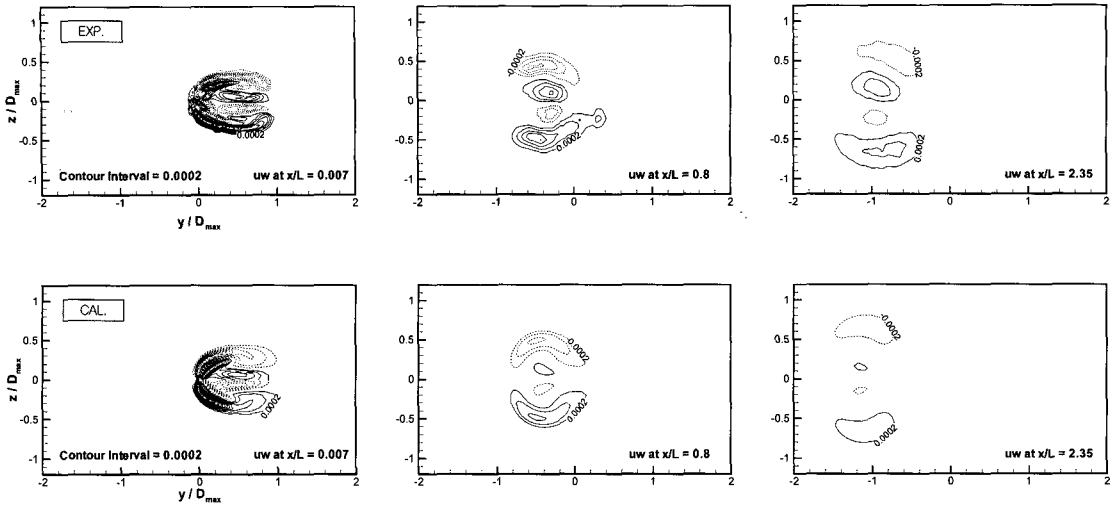


(d) shear component ( $\overline{vw}$ )



(e) shear component ( $\overline{vw}$ )

Fig. 13 Reynolds stresses(continued)



(f) shear component ( $\overline{uw}$ )  
 Fig. 13 Reynolds stresses(continued)

4. 결론

받음각을 갖는 축대칭 물체의 후류 유동에 대해 계산을 수행하고 실험 결과와 비교, 검토하였다. 계산된 평균유속과 난류운동에너지 그리고 난류 응력이 실험 결과와 비교적 잘 일치함을 보였다. 축대칭 물체 바람맞이뒤쪽 표면에서 발생한 3차원 유동박리에 의해 형성된 한 쌍의 종방향 볼텍스는 축대칭 물체의 배후면을 따라서 발달하여 복잡한 3차원 후류 유동을 형성한다. 이 한 쌍의 종방향 볼텍스가 후류에 미치는 영향은 실험과 마찬가지로 물체로부터 꽤 멀리 떨어진 하류( $x/L=2.35$ )까지도 지속되는 것이 확인되었다. 또한 수치해석 결과로부터 물체에 근접한 후류 영역( $x/L \leq 0.1$ )에서는 속도가 빠르게 선형적으로 회복되다가, 이후 일정한 위치로부터 하류( $x/L=2.35$ )로 가면서 속도 회복이 상대적으로 완만해지는 것이 확인되었다. 본 연구를 통하여 3차원 유동 박리가 발생하는 물체 후류의 평균유속과 난류응력 등, 3차원 후류의 복잡한 난류유동 특성을 상용 CFD 계산을 통해 비교적 정확하게 추정할 수 있음을 확인하였다. 이러한 CFD 유동 해석법은 잠수함이나 어뢰와 같은 수중운반체 주위의 난류유동을 해석하는데 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 생각한다.

후 기

본 논문은 첨단조선공학연구센터(ASERC)의 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다. 상기 기관의 후원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김병준, 최순호, 김형태, 반석호, 2005, “프로펠러에 의한 LNG 운반선 이중모형 선미의 속도변화 예측,” 대한조선학회 논문집, 제 42권, 제 5호, pp. 448-457.
- 백부근, 이상준, 2005, “자유표면과 수심깊이가 회전하는 프로펠러 주위 유동에 미치는 영향에 대한 PIV 해석,” 대한조선학회 논문집, 제 42권, 제 5호, pp. 427-434.
- Chesnakas, C.J. and Simposon, R.L., 1997, “Detailed Investigation of the Three-Dimensional Separation about a 6:1 Prolate Spheroid,” AIAA J. Vol. 35, No. 6, pp. 990-999.
- FLUENT 6.2 user's guide
- Gridgen user manual
- Hyun, B.S. and Patel, V.C., 1991,

- “Measurements in the Flow around a Marine Propeller at the Stern of an Axisymmetric Body. Part 1: Circumferentially-Averaged Flow,” Experiments in Fluids, Vol. 11, pp. 33-44.
- Kim, H.T. and Patel, V.C., 1998, “Hot-Wire Measurements in Three-Dimensional Wake of an Axisymmetric Body at Incidence,” Proc., 3rd Int'l Conf. on Hydrodynamics, pp. 821-832.
  - Kim, S.E., 2001, “Unstructured Mesh Based Reynolds Stress Transport Modeling of Complex Turbulent Shear Flows,” 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA-2001-728.



&lt; 김 희 택 &gt;



&lt; 이 평 국 &gt;



&lt; 김 형 태 &gt;